

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION ET FABRICATION D'UN MICROROBOT SANS FIL
AUTONOME OPÉRANT DANS UN MILIEU AQUEUX

WALDER ANDRÉ

DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE ET GÉNIE LOGICIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (PH.D.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

MAI 2009

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

CONCEPTION ET FABRICATION D'UN MICROROBOT SANS FIL
AUTONOME OPÉRANT DANS UN MILIEU AQUEUX

présentée par : ANDRÉ Walder

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

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

M. PIERRE Samuel, Ph.D., président

M. MARTEL Sylvain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. SAVARIA Yvon, Ph.D., membre

M. HAMOUI Anas A., Ph.D., membre

DÉDICACE

*À ma mère et à mon père que j'aime beaucoup
qui ont tout sacrifié pour leurs enfants.*

REMERCIEMENTS

C'est avec toute ma gratitude que je remercie mon directeur de thèse, M. Sylvain Martel, professeur au département de génie informatique et génie logiciel de l'École Polytechnique de Montréal, pour tous les précieux conseils et les pistes de réflexion qu'il m'a apportés. Notre collaboration, tout au long de mes études supérieures, fut pour moi une expérience des plus enrichissantes.

Je tiens également à remercier M. Samuel Pierre, professeur au département de génie informatique et génie logiciel de l'École Polytechnique de Montréal, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Mes remerciements s'adressent aussi à M. Yvon Savaria, directeur du département de génie électrique de l'École Polytechnique de Montréal, de même qu'à M. Anas Hamoui, professeur au département de génie électrique de l'Université McGill, pour avoir accepté d'être membres du jury. Finalement, je tiens à remercier le Dr. Gilles Beaudoin et mon collègue Ouajdi Felfoul avec qui j'ai effectué les tests avec l'appareil d'IRM.

Je tiens également à témoigner ma reconnaissance au Groupe de Recherche en Microélectronique de l'École Polytechnique de Montréal (GRM) et à la Société canadienne de microélectronique (CMC) pour les outils de développement mis à la disposition des étudiants et pour la fabrication de mes circuits intégrés. Je profite de l'occasion pour remercier mes collègues et le personnel du laboratoire de NanoRobotique.

Sur une note plus personnelle, je remercie ma sœur Kettlie pour ses encouragements incessants et l'écoute qu'elle m'a apportée tout au long de mes études doctorales. Merci également à Mulhouse, Guilda et Walmond pour le support qu'ils ont su m'apporter. Je souhaite remercier du fond du cœur ma mère et mon père pour tous leurs encouragements, leur appui et la confiance dont ils ont toujours fait preuve à mon égard.

Du fond du coeur, je tiens à remercier ma fiancée et amoureuse Johanne qui m'a été d'une aide cruciale pour la rédaction de cette thèse.

RÉSUMÉ

Il existe plusieurs définitions du mot « robot ». L'une d'elles définit un robot comme un dispositif qui peut se déplacer et réagir à une excitation pour exécuter une ou plusieurs tâches dédiées. Un tel robot est pourvu d'une certaine forme d'intelligence ou d'un programme qui exécute ces tâches automatiquement sans l'intervention humaine. De plus, sa conception sera influencée par l'environnement dans lequel il évolue et par les fonctions qui doivent lui être intégrées pour effectuer des tâches prédéfinies.

En microrobotique, le principal obstacle dans la miniaturisation des robots intelligents sans fil est d'obtenir la source de puissance nécessaire pour supporter les quatre fonctions de base (intelligence, détection, communication, actuation ou déplacement), malgré les contraintes d'espace. Deux approches principales peuvent être envisagées pour réduire les dimensions du robot, soit l'augmentation de la capacité de réception et de conversion énergétique, soit la diminution du besoin en énergie électrique.

En ce qui concerne la première approche, il s'agit de collecter le maximum d'énergie pouvant être convertie en énergie électrique à l'intérieur des contraintes volumiques du robot et de l'optimiser. Après avoir passé en revue les différents systèmes d'alimentation, nous avons opté pour les cellules photovoltaïques comme système d'alimentation électrique. Celles-ci peuvent être intégrées de façon monolithique avec l'électronique du robot. Cependant, la puissance fournie par ce type

d'alimentation dépend notamment de l'aire utile de la cellule. Or, cette dernière doit respecter les contraintes volumiques de notre microrobot. Pour pallier ce problème, nous proposons une nouvelle architecture pour augmenter l'aire utile d'une cellule photovoltaïque et, par le fait même, le courant photonique. Les résultats des tests expérimentaux indiquent qu'une puissance de $\sim 110 \text{ pW}/\mu\text{m}^2$ est fournie par notre cellule photovoltaïque fabriquée avec la méthode que nous proposons.

Quant à la deuxième approche, qui a pour objectif la minimisation de l'énergie requise, le même courant produit par le module photovoltaïque est multiplexé dans le temps pour piloter le senseur et le système de télécommunication à l'aide d'une nouvelle architecture de circuit à consommation minimale de puissance.

Le fait, d'une part, de proposer un nouveau système de télécommunication qui fonctionne avec un minimum de puissance et qui peut être implanté dans les contraintes volumiques et, d'autre part, de concevoir le robot afin qu'il puisse interagir avec un système d'actuation externe pour pouvoir se déplacer à une destination que celui-ci détermine n'a jamais été réalisé auparavant. Le système de communication est basé sur la modulation du champ magnétique généré par une inductance en des impulsions dont la fréquence varie en fonction de la concentration ionique du médium dans lequel évolue le microrobot. La plage de fréquences opérationnelles de notre circuit varie de 1 kHz à 2 kHz, représentant respectivement un niveau faible et élevé de la concentration ionique détectée. Un ordinateur central interprétera les champs magnétiques détectés pour pouvoir décider de la trajectoire du microrobot.

Le circuit du système de communication a été fabriqué avec la technologie *CMOS* 0.13 μm . Des tests ont été conduits sur les cellules photovoltaïques intégrés au microrobot. Ces tests nous ont permis de mesurer un courant de court-circuit de 2 μA circulant dans l'inductance et une tension en circuit ouvert de 470 mV. D'autres tests ont été réalisés pour détecter les impulsions magnétiques du système de communication proposé en plaçant le microrobot dans un appareil d'imagerie par résonance magnétique (IRM). Ces tests nous ont permis de détecter les impulsions magnétiques générées dans l'inductance et de justifier, par le fait même, la nouvelle architecture proposée pour un circuit auto-alimenté du système de communication. Des images des champs magnétiques générés par le circuit de télécommunication intégré au microrobot ont été enregistrées dans l'IRM.

ABSTRACT

There are several definitions of the word “robot”. One of them defines a robot as a device which can move and react to a stimulus to execute one or more dedicated tasks. Such a robot is endowed with a certain form of intelligence or a program which executes automatically without human intervention. Moreover, the design of a robot will be influenced by the environment in which it moves and by the functions which must be integrated to carry out some preset tasks.

In microrobotics, a major difficulty during the miniaturization of intelligent wireless robots is to feed them with power to support the four basic functions (intelligence, sensors, communication, actuation or displacement) while meeting volume constraints. Therefore, two principal approaches can be considered to reduce the robot dimensions. The first would be to increase the reception capacity and energy conversion. The second would be to decrease the electrical power requirements.

The first approach aims to collect the maximum energy which can be converted into electrical power inside the robot volume constraints and optimizing it. After reviewing the various power systems, we chose the photovoltaic cells as the electrical power system. Those can be integrated with the electronics of the robot. However, the energy provided by this type of power system depends in particular on the useful surface of the cell, but the latter must respect the volume constraints of the microrobot. To mitigate this problem, we propose a new architecture to increase the useful surface of a

photovoltaic cell and, consequently the photonic current. The results of the experimental tests indicate that a power of $\sim 110 \text{ pW}/\mu\text{m}^2$ is provided by our photovoltaic cell manufactured with this method.

As for the second approach, which aims at the minimization of the required energy, the same current produced by the photovoltaic module is time multiplexed to control the sensor and the telecommunication system using a new circuit architecture with minimal power consumption.

Such a miniature microrobot capable of interacting with the environment and communicating with an external computer has never been reported before. The communication system is based on the modulation of the magnetic field generated inside of the robot integrated coils into pulses whose frequency varies according to the ions concentration of the medium in which the microrobot moves. It was set a pulse frequency of 1 kHz to represent a low level of ions concentration and 2 kHz to represent a high level. An external computer interprets this magnetic pulses detected in order to change the microrobot trajectory.

The microrobot is manufactured using *CMOS* 0.13 μm technology, tests are conducted on the integrated photovoltaic cells which allow to measure a short circuit current of 2 μA flowing through the inductance and on an open voltage of 470 mV. More tests were performed using the MRI (Magnetic Resonance Imagery) to detect magnetic pulses generated by the communication system integrated to the microrobot.

These results prove the functioning of the proposed self-powered telecommunication circuit. The MRI has captured images of the magnetic pulses generated by the telecommunication circuit integrated to the microrobot.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xixx
LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS	xx
LISTE DES ANNEXES	xxii
INTRODUCTION.....	1
MÉTHODOLOGIE	8
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	10
1.1 Les récents progrès dans la fabrication des microrobots.....	10
1.2 La biomimétique comme solution.....	11
1.3 Réduction de la taille des microrobots : limites et contraintes	12
CHAPITRE 2 SYSTÈME D’ALIMENTATION POUR UN MICROROBOT SANS FIL OPÉRANT DANS UN MILIEU AQUEUX	19
2.1 Revue de littérature sur les systèmes d’alimentation	20
2.1.1 Alimentation par onde électromagnétique.....	20
2.1.2 Alimentation par induction magnétique	22
2.1.3 Source d’alimentation par effet photovoltaïque.....	25
2.2 Principes de base sur les phénomènes photovoltaïques	29

2.3	Synthèse.....	34
CHAPITRE 3 CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE COMMUNICATION POUR		
	UN MICROROBOT MESURANT $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m} \times 260\ \mu\text{m}$	35
3.1	Motivations	35
3.2	Limites de la technologie.....	37
3.3	Modèle de conception.....	38
3.4	Fabrication d'une cellule photovoltaïque avec la technologie CMOS $0.13\ \mu\text{m}$	45
3.5	Architecture du circuit de génération d'impulsions magnétiques.....	54
3.6	Résultats expérimentaux.....	75
3.7	Synthèse.....	84
CHAPITRE 4 SYSTÈME DE PROPULSION.....		
4.1	Motivations	85
4.2	Architecture globale du système de propulsion proposée pour notre microrobot.....	86
4.3	Description matérielle de la plateforme	90
4.4	Description du logiciel de la plateforme.....	97
4.5	Architecture du circuit pour l'injection du courant dans le microélectroaimant.....	100
4.6	Résultats expérimentaux.....	103
4.7	Synthèse.....	105
CHAPITRE 5 RECOMMANDATIONS.....		
5.1	Modification du circuit de télécommunication.....	107
5.2	Utilisation des bactéries magnétotactiques comme système de propulsion	111
5.3	Synthèse.....	113
CONCLUSION		
		114

BIBLIOGRAPHIE.....	118
ANNEXES.....	128

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Schéma illustrant le principe de génération d'énergie par induction magnétique	23
Figure 2.2	Section d'une cellule photovoltaïque	30
Figure 2.3	Circuit modélisant la cellule photovoltaïque dans CADENCE en vue de la simulation.....	33
Figure 3.1	Diagramme temporel montrant la modulation de fréquence du senseur en fonction du niveau de la concentration ionique du médium	39
Figure 3.2	Modèle de conception	39
Figure 3.3	Conception d'un inverseur en utilisant une cellule photovoltaïque	42
Figure 3.4	Circuit de base pour la génération de l'impulsion magnétique	43
Figure 3.5	Circuit réduit résultant de la décharge de la photodiode D ₃	43
Figure 3.6	Vue de coupe du layout du circuit	44
Figure 3.7	Vue de coupe de la photodiode	46
Figure 3.8	Image de la photodiode dans CADENCE	47
Figure 3.9	Caractéristique I/V pour des longueurs d'onde comprises entre 500 nm et 650 nm (250 mW / cm ²)	51
Figure 3.10	Caractéristique P/V pour des longueurs d'onde comprises entre 500 nm et 650 nm (250 mW / cm ²)	51
Figure 3.11	Caractéristique I/V pour des longueurs d'onde comprises entre 700 nm et 850 nm (250 mW / cm ²)	52
Figure 3.12	Caractéristique P/V pour des longueurs d'onde comprises entre 700 nm et 850 nm (250 mW / cm ²)	52
Figure 3.13	Étage d'amplification de la tension d'entrée	55

Figure 3.14	Analyse DC	57
Figure 3.15	Circuit de génération d'impulsions magnétiques en fonction du niveau de la concentration ionique dans un médium	58
Figure 3.16	Réduction du circuit de génération d'impulsions magnétiques après l'activation du transistor M_1	59
Figure 3.17	Modèle équivalent du circuit	61
Figure 3.18	Réduction du circuit de génération d'impulsions magnétiques	63
Figure 3.19	Circuit pour l'implémentation du module de délai	64
Figure 3.20	Analyse transitoire montrant la tension à l'entrée de différents transistors intervenants dans la génération des impulsions magnétiques.....	68
Figure 3.21	Analyse transitoire montrant la modulation en fréquence (10 kHz à 20 kHz) du courant avec une tension d'entrée variant de 0 à $V_e = 1.2\text{ V}$	69
Figure 3.22	Analyse transitoire montrant la modulation en fréquence du courant avec une tension d'entrée variant de 0 à $V_e = 1.2\text{ V}$ (sortie groupée)....	69
Figure 3.23	Analyse transitoire montrant la modulation en fréquence (1 kHz à 2 kHz) du courant avec une tension d'entrée variant de 0 à $V_e = 1.2\text{ V}$	70
Figure 3.24	Analyse DC – simulation	70
Figure 3.25	Analyse transitoire - courant de fuite en fonction du temps	71
Figure 3.26	Champ magnétique détecté par le senseur	72
Figure 3.27	Simulation dans MATLAB du champ magnétique détecté.....	73
Figure 3.28	Photomicrographie du microrobot avant d'être gravé	75
Figure 3.29	Les composantes du microrobot présenté dans cette thèse	76

Figure 3.30	(a) caractéristique I–V; (b) P-V de la photodiode D ₄ illuminée par un laser de 1 mW - 650 nm	77
Figure 3.31	Détection du champ magnétique généré dans la bobine avec un senseur à magnétorésistance, Ch1 est la sortie du senseur à magnétorésistance, et Ch2 est le signal d'entrée	78
Figure 3.31	Les quatre puces placées dans l'IRM sans la source lumineuse pour s'assurer que ces dernières ne produisent pas d'artéfacts	81
Figure 3.33	Image des champs magnétiques générés par le circuit de télécommunication avec les quatre puces placées dans l'IRM incluant la source lumineuse	81
Figure 3.34	Image enregistrée avec le récipient de gel placé dans l'IRM avec la source lumineuse et sans les quatre puces	82
Figure 3.35	Image des champs magnétiques générés par le circuit de télécommunication avec la source lumineuse et les quatre puces placées dans l'IRM	83
Figure 4.1	Déplacement du microrobot dans un milieu aqueux.....	88
Figure 4.2	Plateforme de propulsion du microrobot	89
Figure 4.3	Architecture globale pour le contrôle de la matrice	91
Figure 4.4	(a) schéma du principe ; (b) vue de profile.....	93
Figure 4.5	Graphe de la force portante en fonction du courant dans le solénoïde pour la détermination du courant minimal	96
Figure 4.6	Architecture du système de pistage des bactéries.....	98
Figure 4.7	Architecture du système de contrôle et de pistage	98
Figure 4.8	Interface usagée	99
Figure 4.9	Circuit de génération du champ magnétique	100

Figure 4.10	« Layout » du circuit de contrôle des microélectroaimants	101
Figure 4.11	« Layout » des convertisseurs tension/courant utilisés pour générer le champ magnétique dans la matrice	102
Figure 4.12	Photomicrographie du circuit après fabrication	102
Figure 4.13	Setup expérimental	103
Figure 4.14	Mesures expérimentales de l'amplificateur	103
Figure 4.15	Convertisseur tension-courant avec une plage de tension d'entrée V_{IN} qui varie entre 0.1 et 1 V	104
Figure 5.1	Modification du circuit	107
Figure 5.2	Réduction du circuit de génération d'impulsions magnétiques	108
Figure 5.3	Modèle équivalent en inverseur	108
Figure 5.4	Layout du circuit dans CADENCE	110
Figure 5.5	Un essaim de 3000 bactéries déplaçant un micro objet	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Caractéristique des bactéries MC-1 (polaires)	18
Tableau 3.1	Résumé de l'opération	40
Tableau 4.1	Sommaire des résultats	97

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

A	Aire
B	Champ magnétique
CMC	Canadian Microelectronics Corporation
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
D	Diode
E	Énergie
Φ	Flux magnétique
Φ_b	Built in Voltage Potential
I_d	Courant de drain
I_{sc}	Short circuit current
ISFET	Ion-Sensitive FET
kHz	Kilo Hertz
L	Inductor
$L_{(n, p)}$	Longueur de diffusion dans le semi-conducteur du type n et p respectivement
LSI	Large Scale Integrated Circuit
λ	Longueur d'onde
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MTB	Magnetotactic Bacteria
$\mu(n, p)$	Mobilités des électrons et des trous respectivement
NMOS	N-channel Metal-Oxide Semiconductor
PMOS	P-channel Metal-Oxide Semiconductor
PWM	Pulse Width Modulation
R	Résistance
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification

R_s	Series resistance
R_{sh}	Shunt resistance
RMS	Root-Mean-Square
SOC	System-On-Chip
$\tau_{n,p}$	Durée de vie des porteurs minoritaires
V_{CTRL}	Tension de contrôle
V_{DD}	Tension d'alimentation
V_e	Tension d'entrée
V_G	Tension de grille
V_{GS}	Tension de grille-source
V_{oc}	Open circuit voltage
V_{tn}	Tension de seuil pour un NMOS
V_{tp}	Tension de seuil pour un PMOS
V_{SS}	Grounds
$W_{dep(n,p)}$	Largeurs de la région de déplétion dans le semi-conducteur du type n et p respectivement

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A	128
ANNEXE B	140

INTRODUCTION

La fabrication des microrobots est un domaine en constant développement. Les avancées spectaculaires dans les domaines de la microfabrication et de la microélectronique nous permettent de fabriquer des systèmes de plus en plus petits et de plus en plus performants.

L'intérêt marqué pour l'amélioration des techniques dans le domaine des interventions médicales stimule la recherche dans la conception des robots miniatures. Les systèmes médicaux pourraient utiliser ces microrobots comme outils pour des missions thérapeutiques ou, à plus court terme, comme biosenseurs capables de naviguer dans les vaisseaux sanguins.

Cependant, les vaisseaux sanguins, plus particulièrement les capillaires, ont un diamètre variant de $4\ \mu\text{m}$ à $30\ \mu\text{m}$, ce qui justifie la motivation pour réduire la taille des microrobots afin qu'ils puissent atteindre le plus d'endroits possibles. À cet égard, les travaux de Brad Nelson visent la fabrication d'un microrobot propulsé par résonance magnétique pouvant être utilisé pour des opérations intraoculaires. Toutefois, ce dernier est un microrobot passif dans le sens où il ne dispose d'aucun senseur ou d'aucune forme d'intelligence. De même, les chercheurs au laboratoire de NanoRobotique de l'École Polytechnique de Montréal ont démontré la possibilité de propulser un microdispositif dans le corps humain [MAR07]. Cette technique pourrait être appliquée

pour des microrobots intelligents. Par ailleurs, dans le cas des microrobots intelligents sans fil de dimensions micrométriques, aucun prototype n'est rapporté dans la littérature.

Cela étant, les microrobots existant actuellement et mesurant quelques centaines de micromètres ne sont, pour la plupart, que des projets de recherche ou des preuves de concept, leur intégration en un système complètement fonctionnel n'étant toujours pas réalisée.

En utilisant les techniques offertes par la microélectronique, les impasses majeures empêchant la fabrication de microrobots autonomes tout en respectant les dimensions micrométriques doivent être identifiées et des solutions doivent être proposées, ce qui est le but premier de cette thèse.

La fabrication des microrobots intelligents aux dimensions micrométriques est soumise aux trois contraintes suivantes, soit : l'obtention de l'énergie électrique requise, la communication avec le microrobot et le système de propulsion. Or, nous avons remarqué, grâce à notre revue de littérature, qu'il n'existait aucune source d'alimentation électrique intégrée aux microrobots construits à l'échelle micrométrique. De plus, les ouvrages consultés faisaient état des difficultés suivantes. La première concernait la conception d'un système de communication permettant aux microrobots d'acheminer les données recueillies vers un ordinateur externe pour être traitées. La seconde avait trait à la création d'un système de propulsion et de contrôle pouvant orienter dans toutes les directions un microrobot construit à l'échelle micrométrique.

En plus des contraintes d'alimentation, de communication et de propulsion, le recensement des travaux relatifs à la microrobotique nous a démontré que l'intelligence et l'autonomie des microrobots demeurent non résolues.

Motivations : L'une des principales motivations de la recherche en microrobotique réside dans la faible énergie que cette technologie nécessite et, par le fait même, plusieurs avantages découlent de l'utilisation des microrobots et, plus particulièrement, de l'utilisation des microrobots intelligents. À titre d'exemple, l'utilisation des microrobots permet une plus grande flexibilité lors de l'instrumentation à l'échelle atomique. De plus, leurs faibles dimensions leur permettent de se déplacer et de se positionner avec beaucoup plus de précision pour des applications du type de balayage atomique, de micromanipulation ou de micro-assemblage. Citons également, à titre d'avantage de l'utilisation des microrobots, la réduction des coûts de production que cette technologie permet.

De plus, la fabrication des robots miniatures capables de communiquer permet ainsi de créer des agents de détection de toxicité dans l'environnement, les microrobots étant en soi des biosenseurs intelligents. Finalement, le plus important des avantages qu'offrent les microrobots intelligents est qu'ils peuvent être utilisés dans le domaine médical, par exemple, pour une application potentielle dans le corps humain. En effet, leur petite dimension permet l'accès à des endroits difficiles à atteindre avec les instruments chirurgicaux conventionnels.

Notons que dans le domaine de la microrobotique, la plupart des recherches se concentrent sur le système de propulsion ou sur l'intégration de circuits électroniques plutôt que sur l'intelligence du microrobot [DOM08, YES05]. Ainsi, les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse poussent les limites de la microrobotique en intégrant de l'électronique à un prototype de microrobot confiné dans un espace de quelques centaines de micromètres carré. Cela étant, l'architecture de notre microrobot contient des sous-systèmes, en l'occurrence le circuit de communication, qui peuvent être intégrés dans d'autres circuits, même statiques, tels que les puces électroniques.

Par ailleurs, soulignons que les travaux réalisés jusqu'à nos jours démontrent que des efforts sont déployés au niveau de l'implantation de senseurs dans les microrobots mobiles intelligents. En effet, la capacité de percevoir l'environnement est une fonction de grande importance pour les microrobots. Or, les senseurs implantés dans les microrobots requièrent un haut niveau énergétique, ce qui peut occasionner un problème majeur en raison de la taille des microrobots. En plus de pouvoir percevoir l'environnement, nous considérons que les microrobots doivent être en mesure de communiquer les données qu'ils détectent ou les mesures qu'ils extraient. C'est pourquoi nous proposons, dans le cadre de notre thèse, une nouvelle architecture capable de pallier le problème énergétique mentionné dans les travaux déjà réalisés. Les résultats obtenus avec la nouvelle architecture proposée, qui pourrait être implantée dans les contraintes volumiques des microrobots, sont susceptibles d'influencer la microrobotique.

Cela étant, nous proposons un nouveau microrobot muni d'un senseur et d'un système de télécommunication tout en considérant les limites de la technologie pour un robot mesurant que $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$.

Contribution de cette thèse : Les contributions de cette thèse portent sur la conception et la fabrication du plus petit robot intelligent et autonome existant qui mesure $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m} \times 260\ \mu\text{m}$. La première contribution consiste en la conception d'une architecture permettant d'augmenter l'aire utile d'une cellule photovoltaïque.

La conception d'une nouvelle architecture permettant la fabrication d'un système de communication requérant peu d'énergie et utilisant les impulsions magnétiques comme médium de transmission est notre seconde contribution. Ce système de communication est basé sur la détection du niveau de la concentration ionique du médium dans lequel évolue le microrobot. Ainsi, le système est conçu pour transmettre des impulsions magnétiques dont la fréquence varie suivant le niveau de la concentration ionique détectée. Les résultats préliminaires effectués avec un senseur à magnétorésistance suggèrent la possibilité de l'utilisation d'un *SQUID* « *Super-Quantum Interference Device* » pour capter ces impulsions magnétiques avant d'être acheminées vers un ordinateur qui en effectuera le traitement. Ce type de communication à base d'impulsions magnétiques, n'avait jamais été réalisé jusqu'à ce jour.

Enfin, la troisième de nos contributions est de proposer un système de propulsion qui utilise une plateforme que nous avons fabriquée pour contrôler une matrice de

microélectroaimants. La distance entre les microrobots et les microélectroaimants évoluant à l'intérieur de la plateforme étant inférieure à une centaine de micromètres, cela permet de diminuer la force portante du microélectroaimant requise pour attirer notre microrobot. Par conséquent, l'apport énergétique nécessaire diminue.

Division des chapitres : Le premier chapitre de notre thèse concerne le recensement des travaux réalisés en matière de microrobotique. Nous discuterons notamment des microrobots faits à base de silicium pour des utilisations diverses, de même que des microrobots destinés au domaine médical.

Le deuxième chapitre expose les démarches que nous avons entreprises afin de trouver un système d'alimentation intégrable à un microrobot mesurant quelques centaines de micromètres de côté. Plus particulièrement, nous passerons en revue les différents systèmes d'alimentation existants pour conclure sur le choix des cellules photovoltaïques pour alimenter notre microrobot. Nous concluons ce deuxième chapitre par un article que nous avons publié dans la revue *IEICE* (« *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers* »), qui présente les résultats de notre cellule photovoltaïque fabriquée avec la technologie *CMOS* 0.18 μm .

Dans le troisième chapitre, nous présentons une nouvelle architecture conçue pour un système de communication sans fil intégré au microrobot. Dans un premier temps, nous passons en revue les différents systèmes de communication des microrobots existants. Dans un second temps, nous discutons des avantages et des inconvénients

reliés à l'utilisation de la communication par radio fréquence (*RF*). Enfin, nous exposons brièvement les pour et les contre du système de communication par infrarouge.

Le chapitre quatre présente l'état des avancées dans le domaine de la fabrication des micromoteurs pour ensuite traiter du système de propulsion que nous avons conçu pour déplacer notre microrobot. Également, nous exposons dans ce chapitre les contraintes rattachées à l'utilisation et à l'intégration des micromoteurs dans les microrobots. La présentation de l'architecture de la plateforme automatisée pour la propulsion et le contrôle de la trajectoire de notre microrobot vient clore ce chapitre.

Enfin, dans le chapitre cinq, nous discutons des résultats expérimentaux exposés dans les chapitres précédents. De même, ce chapitre met en lumière les contributions apportées par ce projet de recherche et examine les avenues possibles pour améliorer les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse.

MÉTHODOLOGIE

Dans le cadre de notre thèse, nous avons d'abord conçu une architecture pour une cellule photovoltaïque afin d'augmenter l'aire utile de sa surface. Cela étant, cette cellule fournit une plus grande puissance et nous permet ainsi d'alimenter notre microrobot. Nous avons fabriqué trois cellules. La première mesure $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, la deuxième $200\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ et la troisième $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$. Ces trois cellules photovoltaïques fournissent respectivement une puissance maximale de $5.6\ \mu\text{W}$, $12.25\ \mu\text{W}$ et $22.9\ \mu\text{W}$ avec la technologie *CMOS* $0.18\ \mu\text{m}$.

Nous avons par la suite développé une technique permettant de concevoir un circuit ne requérant qu'une très faible puissance opérationnelle et utilisant les impulsions magnétiques comme médium de communication.

De même, nous avons conçu une plateforme automatisée pour le contrôle de notre microrobot. Cette plateforme permet le déplacement du microrobot par un programme informatique prédéfini ou par l'interaction d'un utilisateur.

Par ailleurs, puisque le système de propulsion utilise la force magnétique, nous avons construit une matrice composée de microélectroaimants branchés à une puce munie de convertisseurs tension/courant fournissant chacun un courant maximal de $4.5\ \text{mA}$. Cette puce a pour fonction d'interfacer la matrice avec un ordinateur et de fournir le courant dans les microélectroaimants qui la compose.

Enfin, nous avons fabriqué les prototypes de deux microrobots avec la technologie *CMOS* 0.18 μm et *CMOS* 0.13 μm . Le premier microrobot fabriqué mesure 450 μm \times 600 μm et le second 300 μm \times 300 μm et ils sont tous deux destinés à opérer dans un milieu aqueux. Pour le microrobot fabriqué avec la technologie *CMOS* 0.13 μm , il s'agissait uniquement d'adapter à cette cellule l'architecture proposée pour la cellule photovoltaïque fabriquée en *CMOS* 0.18 μm , puisque le fait de changer de technologie n'a pas réellement d'impact sur la puissance délivrée.

La figure 3.25 présente notre microrobot qui évolue dans un milieu aqueux et qui se situe au-dessus d'un support composé d'une matrice de micro électroaimants responsables de la propulsion du microrobot. Notre microrobot communique avec l'environnement externe en générant des impulsions magnétiques à partir de deux inductances situées à sa surface. Ces impulsions magnétiques, qui sont des messages codés, seront détectées par un capteur à magnétorésistance, lequel est branché à un ordinateur externe pour le traitement.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, nous présentons l'état des avancées dans le domaine de la micro/nanorobotique. Il sera entre autres question des méthodes d'alimentation électrique et des systèmes de communication et de propulsion utilisés dans ce domaine.

1.1 Les récents progrès dans la fabrication des microrobots

De nombreux progrès ont été rapportés dans la littérature en matière de microrobotique au cours des dix dernières années. La plupart de ces travaux se sont particulièrement concentrés sur le système d'actuation ou de propulsion. Cela étant, plusieurs types de microrobots mobiles ont été recensés. N'étant pas soumis aux contraintes volumiques, il est possible d'intégrer à ces microrobots des CPUs, des circuits électroniques, de l'alimentation et même, dans certains cas, des senseurs. Dans la plupart des cas, le système d'actuation des microrobots était basé sur l'utilisation des moteurs *MEMS* « *Micro Electromechanical System* » ou des pattes piézoélectriques.

Afin de pousser les limites de la mobilité des microrobots, certaines recherches ont été conduites pour ajouter un autre degré de liberté à leur déplacement. Cela étant, en plus de pouvoir suivre une trajectoire plane, les microrobots étaient également en mesure de grimper sur les murs, sur les plafonds et sur toutes autres surfaces courbées [HIS05]. Le système d'actuation du microrobot présenté dans ce travail utilise des éléments piézoélectriques pour effectuer des déplacements très précis. De plus,

l'utilisation d'électroaimants a permis l'adhésion de notre microrobot à la surface d'un mur ou d'un plafond. De même, le recours à des microsenseurs optiques nous permet d'obtenir de la rétroaction (feedback) sur la position de notre microrobot, dont les dimensions sont de 5.9 cm × 3.7 cm × 2.7 cm et dont les systèmes externes de contrôle et d'alimentation lui sont reliés à l'aide de fils électriques.

Les dimensions de notre microrobot ci-dessus mentionnées ne permettent pas l'intégration, à même celui-ci, d'un système d'alimentation. En effet, le poids des fils électriques pourrait s'avérer un réel obstacle lors du positionnement d'un microrobot fabriqué à l'échelle micrométrique.

1.2 La biomimétique comme solution

Devant ce constat, les chercheurs, désireux de créer des microrobots sans fil aux dimensions micrométriques, se sont tournés vers d'autres alternatives de locomotion ou de propulsion de ces microrobots. L'une de ces alternatives consiste à créer un micromoteur imitant les flagelles des bactéries [ABB08, EDD03]. Bien qu'il s'agisse d'une alternative intéressante, ces micromoteurs requièrent beaucoup de puissance et leur intégration dans un microrobot n'a toujours pas été démontrée.

Dans le souci de fabriquer des microrobots de plus en plus petits, un micromoteur imitant les flagelles des bactéries (*E. Coli*) a été construit. Celui-ci mesure 250 μm × 250 μm et est fabriqué pour une utilisation potentielle comme système de propulsion pour les microrobots voyageant dans les vaisseaux sanguins [WAT09]. Ce

micromoteur a une vitesse angulaire de 1295 rpm et peut fournir un couple de 13 nN ainsi qu'une puissance de sortie de 4.25 μ W. Bien que ce micromoteur représente une percée dans le domaine de la microfabrication, ses dimensions demeurent toujours trop grandes pour permettre son utilisation dans les vaisseaux sanguins, tels que le préconisait son concepteur. De plus, le problème de l'alimentation électrique de ce microrobot demeure.

Cela étant, l'intégration du micromoteur dans un microrobot pour former un système fonctionnel est particulièrement difficile à réaliser. Pour ce qui est de la conception des micromoteurs, les chercheurs ne sont toujours pas parvenus à créer un moteur fonctionnel capable de rivaliser avec les moteurs de type flagelle des bactéries.

1.3 Réduction de la taille des microrobots : limites et contraintes

La plupart des microrobots recensés ont des dimensions avoisinant les quelques centaines de micromètres de côté. Par conséquent, ils ne peuvent être utilisés pour des actions thérapeutiques ciblées, par exemple, dans les systèmes capillaires tels que le recommandent les chercheurs. À titre d'exemple, des chercheurs de l'Université de Ritsumeikan, au Japon, ont fabriqué un prototype d'un microrobot pouvant naviguer dans le corps humain. Ce dernier mesure 2 cm \times 1 cm et pèse 5 grammes [MIC07]. De plus, il est dirigé par une télécommande et est équipé d'une micro caméra qui lui permet de prendre des photos et d'un système d'éclairage réalisé avec une diode.

Notons que la plupart des microrobots que nous avons recensés, qu'ils soient destinés au domaine médical ou non, ne sont pas dotés d'un système de communication ou d'une forme d'intelligence. Ils constituent tout de même une source d'inspiration pour la conception des microrobots destinés à naviguer dans le corps humain.

Les chercheurs du laboratoire *Berkeley Sensor and Actuator Center* de l'Université de Californie, ont démontré la possibilité de fabriquer un microrobot autonome à base de silicium (*SOI*) « *Silicon-on-Insulator* » [HOL03]. Ce microrobot mesure $8.5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ de côté et tient sa source d'alimentation des cellules photovoltaïques. Le système de locomotion utilisé est basé sur les *MEMS* « *Micro Electro-Mechanical Systems* » qui requièrent une tension d'opération de 50 V obtenue par la combinaison de 90 cellules photovoltaïques. De plus, ce microrobot est fabriqué sur 3 puces distinctes qui sont assemblées en utilisant la méthode d'assemblage hybride. Bien que le microrobot du laboratoire Berkeley démontre une bonne mobilité, le système de locomotion qu'il utilise ne permet pas sa miniaturisation à l'échelle micrométrique, limitant ainsi son application dans le domaine biomédical.

Un autre exemple de microrobot fabriqué à base de silicium avec le procédé monolithique standard est le *Walking Silicon Micro-Robot* [EBE99]. L'ensemble des composants de ce microrobot, qui mesure $15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ de côté et qui utilise une source d'alimentation externe, est intégré sur une seule puce.

Notons que la recension des travaux fabriqués à base de silicium nous a permis de constater que la plupart des microrobots fabriqués avec le procédé standard de fabrication des circuits intégrés utilisent les *MEMS* en guise de système de locomotion, qui nécessite généralement une haute tension opérationnelle. Par conséquent, ce système de locomotion ne peut être utilisé pour la fabrication des microrobots destinés au domaine médical.

La recherche en micro et nanorobotique vise notamment à permettre la mise au point des instruments chirurgicaux plus performants, capables d'effectuer certains types d'opérations qui, jadis, étaient pratiquement impossibles ou très difficiles à réaliser avec les instruments chirurgicaux traditionnels. Parmi ces travaux, mentionnons ceux du laboratoire de NanoRobotique de l'École Polytechnique de Montréal. En effet, les chercheurs de ce laboratoire ont réussi à propulser un micro dispositif dans le corps d'un animal vivant à l'aide des champs magnétiques, démontrant ainsi la possibilité d'utiliser des microrobots pour la livraison ciblée de médicaments [MAR07].

Dans la même optique, des chercheurs de l'*Institute of Robotics and Intelligent Systems*, situé à Zurich, ont été en mesure de modéliser et de contrôler un biomicrorobot sans fil mesurant $950 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, évoluant dans un milieu fluide [YES06] et dont le système de propulsion – comme la plupart des microrobots de taille micrométrique [VOL08] – est basé sur l'utilisation des champs électromagnétiques. C'est un microrobot qui pourrait être utilisé selon le concepteur pour effectuer des chirurgies minimalement invasives dans le corps humain. Cela étant, celui-ci est conçu pour des

opérations in situ et peut être contrôlé en fixant la fréquence magnétique du champ externe à une certaine fréquence soit 2 et 3 kHz pour faire vibrer son moteur. Malheureusement, ce microrobot n'est pas autonome et ne dispose d'aucun senseur.

Les chercheurs du département de génie mécanique de l'Université de Carnegie Mellon ont fabriqué un microrobot mesurant $300 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ dont le système d'actuation est basé sur l'utilisation de champs magnétiques générés par cinq électroaimants. Quatre de ces cinq électroaimants sont placés au-dessus du microrobot permettant ainsi de contrôler la direction et le gradient du champ magnétique horizontal. Quant au cinquième électroaimant, il est placé en dessous du microrobot pour fixer le réglage du champ électromagnétique [SIT08]. Les largeurs internes et externes de ces électroaimants, qui sont des bobines magnétiques, sont de 0.120 m et 0.157 m respectivement. Le champ magnétique maximum généré à l'intérieur des électroaimants est de 6.5 mT. Un gradient magnétique de 149 mT/m est mesuré par ces électroaimants. Le champ magnétique relativement élevé peut être expliqué par la distance entre les électroaimants et le microrobot qui ne mesure que quelques centaines de micromètres, ce qui requiert un fort gradient magnétique pour assurer la propulsion du microrobot. Notons que ce microrobot est fait entièrement de NdFeB « *neodymium-iron-boron* », qu'il ne contient ni d'électronique, ni de senseur.

La plupart des microrobots mesurant les quelques centaines de micromètres de côté recensés utilisent le champ magnétique comme système de propulsion. En effet, à

cette échelle, il n'existe pas encore assez de progrès dans le domaine de la fabrication de micro moteurs intégrables à ces microrobots.

En somme, les travaux recensés ne nous ont pas permis d'identifier un microrobot sans fil, de dimension micrométrique et capable d'opérer de façon autonome dans un milieu aqueux.

C'est pourquoi les chercheurs du laboratoire de nanorobotique de l'École Polytechnique de Montréal proposent non pas d'imiter le moteur de flagelle des bactéries, mais d'utiliser ces dernières – et plus particulièrement les bactéries magnétotactiques [FRA97, MAT91] – comme système de propulsion [MAR06]. Dans la section 1.2 nous allons donner une brève introduction sur les bactéries magnétotactiques.

Les bactéries magnétotactiques sont des cellules prokaryotes vivant en milieu marin dont la navigation est gouvernée par le champ magnétique terrestre [FRA79]. Elles parviennent à s'orienter par l'entremise d'une ou de plusieurs chaînes de nanoparticules minérales magnétites ou de grigites logées à l'intérieur de leur membrane. Ce phénomène est connu sous le nom de magnétotaxis-aerotaxis [FRA97].

Les domaines d'application des bactéries sont divers et largement attribuables au moteur de type flagelle dont sont pourvues ces dernières. En effet, le fonctionnement de leur flagelle ne requiert aucune puissance électrique. Elles sont regroupées dans sept catégories, à savoir les AMB-1, MHB-1, MC-1, les MV-1, les MV-4, les MS-1, et les

RS-1 [SAK93, BLA79]. Les bactéries de type MC-1 offrent un couple beaucoup plus grand que les autres types de bactéries et elles sont plus facilement contrôlables. Ces bactéries ont une forme circulaire et elles contiennent une chaîne unique de cristaux magnétiques, soit les magnétosomes [FRA97]. Elles possèdent un ensemble de neuf à dix flagelles répartis en deux groupes situés à une extrémité de la cellule [MEL93]. Les chercheurs ignorent jusqu'à présent si chaque flagelle est piloté par son propre moteur. De plus, les bactéries de type MC-1 peuvent nager dans les deux directions le long d'une ligne de champ et elles sont des bactéries polaires. Leur habitat naturel est l'eau salée ou l'eau douce. En ce qui concerne leur vitesse de navigation, elle dépend de leur âge et varie, conséquemment, entre 200 et 300 $\mu\text{m/s}$ [MAR07]. Il est possible de les forcer à adopter un comportement particulier en les soumettant à un champ magnétique supérieur au champ magnétique terrestre (lequel est égal à 0.5 Gauss environ). La figure 1.1 illustre une bactérie MC-1.

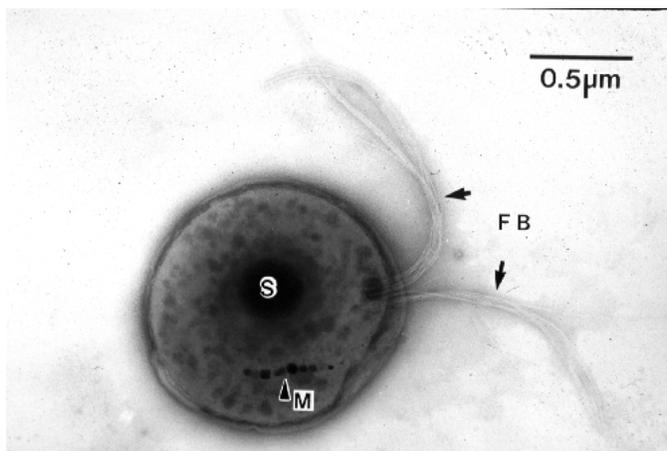


Figure 1.1 bactérie MC-1 [FRA73]

Le Tableau 1.1 indique les valeurs de quelques-unes des caractéristiques de cellules MC-1.

Tableau 1.1 Caractéristique des bactéries MC1 (polaires)

Caractéristiques	Valeurs
Vitesse	200-300 $\mu\text{m} / \text{s}$
Taille	1-2 μm
Nombre de flagelles	9 à 10
Diamètre du flagelle	10 nm
Taille du magnétosome	70-100 nm
Habitat naturel	Océan
Particules minérales magnétites	Fe_3O_4
Nombre de magnétosomes	5-14

Les caractéristiques des bactéries MC-1 font d'elles les plus aptes à être utilisées comme système de propulsion éventuelle pour un microrobot.

Notons que le moteur de type flagelle n'est pas l'apanage des bactéries magnétotactiques, car la bactérie E. Coli utilise aussi son flagelle pour naviguer. Des travaux ont été répertoriés faisant usage des bactéries E. Coli pour la propulsion d'un microrobot. Le fait que leur mobilité soit basée sur la chimiotaxis [BER72, FOR91 et ARM92] rend difficile le contrôle de leur déplacement, ce qui a inmanquablement pour effet de limiter leur champ d'application.

CHAPITRE 2

SYSTÈME D'ALIMENTATION POUR UN MICROROBOT SANS FIL OPÉRANT DANS UN MILIEU AQUEUX

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un sommaire sur l'état des avancées technologiques dans le domaine de la conception et de la fabrication des microrobots. Cela nous a permis de constater que la majorité des microrobots ne contient aucune intelligence et n'est dotée d'aucune autonomie. L'état des avancées technologiques nous a également permis de noter que la taille de ceux-ci peut varier de quelques centaines de micromètres à quelques dizaines de centimètres. Les microrobots recensés dont les dimensions sont de l'ordre de quelques centaines de micromètres sont, pour la plupart, des preuves de concept dont l'intégration complète en un système utilisable n'a pas encore été réalisée. Pour leur part, les microrobots dont les dimensions sont de l'ordre de quelques dizaines de centimètres requièrent beaucoup d'énergie. Par conséquent, ils ne peuvent être utilisés dans le domaine biomédical, là où il est nécessaire d'avoir des microrobots suffisamment petits pour être capables de voyager dans les endroits difficiles à atteindre particulièrement les vaisseaux sanguins.

Afin de pallier ce problème et après avoir passé en revue l'ensemble des systèmes d'alimentation disponibles, nous proposons l'utilisation, dans le présent chapitre, d'un système d'alimentation basé sur les cellules photovoltaïques pouvant être intégrées à notre microrobot et présentons une architecture permettant d'augmenter l'aire utile de ces cellules.

Pour ce faire, nous passerons en revue les principes de base sur le phénomène photovoltaïque pour ensuite présenter et discuter les simulations effectuées sur la cellule photovoltaïque, de même que les résultats expérimentaux obtenus.

2.1 Revue de littérature sur les systèmes d'alimentation

L'assemblage en un système fonctionnel des microrobots dont les dimensions sont de l'ordre de quelques centaines de micromètres est souvent confronté au problème de l'alimentation électrique. En effet, le système d'alimentation électrique constitue une contrainte majeure dans le processus de miniaturisation de microrobots autonomes sans fil, et ce, plus particulièrement pour ceux opérant dans un milieu aqueux.

Parmi les différentes sources d'alimentation pouvant être utilisées pour alimenter notre microrobot, citons l'alimentation par onde électromagnétique, l'alimentation par induction magnétique et l'utilisation d'une pile électrochimique.

2.1.1 Alimentation par onde électromagnétique

Les ondes électromagnétiques sont porteuses d'énergie qui peut être convertie en énergie électrique. La densité d'énergie emmagasinée dans une onde électromagnétique peut être obtenue à partir des équations de Maxwell et est donnée par la relation suivante :

$$\eta = \frac{\text{Energie}}{\text{Volume}} = \frac{\epsilon_r E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_r} \quad (2.1)$$

Où η est la densité d'énergie, μ_r est la perméabilité du milieu, B et E sont les champs magnétiques et électriques respectivement. Pour un champ électromagnétique, B est égal à E/c , où c est la vitesse de la lumière et est donnée par :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

En remplaçant B et c dans l'équation 2.1., nous obtenons la densité d'énergie par unité de volume dans un champ électromagnétique :

$$\eta = \epsilon_r E^2 \quad (2.2)$$

À titre d'exemple, mentionnons qu'une antenne en mode de réception convertit l'onde électromagnétique en courant électrique qui sera ensuite utilisée par un récepteur. Cette conversion d'énergie se produit lorsque l'onde électromagnétique a une longueur d'onde égale ou inférieure à la longueur de l'antenne. Cette onde électromagnétique occasionne le déplacement des électrons du métal, ce qui produit le courant électrique. Nous retrouvons ce mode de conversion d'énergie dans les systèmes *RFID* « *Radio Frequency Identification* ». En 2006, la compagnie Hitachi Ltd. a présenté une puce *RFID* appelée μ -chip mesurant $0.15 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ [HIT06]. En 2007, cette même compagnie a créé la plus petite puce *RFID* au monde ne mesurant que $0.05 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$ [HIT07]. Or, de tels dispositifs requièrent l'utilisation d'une antenne externe, laquelle est de 80 à 100 fois plus grande que la puce en question. Cela démontre que les

systèmes qui utilisent le *RFID* comme moyen de communication et comme source d'alimentation doivent disposer d'une taille suffisamment grande pour pouvoir y incorporer l'antenne nécessaire à son fonctionnement.

Cela étant, l'onde électromagnétique ne peut être utilisée comme source d'alimentation pour notre microrobot en raison de son infirme taille.

2.1.2 Alimentation par induction magnétique

Des chercheurs du Département de Microsystèmes et de Médecine Laser de l'Institut Fraunhofer en Allemagne ont proposé un concept pour la transmission de l'énergie par induction magnétique pour un microrobot sans fil [GAO05]. Ainsi, ils ont été en mesure de transmettre par induction magnétique une puissance maximale de 330 mW, les dimensions du récepteur étant de 11.5 mm × 11.5 mm × 4.0 mm.

Ce système d'alimentation par induction magnétique que l'on retrouve, par exemple, dans les transformateurs électriques, est une autre option envisageable pour des microrobots n'ayant pas des contraintes de taille. Le principe est illustré à la figure 2.1.

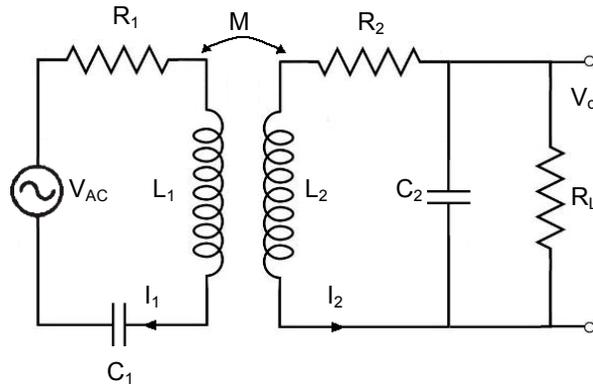


Figure 2.1 : schéma illustrant le principe de génération d'énergie par induction magnétique

Ce système d'alimentation fonctionne de la façon suivante : le champ magnétique qui varie à l'intérieur de la bobine secondaire induit une différence de potentiel aux extrémités de la bobine. Cette différence de potentiel peut être calculée en utilisant la loi de Faraday :

$$V = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

Où V est la tension instantanée aux bornes de la bobine secondaire, N est le nombre de tours de la bobine et Φ est le flux magnétique à travers un tour de la bobine. Si le flux à l'intérieur de la bobine est sinusoïdal, la force électromotrice universelle est donnée par :

$$E = \frac{2\pi f N A B}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

Dans l'équation 2.4, E la force électromotrice universelle (la tension RMS), f est la fréquence, N est le nombre de spires, A est l'aire de la coupe transversale et B est la valeur de crête de la densité du flux magnétique. Cette équation nous indique que la force électromotrice universelle est directement proportionnelle au nombre de tours de la bobine et à l'aire de la coupe transversale.

Ce type d'alimentation par induction magnétique ne peut être utilisé pour notre microrobot puisque, d'une part, la bobine de réception ne sera pas assez grande pour effectuer une conversion d'énergie efficace. D'autre part, la bobine réceptrice de notre microrobot, qui sera fabriquée avec la technologie $CMOS$, sera nécessairement planaire. Sa hauteur, déterminée par le nombre de couches disponibles pour la technologie $CMOS$ $0.18 \mu m$, ce qui limite le nombre de spires, alors les contraintes de taille du microrobot limitent l'aire de la coupe transversale, laquelle est directement proportionnelle à la tension RMS (E).

D'autres systèmes d'alimentation, en plus de ceux présentés ci-dessus, pourraient être considérés pour notre microrobot. Il s'agit, notamment, de l'alimentation par une ou des piles électrochimiques [XUE93], par des cellules de carburant [PAR00, CHA03, ALL93] et par un système d'alimentation par microondes.

Notons que l'alimentation par une ou des piles électrochimiques ou par des cellules de carburant « Fuel Cell » ne peut être utilisée comme source d'alimentation pour notre microrobot, puisque la taille des piles, qui est égale ou supérieure à un

millimètre de côté, est trois fois plus grande que celle du microrobot. Il en est de même pour l'alimentation par micro-ondes [SHI98]. Ce type d'alimentation présente toutefois des risques pour la santé si les micro-ondes ne sont pas limitées dans un espace. De plus, ce type d'alimentation requiert généralement beaucoup d'espace.

Dans la prochaine section, nous abordons les systèmes d'alimentation par effet photovoltaïque, sur lesquels nous avons arrêté notre choix pour alimenter notre microrobot.

2.1.3 Source d'alimentation par effet photovoltaïque

Ce survol des différentes sources d'alimentation ci-dessus présentées nous permet de constater qu'aucune source d'alimentation suffisamment énergétique ne peut être intégrée dans un microrobot dont les côtés mesurent quelques centaines de micromètres. Par conséquent, nous proposons l'utilisation du système d'alimentation basé sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire un système qui convertit l'énergie photonique en énergie électrique. En effet, ce type de système peut être intégré à notre microrobot puisque nous pouvons le fabriquer en utilisant le procédé standard de fabrication des circuits microélectroniques [PAT05].

Ces sources d'alimentation utilisent des cellules photovoltaïques qui permettent de fournir une puissance électrique stable pour alimenter notre microrobot. Plusieurs technologies permettent de fabriquer de telles cellules. En ce qui nous concerne, nous avons choisi de nous concentrer sur la technologie *CMOS* pour fabriquer nos cellules

photovoltaïques afin de faciliter leur intégration dans notre circuit. Notons que de nombreux travaux sont effectués dans le domaine de la fabrication des cellules photovoltaïques à base de la technologie *CMOS*.

À ce sujet, une méthode d'alimentation des circuits *CMOS LSI (Large Scale Integrated Circuits)* a été proposée par des chercheurs de l'Institut de Technologie Kuyushu « *Center for Microelectronic System, Kyushu Institute of Technology* » au Japon [ARI06]. Ces chercheurs proposent une structure pour un système d'alimentation intégré sur puce visant à alimenter les circuits numériques *CMOS*. Ce système d'alimentation a été utilisé pour fabriquer une batterie composée de cellules solaires sans modifier le procédé standard de fabrication des circuits intégrés. Ainsi, ils ont fabriqué deux types de photodiodes directement à partir des sources et des drains d'un transistor *MOSFET*, du *N-Well* et du substrat *P*. La première jonction *PN* est formée de *N-Well / P+* et la seconde est la jonction *P-Sub / N+*. Une couche de métal est prévue pour bloquer l'incidence du faisceau lumineux sur le reste du circuit. Les deux photodiodes fabriquées pilotent un additionneur complet « *Full Adder* » et un compteur de 7 bits. La batterie ainsi fabriquée mesure $200 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ et peut générer une tension de sortie en circuit ouvert qui varie entre 0.6 V et 0.83 V et un courant en court-circuit de $0.45 \mu\text{A}$, et ce, sous une illumination de 10000 lx seulement [ARI06]. L'aire de la batterie solaire pour alimenter leur circuit *CMOS* est de $6.1 \text{ mm}^2/\mu\text{W}$ pour une puissance optique incidente de 2000 lx et de $1.15 \text{ mm}^2/\mu\text{W}$ pour une puissance optique de 10000 lx. Comme le prévoit la théorie sur les cellules photovoltaïques, nous remarquons que la

puissance fournie par la cellule est linéairement proportionnelle à la puissance optique incidente, ce qui est confirmé avec le résultat des tests. Nous observons qu'en augmentant de 5 fois la valeur de la puissance optique incidente, cela permet de diminuer de 5 fois l'aire requise de la cellule par micro watt.

Bien que les résultats de ces travaux soient très prometteurs pour la conception des circuits *CMOS* autoalimentés, l'efficacité de 2.6 % de la cellule fabriquée pourrait être améliorée. En plus de changer la couche de passivation, ce qui est proposé par les auteurs des travaux, nous suggérons d'optimiser l'aire utile de la cellule.

D'autres travaux se sont poursuivis dans la conception des cellules photovoltaïques à base de *CMOS*. Un récepteur optique à très haute vitesse a été conçu et fabriqué. Ce circuit consiste en une photodiode *CMOS* intégrée, un amplificateur de transimpédance, un mixeur et un amplificateur *IF* « *Intermediary Frequency* » [MEN07]. Cette photodiode intégrée a été fabriquée avec le procédé *CMOS* conventionnel, mesure $41 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$ et opère à une vitesse de 4.9 GHz. Dans ces travaux, plusieurs types de jonctions ont été fabriquées et testées, dont les jonctions *N-Well / P-Sub* et *P+ / N-Well*. Pour des tensions de polarisation inverse appliquées à la photodiode, ils ont mesuré le courant fourni par celle-ci en fonction de la puissance optique incidente. Les valeurs du courant fourni par la cellule variaient de $2 \mu\text{A}$ à $16 \mu\text{A}$ pour une puissance optique qui variait de 0 à 10000 lx. La puissance de ces cellules est brièvement mentionnée – puisque ces cellules photovoltaïques sont utilisées comme des détecteurs et non comme des générateurs de puissance.

Les travaux de Radovanovic témoignent du souci d'améliorer les performances des cellules photovoltaïques sans modifier le procédé de fabrication par la proposition d'une nouvelle architecture de photodiode. Dans cette architecture, un ensemble de photodiodes latérales sont branchées en parallèle afin d'extraire le courant photonique [RAD03].

Notre revue de littérature nous a démontré qu'il existe très peu d'utilisation des cellules photovoltaïques fabriquées à base de la technologie *CMOS* comme source d'alimentation intégrée à un circuit ou à un microrobot. Ceci résulte des contraintes d'espace des puces microélectroniques. L'une des options qui permettraient d'augmenter le rendement de ces cellules sans modifier le procédé standard de fabrication des circuits *CMOS* serait d'augmenter leur aire utile afin de pouvoir les utiliser comme des générateurs de puissance.

Puisque la puissance fournie par ce type d'alimentation dépend notamment de l'aire utile de la cellule, nous présentons, dans ce chapitre, une architecture permettant d'augmenter l'aire utile – et, par le fait même, le courant photonique – d'une cellule photovoltaïque fabriquée avec la technologie *CMOS* 0.18 μm . Les résultats expérimentaux que nous avons obtenus confirment que l'architecture proposée dans le cadre de cette thèse a effectivement augmenté le courant photonique produit par la cellule.

2.2 Principes de base sur les phénomènes photovoltaïques

Les propriétés chimiques du silicium font de ce métal un excellent matériau pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Or, le silicium est un pauvre conducteur d'électricité à l'état pur, ses électrons étant emprisonnés dans la structure cristalline. C'est pourquoi des impuretés lui sont ajoutées afin d'augmenter sa conductivité électrique.

Lorsque le silicium pur est soumis à une excitation d'origine thermique, certains de ses électrons se libèrent de leurs liaisons et laissent leurs atomes. Ces électrons devenus libres, appelés des porteurs libres, sont responsables du transport du courant électrique. Cependant, ce courant électrique est négligeable, puisque les porteurs libres sont peu nombreux comparativement à ceux retrouvés dans le silicium dopé. Les équations suivantes nous permettent de déterminer le courant électrique dans un semi-conducteur (silicium) dopé N et P :

$$\vec{j}_n = q\mu_n n \vec{F} + qD_n \nabla n \quad (2.5)$$

$$\vec{j}_p = q\mu_p p \vec{F} + qD_p \nabla p \quad (2.6)$$

Où q est la charge électronique, μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous, D_n et D_p sont les constantes de diffusion dans les semi-conducteurs dopés N et P respectivement. Lorsque les semi-conducteurs du type P et N sont mis en contact, un champ électrique est créé. Ainsi, les électrons en excès dans la partie N vont occuper les

trous en excès dans la partie P , et vice-versa, ce qui créera une zone de déplétion dans les deux côtés de la jonction, tel qu'indiqué à la figure 2.2. Cette zone de déplétion constitue une barrière de potentiel qui tend à empêcher un électron dans le silicium dopé N de traverser vers le côté du type P .

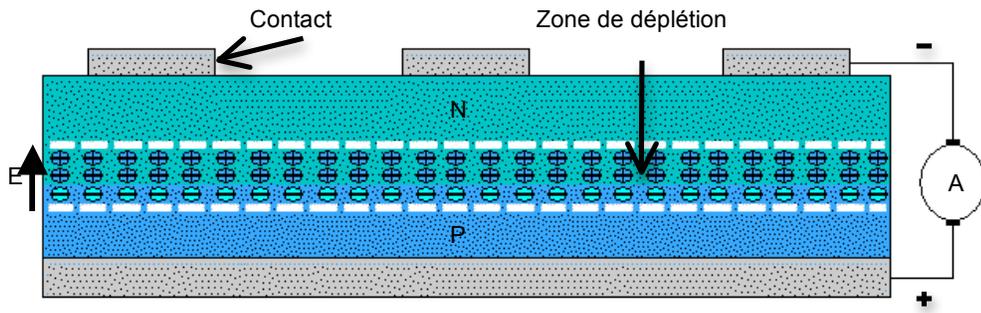


Figure 2.2 : section d'une cellule photovoltaïque

Ainsi, les porteurs minoritaires entourant la zone de déplétion forment un champ électrique qui permet une circulation à sens unique des électrons du côté P vers le côté N . La largeur de cette zone de déplétion ($w_{dep(n,p)} = w_n + w_p$) est donnée par :

$$W_{dep(n,p)} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0} \quad (2.7)$$

Dans l'équation 2.6, w_n et w_p sont la largeur des zones de déplétion dans les semi-conducteurs N et P . La valeur de ce champ électrique, appelé barrière de potentiel (*Built-in Voltage potential*), est donnée par la relation suivante [SED04]:

$$\phi_b = \frac{qN_0L_d^2}{2\epsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{w^2}{L_d^2}\right) \right] \quad (2.8)$$

Dans l'équation 2.8, N_0 est la concentration de surface et L_d est la longueur de diffusion et est donnée par :

$$L_{n,p} = \sqrt{\tau_{n,p} \mu_{n,p} V_T} \quad (2.9)$$

Où $L_{n,p}$ est la longueur de diffusion dans les semi-conducteurs de types N et de respectivement, $\tau_{n,p}$ est la durée de vie des porteurs minoritaires et vaut 50 ps pour la technologie *CMOS* 0.18 μm [RAD03], V_T est la tension thermique et $\mu_{n,p}$ est la mobilité des électrons et des trous. Les valeurs respectives de μ_n et μ_p sont de 411.01 $\text{cm}^2/\text{V.s}$ et 87.57 $\text{cm}^2/\text{V.s}$ [MOS08]. Ainsi, les variables L_n et L_p sont estimées à 0.25 μm et 0.19 μm respectivement. Les paires d'électrons/trous qui se trouvent hors de la zone de diffusion ne contribuent pas au flux externe du courant photonique puisqu'ils se recombinent dans les semi-conducteurs.

Les trois composants du courant photonique sont le courant de dérive (I_{drift}) et les courants de diffusion dans les semi-conducteurs des types N et P (I_{diffn} et I_{diffp} respectivement), tels qu'illustrés par les équations 2.10 et 2.11 :

$$I = I_{diffn} + I_{diffp} + I_{drift} \quad (2.10)$$

$$I = qGA(L_n + L_p + W_{dep}) \quad (2.11)$$

Le courant de dérive est donné par pour une cellule photovoltaïque avec des jonctions *PN* latérales [RAD06]:

$$J_{dep} = \Phi e \left(\left[e^{-\alpha L_x} - e^{-\alpha(L_x+d)} \right] \frac{A_{total}}{A_{efflat}} + \left[1 - \alpha L_x - e^{-\alpha(L_x)} \right] \frac{A_{total}}{A_{effver}} \right) \quad (2.12)$$

Dans l'équation 2.12, A_{efflat} et A_{effver} sont les aires effectives des zones de déplétion horizontale et verticale respectivement.

Dans l'équation 2.11, q est la charge électronique, A est l'aire de la surface utile de la cellule photovoltaïque ($200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$) et G est le taux de génération des paires d'électrons/trous donné par :

$$G_0(z) = \alpha_0 \frac{I_{opt}(0)}{h\nu} \exp[-\alpha_0 z] \quad (2.13)$$

Dans cette équation, $h\nu$ est l'énergie photonique, $I_{opt}(0)$ est l'intensité optique à la surface de la cellule, z est la distance de pénétration et α_0 est la profondeur de la pénétration optique.

Nous avons utilisé le logiciel CADENCE *Layout Virtuoso* pour concevoir et simuler la cellule photovoltaïque. Nous avons d'abord dessiné les couches de la cellule, pour ensuite extraire les composants qui sont sauvegardés dans un fichier *HSPICE*. Celui-ci a été modifié pour tenir compte des résistances de shunt et de série de la cellule

photovoltaïque qui sont symbolisées par R_{sh} et R_s respectivement, avant d'être utilisé pour simuler la cellule. Le circuit présenté à la figure 2.1 modélise la cellule photovoltaïque simulée dans CADENCE.

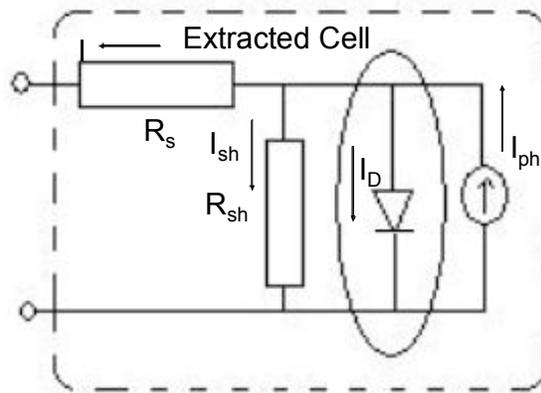


Figure 2.3 : circuit modélisant la cellule photovoltaïque dans CADENCE en vue de la simulation

Le courant total fourni par la cellule est exprimé par :

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{(V + IR_s)}{nV_T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.12)$$

Où V est la tension en circuit ouvert de la cellule, I_s est le courant de saturation de la photocellule, V_T est la tension thermique et n est une constante qui dépend de la structure de la jonction PN .

Nous avons, ci-dessus, présenté la théorie de base sur les cellules photovoltaïques. La prochaine section sera réservée à la présentation des résultats expérimentaux sur la nouvelle architecture de la cellule photovoltaïque fabriquée. Ces résultats ont été publiés

dans la revue « Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (*IEICE*) » (Voir Annexe A).

2.3 Synthèse

L'utilisation de la technologie *CMOS* standard pour la fabrication des sources d'alimentation intégrées sur puce (cellule photovoltaïque) est de plus en plus fréquente. Plusieurs raisons expliquent cet engouement, dont la principale est la possibilité d'atteindre un haut degré de miniaturisation. C'est pourquoi nous y avons eu recours dans le cadre de cette thèse. Or, malgré le fait que l'utilisation des cellules photovoltaïques s'avère être la meilleure option en ce qui nous concerne, nous sommes conscients que le problème d'efficacité de la cellule demeure. Notons que le dopage utilisé dans le procédé de fabrication *CMOS* est avant tout calculé et caractérisé pour les circuits microélectroniques, ce qui affectera la création des paires d'électrons/trous due à l'irradiation. Ainsi, le seul moyen dont nous disposions pour accroître l'efficacité de notre cellule photovoltaïque, en plus du post-traitement, était d'augmenter l'aire de sa surface utile. Les résultats de nos diverses expérimentations démontrent que la solution proposée dans notre article présenté ci-dessus visant à augmenter l'aire utile de notre cellule était pertinente et qu'elle nous a permis de consolider notre position quant au choix de l'utilisation de l'alimentation par voie photovoltaïque pour notre microrobot.

CHAPITRE 3

CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE COMMUNICATION POUR UN MICROROBOT MESURANT $300\ \mu\text{M} \times 300\ \mu\text{M} \times 260\ \mu\text{M}$

Dans le chapitre précédent, nous avons exposé les raisons pour lesquelles nous avons choisi d'utiliser les cellules photovoltaïques comme source d'alimentation électrique de notre microrobot. Nous avons également proposé une architecture qui permet d'augmenter l'aire utile d'une cellule photovoltaïque planaire afin d'accroître la puissance fournie. Les résultats expérimentaux obtenus ont justifié le choix du système d'alimentation utilisé pour alimenter notre microrobot.

Le système d'alimentation de notre microrobot étant fabriqué et testé, cela nous permettait d'entreprendre l'étape de la conception du circuit microélectronique du microrobot. Il n'existe actuellement aucun système de communication intégré à un microsystème de la taille de notre microrobot, soit $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m} \times 260\ \mu\text{m}$. Ainsi, dans ce chapitre, nous présentons le circuit autoalimenté que nous avons conçu.

3.1 Motivations

Le développement fulgurant des technologies et des procédés de fabrication des circuits *VLSI* permet de concevoir des systèmes de plus en plus petits [HIR02, IWA04]. En effet, il est aujourd'hui possible, avec la technologie *CMOS*, de fabriquer un transistor avec une longueur de canal mesurant 45 nm.

Les circuits *VLSI* sont largement profitables aux applications requérant un haut degré de miniaturisation. Les procédés de fabrication de tels circuits sont standardisés et les composants analogiques et numériques peuvent être combinés sur une même plaquette de silicium grâce à la méthodologie des systèmes intégrés sur puce « *Systems on Chip (SoC)* » [TAR05] utilisée, entre autres, pour concevoir des circuits destinés au domaine biomédical.

En outre, la miniaturisation des circuits *VLSI* permet de diminuer le besoin en énergie de ces circuits. Or, les travaux recensés sur les microrobots permettent de constater que les progrès réalisés dans le domaine de la microfabrication n'ont pas profité à ces derniers, leur volume étant de l'ordre du cm^3 .

Dans cette thèse, nous utilisons la méthodologie des systèmes intégrés sur puce (*SoC*) pour concevoir le circuit interne d'un microrobot qui tient compte de ses petites dimensions. Ce circuit, jumelé à un *ISFET* « Ion Sensitive Field Effect Transistor » [KAL07] permet d'établir la communication avec l'environnement externe.

La plupart des microrobots autonomes disposent d'un récepteur et d'un émetteur *RF* comme système de télécommunication. Ce système de télécommunication dissipe beaucoup d'énergie en raison de la taille microscopique de l'antenne qui nécessite une fréquence élevée lors de la transmission et de la réception. Au système de télécommunication par radiofréquence s'ajoute la télécommunication par infrarouge,

comme le TIR2000 de Texas Instruments, un contrôleur infrarouge sériel opérant à 48 MHz [TEX05] dont l'énergie dissipée est de l'ordre du milliwatt.

En ce qui nous concerne, le microrobot fabriqué mesure $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m} \times 260\ \mu\text{m}$ et il dispose d'un minimum de composants électroniques. Il s'agit d'un microrobot sans fil qui emmagasine l'énergie lumineuse pour la convertir en énergie électrique. En raison de ses minuscules dimensions, le module photovoltaïque intégré à notre microrobot ne peut produire suffisamment de puissance pour nous permettre d'utiliser la communication par radio fréquence ou par infrarouge. À titre d'exemple, le microrobot ALICE de UC Berkeley, dont le volume de $5.3\ \text{cm}^3$, consomme jusqu'à 10 mW en utilisant la communication par radiofréquence [CAP03]. Une telle puissance ne peut être obtenue par le module photovoltaïque utilisé pour alimenter notre microrobot. Ainsi, puisqu'il n'existe aucun système de communication adéquat pour un microrobot à l'échelle micrométrique, nous proposons un système de télécommunication basé sur la génération d'impulsions magnétiques. Nous présenterons dans les prochaines sections l'architecture du circuit proposée, pour ensuite discuter des limites de conception et de fabrication des cellules photovoltaïques de la technologie *CMOS* utilisée dans le cadre de cette thèse.

3.2 Limites de la technologie

Nous mentionnions, ci-dessus, avoir opté pour les cellules photovoltaïques comme source d'alimentation de notre microrobot. Or, la technologie *CMOS* utilisée permet uniquement la fabrication de cellules photovoltaïques planaires. En effet, les

cellules photovoltaïques de type $P-I-N$ « P -Intrinsic- N », ainsi que celles à cavité résonnante, qui sont très efficaces, ne peuvent pas être fabriquées avec le procédé de fabrication standard des circuits intégrés à base de $CMOS$. Pour leur part, les cellules photovoltaïques planaires, pour être efficaces, requièrent une très grande surface. Par conséquent, il était impossible d'intégrer ce type de cellule dans notre microrobot. C'est pourquoi nous avons présenté, dans le chapitre 2, une architecture pour augmenter l'aire utile d'une cellule photovoltaïque planaire afin de pouvoir être en mesure de l'intégrer à notre microrobot. Cette augmentation du rendement ne permettait cependant pas d'alimenter tous les transistors du circuit. Pour pallier ce problème de puissance, nous proposons une architecture qui permettra d'utiliser un ensemble de photodiodes pour alimenter les composants électroniques du microrobot, que nous décrivons à la section suivante.

3.3 Modèle de conception

Le circuit de notre microrobot a été fabriqué avec la technologie $CMOS$ $0.13\ \mu\text{m}$. Le diagramme conceptuel est présenté dans la figure 3.2 dans lequel on distingue un module photovoltaïque représenté par une photodiode (PV) pour produire le courant minimum dans une inductance (L) en vue de générer un champ magnétique. Nous distinguons également une résistance de charge (R) et un interrupteur S pour échantillonner le signal du champ magnétique en des impulsions dont la fréquence varie en fonction de la concentration ionique du médium dans lequel évolue le microrobot (figure 3.1)

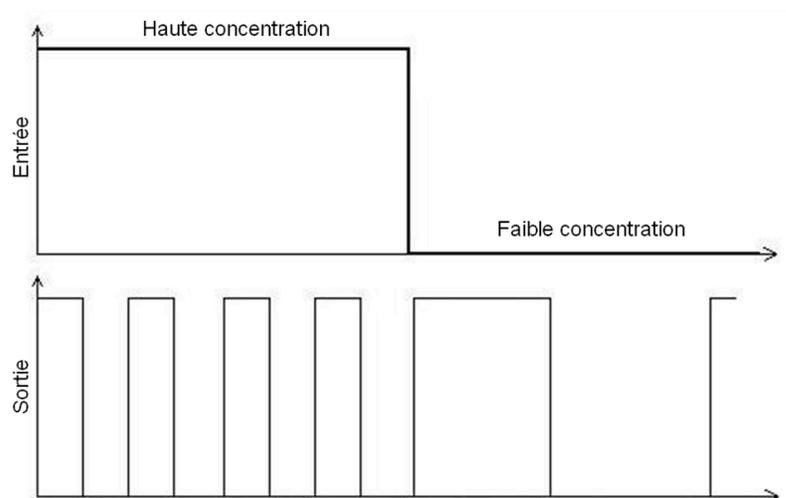


Figure 3.1 : diagramme temporel montrant la modulation de fréquence du capteur en fonction du niveau de la concentration ionique du milieu

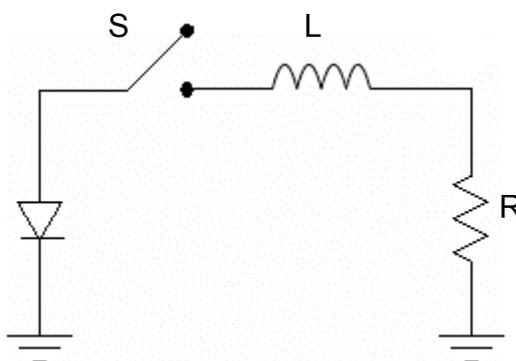


Figure 3.2: modèle de conception du circuit de génération d'impulsions magnétiques

Le fonctionnement du circuit se résume ainsi : l'interrupteur S est maintenu en position ouverte, comme il est présenté à la figure 3.2 À cet instant, nous considérons que la photodiode est branchée à une charge d'impédance infinie, ce qui implique la conservation du courant électrique puisqu'aucun électron ne quitte la photodiode. En

d'autres termes, la charge emmagasinée par la photodiode par effet photovoltaïque est conservée. En détectant une variation du niveau de la concentration ionique, le système l'interrupteur S pour moduler la fréquence du courant de sortie. Lorsque l'interrupteur S se place en position fermée, la cellule photovoltaïque commence à se décharger, en considérant que la résistance de charge R est très faible, la photodiode est branchée à une charge négligeable. Par conséquent, le courant qui circule dans l'inductance a une valeur de $10 \mu\text{A}$, alors que la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque tend vers zéro. Cette tension nulle causera la réouverture de l'interrupteur S . À ce moment, nous retournons dans le cas initial où la photodiode était branchée à une charge infinie. Ce processus continue de manière périodique, seule la fréquence du courant de sortie étant sujette à variation. Le tableau 3.1 ci-dessous résume cette opération :

Tableau 3.1: résumé de l'opération

S	Photodiode
0	Charge
1	Décharge

À l'aide d'un modèle plus complexe que nous présenterons ci-dessous, nous verrons avec plus de précision la façon dont sont générées les impulsions magnétiques qui seront utilisées comme moyen de communication de notre microrobot avec le monde extérieur. Ces impulsions magnétiques se présenteront sous forme de messages codés qui seront interprétés par un ordinateur externe. En raison des contraintes liées à la taille

de notre microrobot, le besoin en énergie pour le faire fonctionner doit être minimal, d'où la nécessité d'une architecture capable d'exploiter l'énergie minimale récoltée à partir des cellules photovoltaïques qui y sont intégrées.

De récents travaux ont permis de démontrer qu'il est possible de fabriquer des circuits autoalimentés [WAN05]. À titre d'exemple, un inverseur a été fabriqué à l'aide d'un transistor *NMOS* dont le drain et la source étaient reliés à l'anode et à la cathode d'une photodiode, tel que présenté à la figure 3.3. Cet exemple nous démontre que lorsque la tension d'entrée est suffisamment élevée pour allumer le *NMOS*, ce dernier décharge la photodiode occasionnant une chute de la tension de sortie à zéro. Ce fait s'explique par la caractéristique du courant/tension (I/V) d'une cellule photovoltaïque : la tension de sortie est à zéro lorsque la résistance de charge est négligeable. Dans la figure 3.2, le *NMOS* représente la charge.

À l'inverse, lorsque la tension de la grille du transistor est à zéro, la résistance de ce dernier est de l'ordre du giga Ohms en *CMOS* 0.18 μm . Cela étant, aucun courant ne peut circuler du drain à la source du transistor. À ce moment, la photodiode se charge et la tension de sortie s'élève.

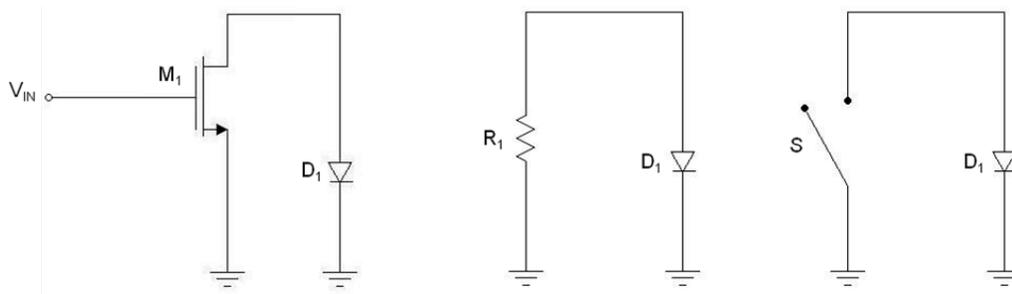


Figure 3.3 : conception d'un inverseur en utilisant une cellule photovoltaïque [WAN05]

Avant de présenter le circuit final, nous expliquerons le fonctionnement de chacun de ses composants. La figure 3.4 présente le fonctionnement de base du circuit interne du microrobot qui établit la communication avec l'ordinateur externe et la figure 3.6 montre la coupe transversale de ce circuit. Le circuit utilise trois photodiodes, soit D_1 à D_3 , pour alimenter et activer les transistors dans le circuit. La photodiode D_2 est constituée de trois photodiodes connectées en série pour produire une tension de sortie de 1.2 V qui représente la tension limite permise sur la grille du transistor *NMOS* pour la technologie *CMOS* 0.13 μm . Quant à la photodiode D_1 , elle présente une tension de 0.5 V à ses bornes. Enfin, la photodiode D_3 est conçue pour fournir une tension ouverte de 1.2 V et un courant de court-circuit de 10 μA . Lorsque le transistor M_1 est allumé, la photodiode D_1 se décharge via le drain du transistor M_1 à la masse. Dans le cas où la tension de sortie de la photodiode D_1 atteint 0 V, le circuit résultant est présenté à la figure 3.5. Le transistor PMOS M_2 conduit et décharge la photodiode D_3 , en assumant que le transistor M_3 est allumé. Ainsi, le courant de la photodiode D_3 traverse l'inductance L , ce qui produit une impulsion magnétique.

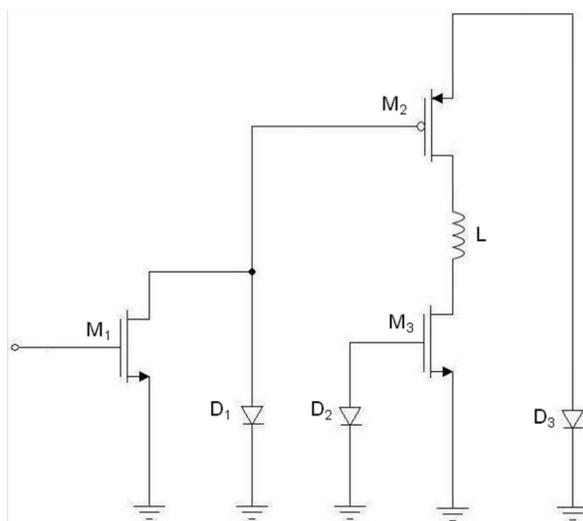


Figure 3.4 circuit de base pour la génération d'impulsions magnétiques

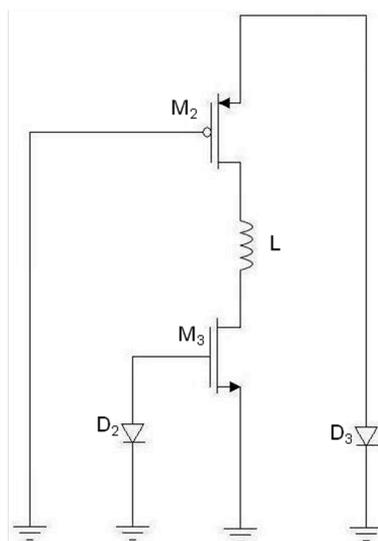


Figure 3.5 : circuit réduit résultant de la décharge de la photodiode D_3

Ci-dessous est présenté le layout du circuit de la figure 3.4

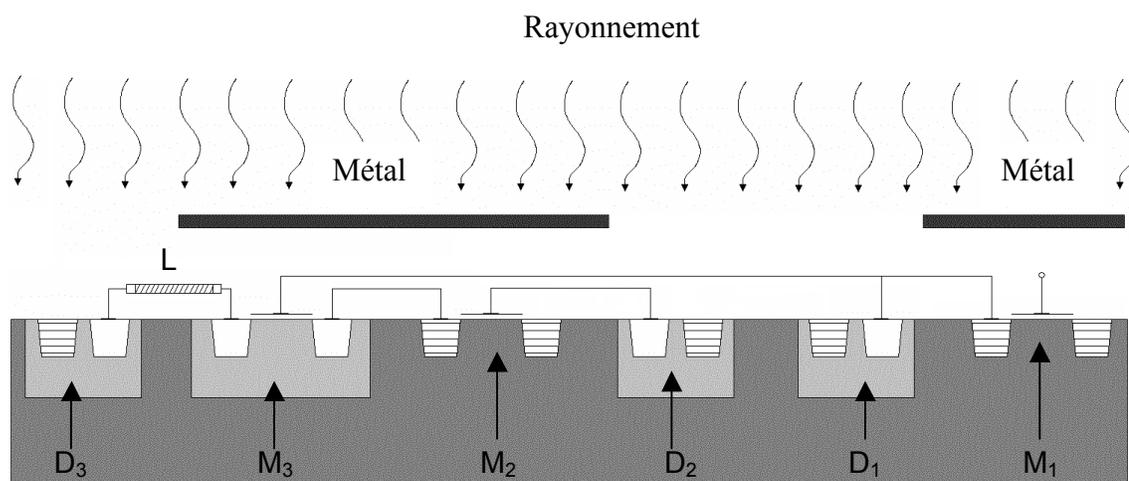


Figure 3.6 : vue de coupe du layout du circuit de la figure 3.3 (a)

Avant d'entreprendre l'explication du circuit final, nous allons présenter la variante de la cellule photovoltaïque fabriquée avec la technologie *CMOS* 0.13 μm , qui a précédemment été fabriquée en *CMOS* 0.18 μm . Les paramètres, comme la concentration des dopants, la mobilité des électrons et des trous, ainsi que leur durée de vie, varient d'une technologie à l'autre. Par conséquent, des modifications sont nécessaires à l'architecture de la cellule fabriquée avec la technologie *CMOS* 0.13 μm , modifications qui seront précisées à la section suivante.

3.4 Fabrication d'une cellule photovoltaïque avec la technologie CMOS 0.13 μm

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, la conception d'une cellule photovoltaïque dépend de certains paramètres propres à la technologie utilisée. Ces paramètres mentionnés ci-dessus ne sont certes pas les seuls qui méritent d'être considérés. Cependant, ce sont les plus importants lorsqu'un changement de technologie s'opère pour une même architecture de photodiode.

Le fait de ne disposer que d'une petite surface pour fabriquer le microrobot nous ne procure qu'un faible espace alloué au module photovoltaïque, ce qui affectera l'efficacité de ce dernier, qui ne pourra pas fournir la puissance nécessaire pour alimenter le circuit. Ainsi, en diminuant la taille de la technologie, nous avons, par la même occasion, réduit la demande énergétique.

En effet, les raisons pour lesquelles nous avons décidé d'opter pour une taille de technologie plus petite pour la conception du circuit de contrôle du microrobot sont nombreuses, la principale étant la demande énergétique.

En ce qui concerne la conception même de la photodiode, nous avons réutilisé l'architecture de celle présentée au chapitre 2, en tenant compte des nouveaux paramètres correspondant à la technologie *CMOS* 0.13 μm . Considérant que la concentration du dopant est inversement proportionnelle avec la taille de la technologie

utilisée, ceci compense l'effet de la réduction de l'échelle, et ce, plus particulièrement en rapport avec les caractéristiques des transistors.

Le recours à la technologie *CMOS* de $0.13\ \mu\text{m}$ pour fabriquer la cellule photovoltaïque nous permet, d'une part, de réduire la distance de séparation entre les couches P^+ et N^+ (figures 3.7 et 3.8). D'autre part, cette technologie permet de diminuer la largeur des métaux de contact qui emmagasinent le courant photonique produit par la cellule, la largeur minimale des métaux étant inférieure à celle permise avec une technologie supérieure à $0.13\ \mu\text{m}$. Ainsi, le fait d'avoir une largeur de métal plus petite augmente l'aire utile de la cellule photovoltaïque.

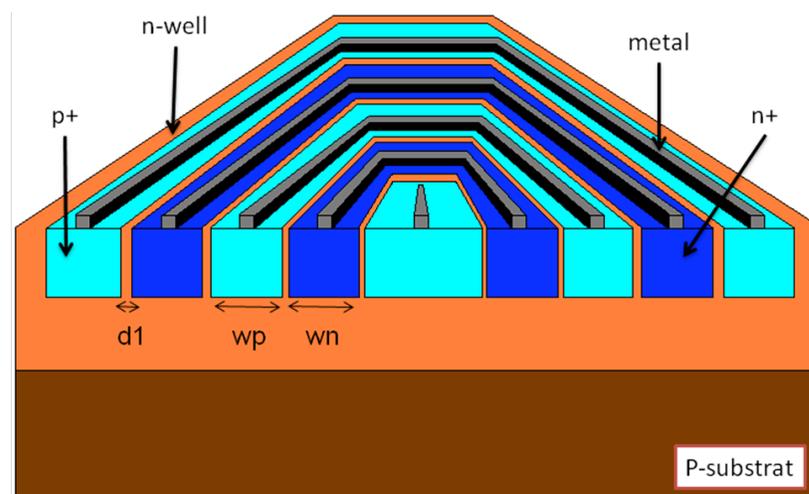


Figure 3.7 : vue de coupe de la photodiode

Avec la technologie *CMOS* 0.18 μm pour les métaux des couches 1 et 2, la largeur minimale permise est de 0.23 μm et de 0.5 μm respectivement, tandis que pour la technologie *CMOS* 0.13 μm la largeur respective des métaux des couches 1 et 2 est de 0.10 μm et 0.18 μm .

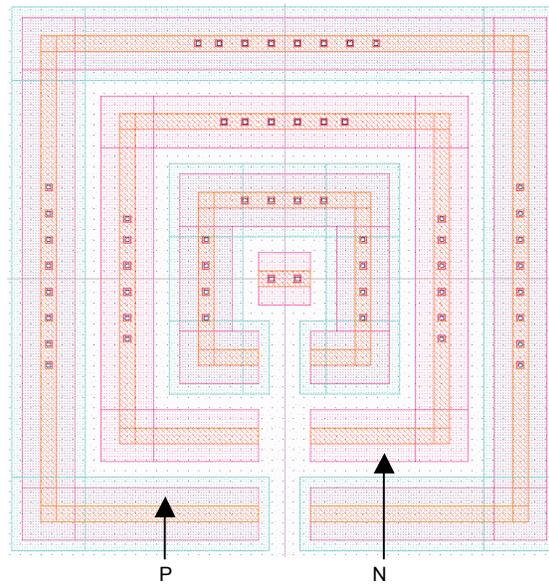


Figure 3.8 : image de la photodiode dans CADENCE

La valeur de la concentration des dopants est une donnée interne de la fonderie. Or, puisque la connaissance de cette valeur est essentielle pour pouvoir prédire le courant photonique produit par la cellule photovoltaïque, nous devons l'estimer. Pour ce faire, nous utilisons les valeurs de la résistivité du substrat et de la mobilité des électrons et des trous données par le fabricant ou la fonderie. À partir de la valeur de la résistivité du substrat, nous avons déterminé les concentrations des électrons dans le substrat

($NSUB = 1.5 \times 10^{16}$ atomes/cm³) [RIC02]. Cette estimation est sensiblement égale à celle donnée par le modèle de UC Berkeley *BSIM4.0* ($NSUB = 6 \times 10^{16}$ atomes/cm³) [BSI01].

Les données sur la mobilité des électrons et des trous permettent de calculer les concentrations des électrons NA et des trous ND dans les semi-conducteurs des types N et P respectivement, ainsi que les constantes de diffusion dans les couches N et P . Pour la technologie *CMOS* 0.13 μm , les valeurs transmises par la fonderie pour la mobilité des électrons et des trous sont 523.93 cm²/Vs et 87.4 cm²/Vs respectivement [MOS08]. Pour estimer les valeurs des concentrations NA et ND nous avons utilisé l'équation 3.1 [PIP03].

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(N / N_{\text{ref}}\right)^{\alpha}} \quad (3.1)$$

Dans l'équation 3.1, μ est la mobilité qui dépend de la concentration des électrons ou des trous, μ_{\max} est la mobilité maximale dans le silicium sans dopage, μ_{\min} est la mobilité minimale pour des densités d'impureté élevées, N est la concentration du dopant. N et α sont des valeurs extraites [CAU67]. Les valeurs des constantes de diffusion sont données par :

$$D_n \approx \mu_n \frac{K_B T}{q} \quad (3.2)$$

et

$$D_p \approx \mu_p \frac{K_B T}{q} \quad (3.3)$$

Où K_B est la constante de Boltzmann, T la température et q la charge électronique. μ_n et μ_p sont respectivement la mobilité des électrons et des trous.

La durée de vie des porteurs minoritaires dépend non seulement du niveau des impuretés, mais également des recombinaisons de surface, telles que le démontrent les équations 3.4 et 3.5 [GOE98].

$$\tau_n^{SRH} = \frac{1}{N_t \times \sigma_n \times v_{th}} \quad (3.4)$$

$$\tau_p^{SRH} = \frac{1}{N_t \times \sigma_p \times v_{th}} \quad (3.5)$$

Où N_t est le nombre d'électrons piégés (« *trap electron* »), σ_n et σ_p sont les conductivités dans les semi-conducteurs de type N et P respectivement, v_{th} est la vitesse thermique. Les équations 3.4 à 3.5 peuvent aussi s'exprimer ainsi [CAU67].

$$\tau_n^{SRH} = \frac{1}{c_n N_t} \quad (3.6)$$

$$\tau_p^{SRH} = \frac{1}{c_p N_t} \quad (3.7)$$

Où c_n et c_p sont des coefficients de capture.

Les valeurs de la durée de vie des électrons et des trous dépendent, entre autres, des recombinaisons de surface. Ces données peuvent varier d'une fonderie à une autre. Si nous considérons tous les mécanismes de recombinaisons possibles, comme les recombinaisons de surface (*SRH*) et les recombinaisons d'Auger, nous obtenons les relations suivantes pour le temps de diffusion dans les semi-conducteurs *N* et *P* [PIP03] :

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_n^{SRH}} + \frac{1}{\tau_n^{Aug}} + \frac{1}{\tau_n^{spon}} + \frac{1}{\tau_n^{Stim}} \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\tau_p^{SRH}} + \frac{1}{\tau_p^{Aug}} + \frac{1}{\tau_p^{spon}} + \frac{1}{\tau_p^{Stim}} \quad (3.9)$$

La connaissance de ces données est obligatoire pour pouvoir modéliser la cellule photovoltaïque. Ainsi, le logiciel MATLAB a été utilisé pour modéliser (ANNEXE A) et caractériser notre cellule photovoltaïque dont nous présentons dès à présent le résultat des simulations effectuées.

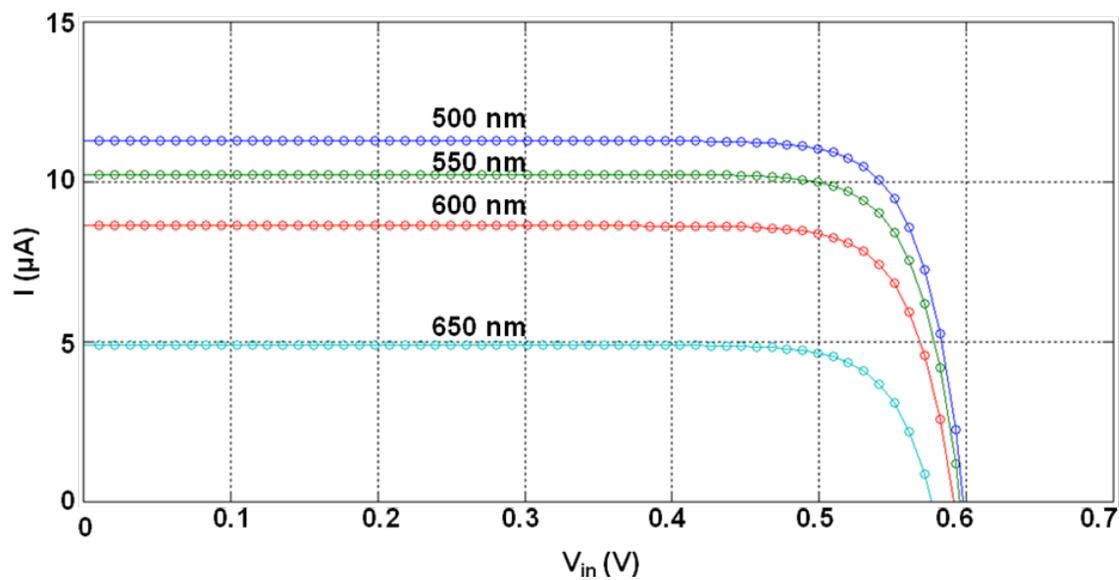


Figure 3.9 : Caractéristique I/V pour des longueurs d'onde comprises entre 500 et 650 nm ($250 \text{ mW} / \text{cm}^2$)

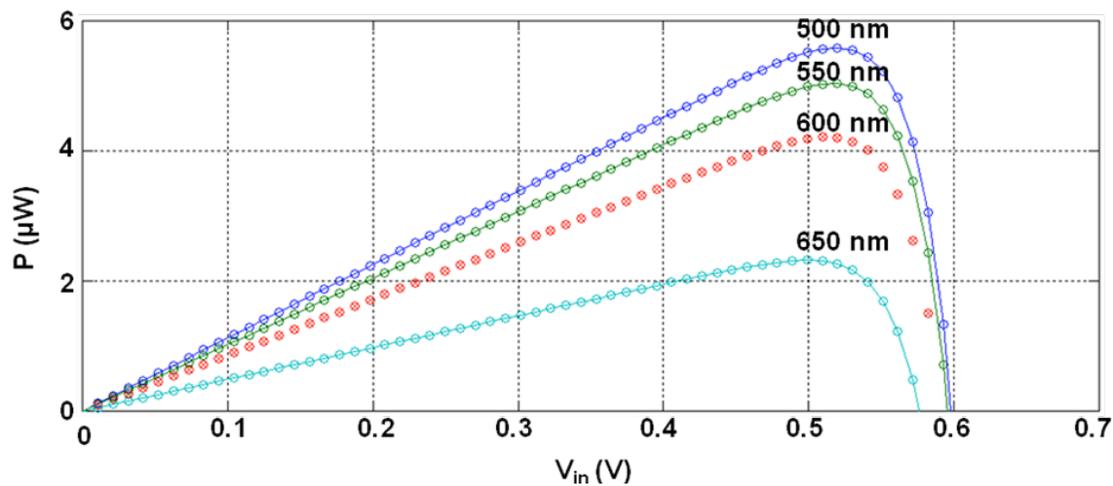


Figure 3.10 : Caractéristique P/V pour des longueurs d'onde comprises entre 500 et 650 nm ($250 \text{ mW} / \text{cm}^2$)

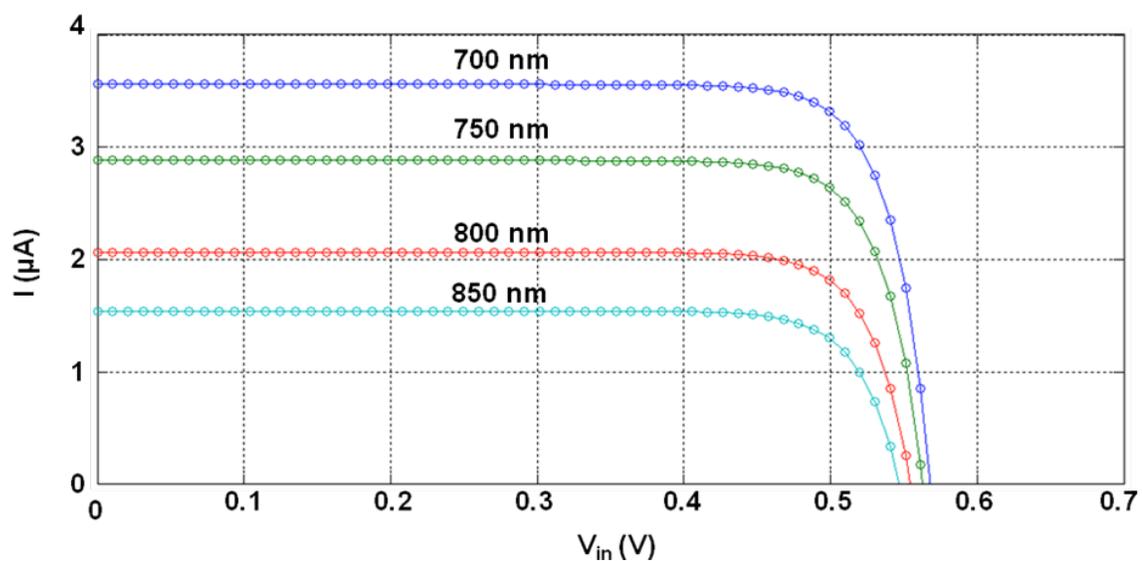


Figure 3.11 : Caractéristique I/V pour des longueurs d'onde comprises entre 700 et 850 nm ($250 \text{ mW} / \text{cm}^2$)

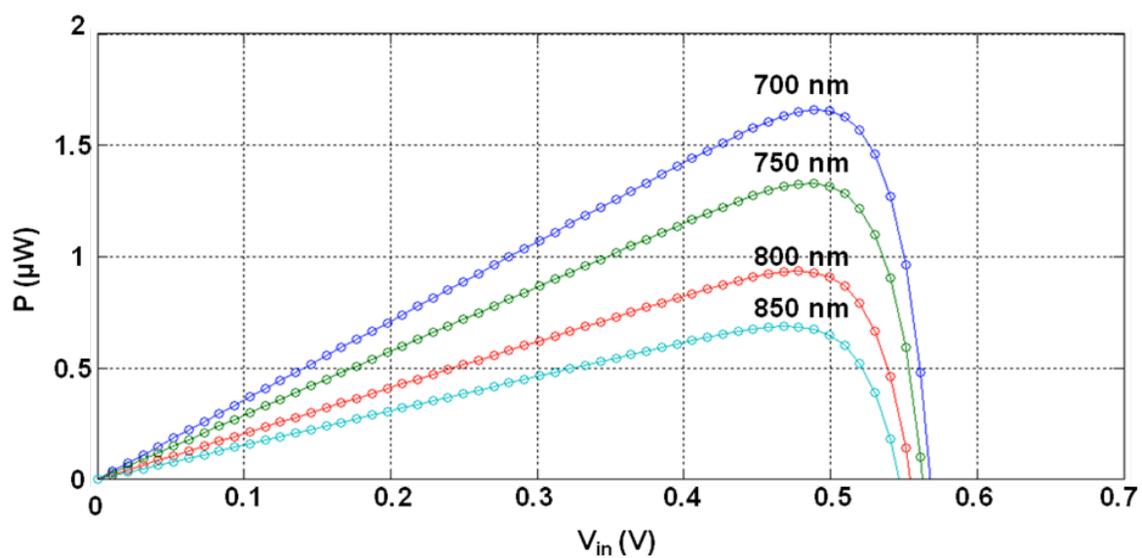


Figure 3.12 : Caractéristique P/V pour des longueurs d'onde comprises entre 700 et 850 nm ($250 \text{ mW} / \text{cm}^2$)

Les graphes des figures 3.9 à 3.12 présentent la caractéristique courant/tension (I/V) et puissance/tension (P/V) de notre cellule photovoltaïque. Nous avons considéré plusieurs longueurs d'onde de lumière incidente afin de déterminer la puissance maximale produite par notre cellule. Les résultats de nos simulations démontrent que plus la longueur d'onde du rayon incident est grande, plus il y aura d'atténuation du courant I_{sc} et de la tension V_{oc} de la cellule photovoltaïque.

Les simulations réalisées avec les longueurs d'onde comprises entre 700 nm et 850 nm avaient pour but de vérifier si la cellule photovoltaïque pouvait fournir suffisamment d'énergie pour alimenter le microrobot placé dans le corps humain, celui-ci étant pénétrable à de telles longueurs d'onde. Les résultats ci-dessus présentés démontrent que le courant I_{sc} varie entre 1.5 μA à 3.5 μA lorsque les longueurs d'onde sont situées près de l'infrarouge, c'est-à-dire entre 750 nm et 950 nm. Or, les résultats des expériences préliminaires effectuées indiquent qu'un courant de l'ordre de 10 μA est requis pour produire un champ magnétique détectable par le senseur à magnétorésistance utilisé (Magnetic Microsensor Probe, *STJ-020*) (figure 3.25). Pour un courant plus faible que 10 μA , d'autres instruments de mesure du champ magnétique peuvent être envisagés, dont le *SQUID* et le scanner *MEG* « Magneto- Encephalography ». En effet, ce dernier est capable de mesurer des champs magnétiques de l'ordre de 10^{-15} Tesla. C'est pourquoi il est utilisé pour mesurer le champ magnétique produit par les neurones qui est inférieur à 10^{-12} Tesla.

Le fonctionnement des différents composants de notre circuit étant exposé, nous présenterons maintenant l'architecture de notre circuit final dédié à la génération des impulsions magnétiques.

3.5 Architecture du circuit de génération d'impulsions magnétiques

Certaines architectures, comme les oscillateurs contrôlés par la tension « *Voltage Controlled Oscillator (VCO)* », peuvent être utilisées pour générer des impulsions magnétiques. La plupart de ces architectures sont des variantes du multivibrateur astable utilisant des capacitances et des inductances [CAO06]. Par conséquent, la fréquence d'oscillation de ces circuits dépend entre autres de la valeur de ces capacitances. Pour le système de télécommunication proposé dans le cas de cette thèse, il est important d'opérer à une fréquence d'oscillation proche du kilo Hertz afin de permettre l'acquisition des données par le senseur à magnétorésistance utilisé pour détecter les impulsions magnétiques générées par le circuit.

Cela étant, le recours aux *VCOs* traditionnels produira nécessairement une fréquence d'oscillations élevée, c'est-à-dire de l'ordre du GHz, en raison de la taille des capacitances qui doit être petite pour pouvoir respecter les contraintes d'espace. Dans ce cas, l'énergie dynamique dissipée sera très grande et elle dépassera l'énergie recueillie à partir de nos cellules photovoltaïques. La solution d'augmenter la taille des capacitances pour une réduction de la fréquence des *VCOs*, par exemple du giga Hertz au kilo Hertz, aurait pour conséquence d'accroître la taille de la puce. Ainsi, pour pallier le problème

de haute fréquence de fonctionnement dans les *VCOs* traditionnels qui dissipent beaucoup d'énergie, nous proposons l'architecture de la figure 3.15. Cette architecture contient deux étages que nous présentons séparément. Le premier étage est le circuit présenté à la figure 3.13 et il sert à amplifier la tension d'entrée. Cela étant, nous avons conçu le circuit représenté à la figure ci-dessous de façon à ce que sa tension de sortie soit égale à 0 V ou à V_{DD} , selon que la tension d'entrée se situe entre 0 et 120 mV ou qu'elle est supérieure à 240 mV. La figure 3.14 illustre le résultat de la simulation de ce circuit.

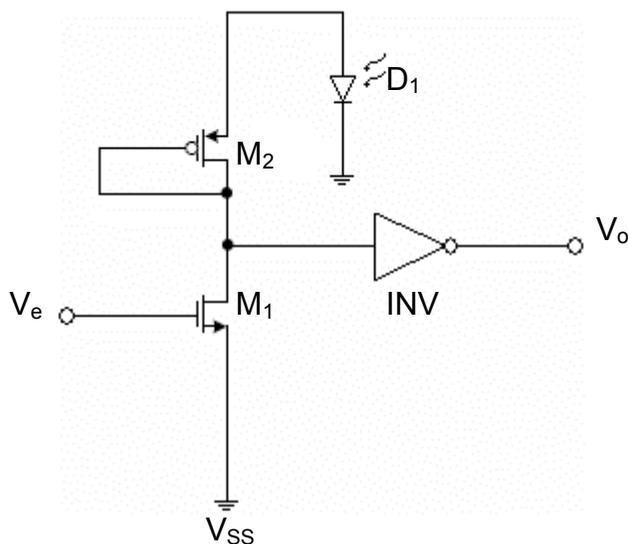


Figure 3.13 : étage d'amplification de la tension d'entrée au circuit de génération d'impulsions magnétiques

Nous avons déterminé le gain en petit signal de l'amplificateur à charge active « *Active load amplifier* » en additionnant les courants à la sortie de celui-ci :

$$g_{m1}v_e + g_{ds1}v_s + g_{m2}v_s + g_{ds2}v_s = 0 \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow \frac{v_s}{v_e} = \frac{-g_{m1}}{g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m2}} \quad (3.11)$$

Avec $g_m \cong 100g_{ds}$, nous pouvons donc négliger g_{ds1} et g_{ds2} au dénominateur pour avoir :

$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{-g_{m1}}{g_{m2}} \quad (3.12)$$

D'où le gain en petit signal de l'amplificateur est :

$$\frac{v_s}{v_e} = -\left(\frac{K'_N W_1 L_2}{K'_P W_2 L_1}\right)^{1/2} \quad (3.13)$$

Où $K'_N = \mu_n C_{oxn}$ et $K'_P = \mu_p Cox_p$.

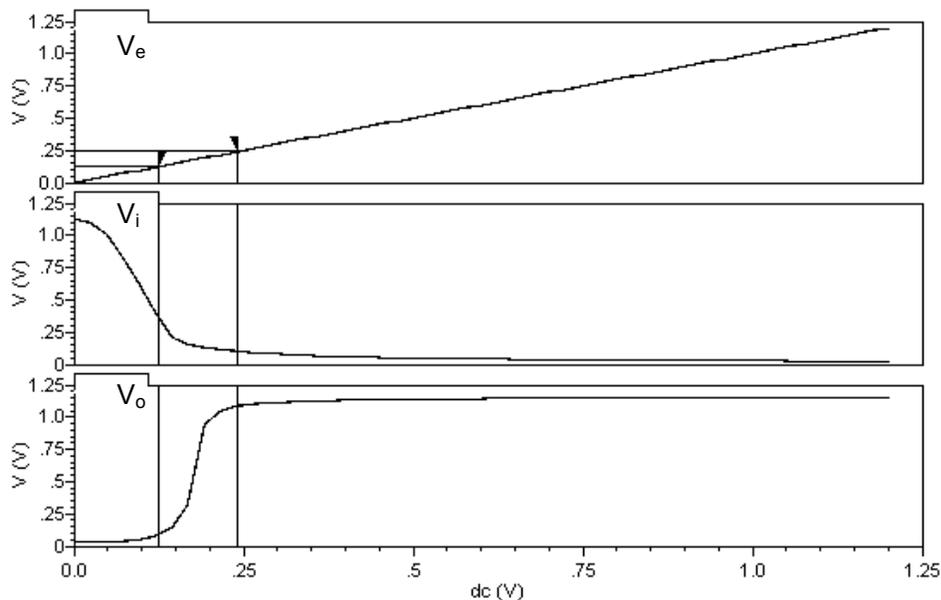


Figure 3.14 : analyse dc – tension de sortie versus la tension d'entrée

La figure 3.15 présente le circuit final qui génère les impulsions magnétiques. Dans la figure 3.15, l'entrée V_e du circuit de génération d'impulsions magnétiques est branchée à la sortie V_o du circuit présenté à la figure 3.13. La photodiode D_4 , dont l'architecture a été présentée à la section 3.5, fournit le courant à travers l'inductance. Les autres photodiodes produisent une tension de sortie de 0 V, 0.5 V ou de 1.2 V selon leur emplacement dans le circuit et selon qu'elles sont chargées ou non.

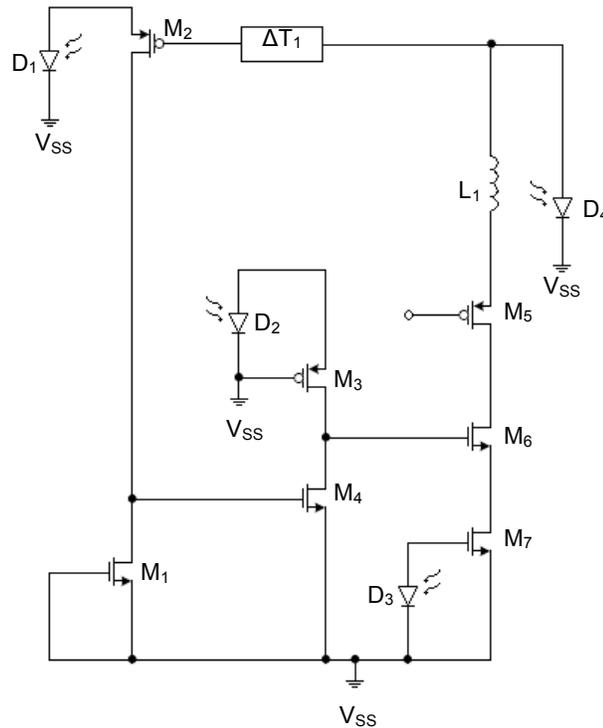


Figure 3.16 : réduction du circuit de génération d'impulsions magnétiques après l'activation du transistor M_5

Puisque le transistor M_8 est fermé, il n'y a aucun courant qui circule dans la branche formée par les transistors M_8 , et M_9 et M_7 . La grille du transistor M_7 étant connectée à la photodiode D_3 , celui-ci demeure activé en tout temps ce qui polarise le circuit. De même, le transistor M_6 est allumé par le fait que la grille du transistor M_3 est connectée à la masse ($V_{GM3} = 0$) et par le fait que $V_{GM4} = 0$. Ainsi, les transistors M_5 , M_6 et M_7 agissent comme des interrupteurs fermés et peuvent être représentés par 3 résistances de valeurs faibles branchées à la photodiode D_4 .

Nous obtenons alors une résistance totale très faible par rapport à la résistance interne de la photodiode D_4 . Cela étant, nous considérons que la photodiode D_4 est

court-circuitée, (le courant I_{sc} vaut $10 \mu\text{A}$ et V_{oc} vaut 0 V). Cette décharge de la photodiode active le transistor *PMOS* M_2 . Une fois activé, le transistor M_2 entraîne l'activation du *NMOS* M_4 qui décharge la tension d'entrée du transistor M_6 . Ce dernier étant un *NMOS* lorsque $V_{GSM6} = 0 \text{ V}$, il agit comme un interrupteur ouvert. Ainsi, nous revenons au cas présenté à la figure 3.15. La photodiode D_4 déchargée est à nouveau branchée à une charge infinie ($I_{sc} = 0$ et $V_{oc} = 1.2 \text{ V}$) entraîne le blocage du transistor M_2 . La grille du transistor M_3 étant branchée à la masse, elle charge la tension d'entrée du transistor M_6 qui s'active à nouveau et décharge la photodiode D_4 . Nous revenons alors à l'état initial. Ce mécanisme se répètera générant ainsi des impulsions magnétiques à travers l'inductance L_1 . Dans cette architecture, le courant ne traverse pas simultanément les deux inductances L_1 et L_2 . Les transistors M_6 et M_9 n'étant activés en même temps (figure 3.18), cela permet au courant de traverser soit l'une ou l'autre des deux branches formées par les transistors M_5, M_6 et M_7 ou M_8, M_9 et M_7 et d'éviter que les flux magnétiques des inductances ne s'associent (figure 3.13).

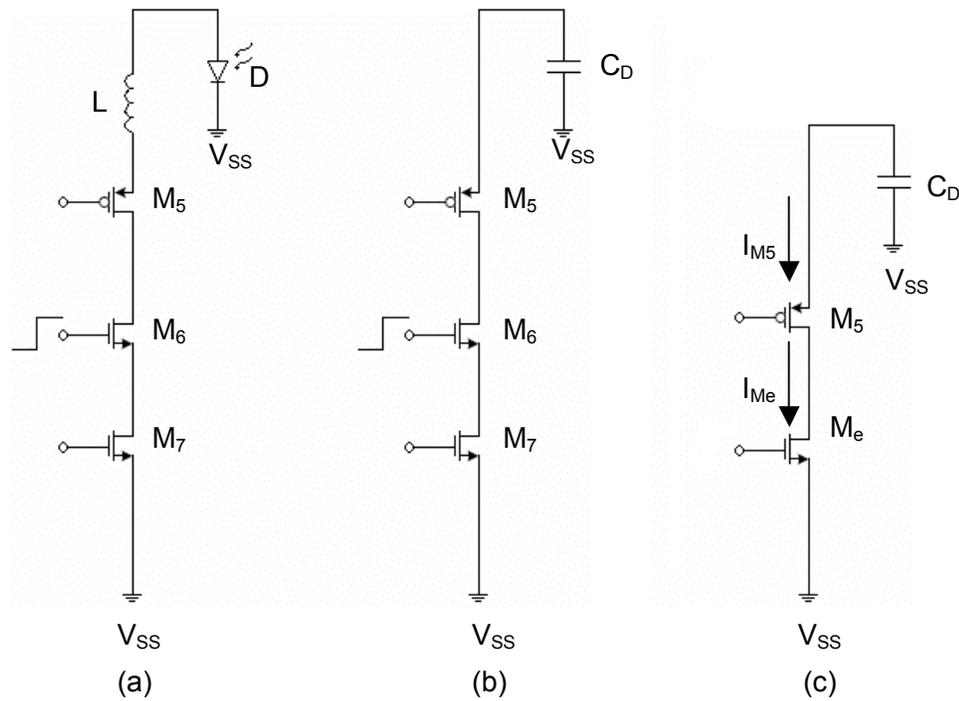


Figure 3.17 : modèle équivalent en inverseur

La configuration des transistors M_5 , M_6 et M_7 de la figure 3.17 décrit le comportement d'un inverseur dans lequel la photodiode peut être remplacée par une capacitance, qui se charge lorsque la grille du transistor M_6 est à 0 V, le tout tel qu'illustré à la figure 3.17 (c).

En analysant le circuit de la figure 3.17 (c), nous constatons que la grille du transistor M_6 varie entre 0 et V_{DD} . Dans l'hypothèse où les transistors M_5 et M_6 sont actifs, nous observons une décharge de la photodiode D_4 . Le transistor M_5 opère initialement dans la région de saturation. Celui-ci entre dans la région linéaire une fois que la tension de sortie aux bornes de la photodiode passe de V_{DD} à V_{th} . Pour sa part, le transistor M_7 opère en tout temps dans la région linéaire. Lorsque la tension grille-source

du transistor M_6 (V_{gsM6}) est plus grande que la tension de seuil V_{thM6} , ce dernier commence à opérer dans la région de saturation pour ensuite entrer rapidement dans la région linéaire. À l'état stable, tous les transistors (M_5 , M_6 et M_7) opéreront dans la région linéaire. La valeur du courant traversant la branche formée par les transistors M_5 , M_6 et M_7 est donnée par :

$$I_{M5} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{SG} - |V_{tp}|) V_{SD} - \frac{1}{2} V_{SD}^2 \right] \quad (3.14)$$

Dans le cas où la photodiode D_4 se décharge, la tension V_{SD} du transistor M_5 sera très petite. Par conséquent, nous pouvons négliger le terme $\frac{1}{2} V_{SD}^2$ dans l'équation 3.14 pour obtenir :

$$I_{M5} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - |V_{tp}|) V_{SD} \quad (3.15)$$

Maintenant, analysons le cas où la tension d'entrée du circuit est élevée. Dans ce cas, le transistor $PMOS$ M_8 est activé et le transistor M_5 est bloqué. Ainsi, il n'y aura aucun courant dans la branche formée par les transistors M_5 , M_6 et M_7 . Le courant empruntera plutôt le chemin de la branche formée par les transistors M_7 , M_8 , et M_9 (figure 3.20). Ces trois derniers transistors combinés en séries affichent une résistance faible par rapport à la résistance interne de la photodiode D_4 . Par conséquent, la photodiode D_4 est court-circuitée par une charge de résistance négligeable, ainsi le

courant de court circuit I_{sc} vaut $10 \mu\text{A}$ et la tension V_{oc} est égale à 0 V . Cette décharge de la photodiode active le transistor *PMOS* M_{12} . Une fois activé, le transistor M_{12} entraîne l'activation du *NMOS* M_{11} qui décharge la tension d'entrée du transistor M_9 . Ce dernier étant un *NMOS* lorsque $V_{GSM9} = 0 \text{ V}$, il agit comme un interrupteur ouvert. Ainsi, nous revenons au cas présenté à la figure 3.13. La photodiode D_4 déchargée est à nouveau branchée à une charge infinie ($I_{sc} = 0$ et $V_{oc} = 1.2 \text{ V}$) entraîne le blocage du transistor M_{12} . La grille du transistor M_{10} étant branchée à la masse, elle charge la tension d'entrée du transistor M_9 qui s'active à nouveau et décharge la photodiode D_4 . Nous revenons alors à l'état initial. Ce mécanisme se répètera continuellement tant que le transistor M_8 est activé.

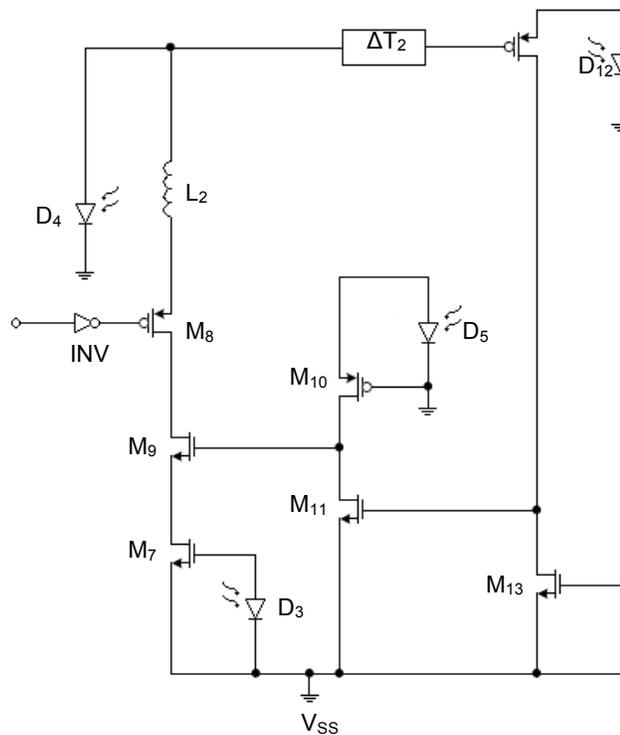


Figure 3.18 : réduction du circuit de génération d'impulsions magnétiques après l'activation du transistor M_8

La modulation de fréquence est réalisée par l'ajout de deux modules de délai au circuit ΔT_1 et ΔT_2 comme illustré à la figure 3.15. Ces modules de délai sont donc réalisés par une chaîne d'inverseurs comme indiqué à la figure 3.19. Lorsque la tension d'entrée vaut 0, la fréquence des impulsions magnétiques vaut 1 kHz, alors que pour une tension d'entrée de 1.2 V, la fréquence des oscillations est de 2 kHz. Les figures 3.20 à 3.23 présentent les résultats des simulations donnant la fréquence des impulsions magnétiques en fonction du niveau de la tension d'entrée.

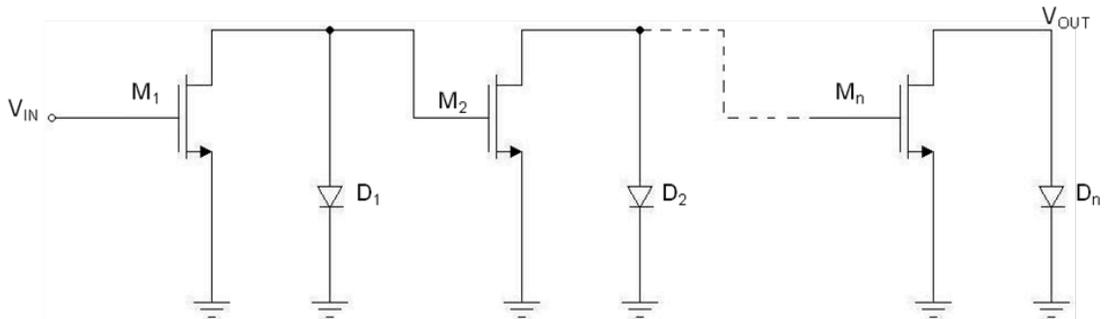


Figure 3.19 : circuit pour l'implémentation du module de délai [WAN05]

Le temps de propagation de délai pour un inverseur est donné par :

$$t_{pd} = \frac{C_{INV,L} V_{DD}}{\eta} \left(\frac{1}{I_{dSAT}} \right) \quad (3.16)$$

Où $C_{INV,L}$ est la capacitance de charge de chaque inverseur qui est donnée par l'équation 3.13, V_{DD} est la tension en circuit ouvert de la photodiode, η est une constante

qui dépend de la technologie et I_{dsat} est le courant de saturation. Ainsi, le délai ajouté dans le circuit est : $T = 2Nt_{pd}$.

$$C_{gd} = C_{ox}W \times L \quad (3.17)$$

Dans l'équation 3.17, C_{gd} est la capacitance grille-drain, C_{ox} est la capacitance de l'oxyde vaut $13 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ [KEN06] pour la technologie CMOS $0.13 \mu\text{m}$, W et L sont respectivement la largeur et la longueur du canal du transistor.

La puissance totale dissipée par l'oscillateur dépend, d'une part, de la puissance dynamique, qui est elle-même fonction de la fréquence de l'opération, et, d'autre part, de la puissance en court-circuit. La puissance dynamique dissipée est donnée par [EIS91, SRI94]:

$$P_D = C_{INV,L}V_{DD}^2 f \quad (3.18)$$

Dans le cas de notre circuit, la valeur de la puissance dynamique est négligeable puisque nous opérons à des fréquences de 1 kHz et de 2 kHz. Pour sa part, la puissance dissipée en court-circuit durant la charge ou la décharge de la photodiode est exprimée par [EIS91, ADL96]:

$$P_{SC} = \frac{1}{2}V_{DD}I_{peak}t_t f \quad (3.19)$$

Où I_{peak} est le courant de saturation maximal. Dans le cas de notre circuit, le courant de saturation est égal au courant en court-circuit de la photodiode qui dépend du rayonnement. La variable t_t est le temps de transition du signal d'entrée et f est la fréquence de l'oscillation.

Nous savons que le bruit occasionné par le courant de fuite peut nuire au bon fonctionnement du circuit. C'est pourquoi, lors de la conception de notre circuit, nous avons estimé la valeur du courant de fuite afin de voir comment notre circuit pouvait en être affecté. Pour ce faire, nous avons utilisé la relation suivante [BUT07] et les outils de simulation dans CADENCE:

$$I_{Si} = I_0 W_i e^{\frac{-\sum V_j - [V_{i0} - \eta(V_{DD} - \sum V_j) + \gamma \sum V_j]}{\eta V_T}} \quad (3.20)$$

Également, le courant de fuite I peut être calculé de la manière suivante:

$$I_{Si} = I_0 W_i e^{\frac{-\sum V_j - [V_{i0} - \eta V_i + \gamma V_j]}{\eta V_T}} \left[1 + e^{-\frac{V_i}{V_T}} \right] \quad (3.21)$$

En appliquant cette relation à notre circuit, nous avons pu estimer une valeur des courants de fuite de ~ 130 nA pour les transistors M_5 , M_6 , M_7 , M_8 , et M_9 qui sont respectivement représentés par I_{S5} , I_{S6} , I_{S7} , I_{S8} , et I_{S9} .

Les figures 3.20 à 3.23 présentent les résultats des simulations effectuées sur notre circuit. Elles montrent la variation du courant de sortie en fonction du signal d'entrée. Les résultats de la simulation sont conformes à ceux qui sont présentés à la figure 3.1. Le courant de sortie est présenté sous la forme d'un train d'impulsion. La fréquence de ce dernier est de 10 kHz pour un bas niveau de la tension d'entrée et de 20 kHz pour un niveau élevé (figure 3.21 à 3.23). Dans le but de faciliter la détection du train d'impulsions magnétiques par le senseur à magnétorésistance, nous avons augmenté le nombre d'étages dans les deux modules de délai (ΔT_1 et ΔT_2) présentés à la figure 3.19. Par conséquent, nous avons refait l'analyse transitoire, dont le résultat est présenté à la figure 3.21.

Avec l'ajout des étages supplémentaires dans les modules de délai, la fréquence du train d'impulsions du courant circulant dans l'inductance est de 1 kHz pour un bas niveau de la tension d'entrée et de 2 kHz pour un niveau élevé (figure 3.21). Ce qui est préférable est d'obtenir une fréquence d'oscillation très basse. Cependant, nous avons vu, selon les simulations effectuées, qu'il est impossible d'atteindre des fréquences plus faibles que 1 kHz par l'ajout continu d'étage dans les modules de délai.

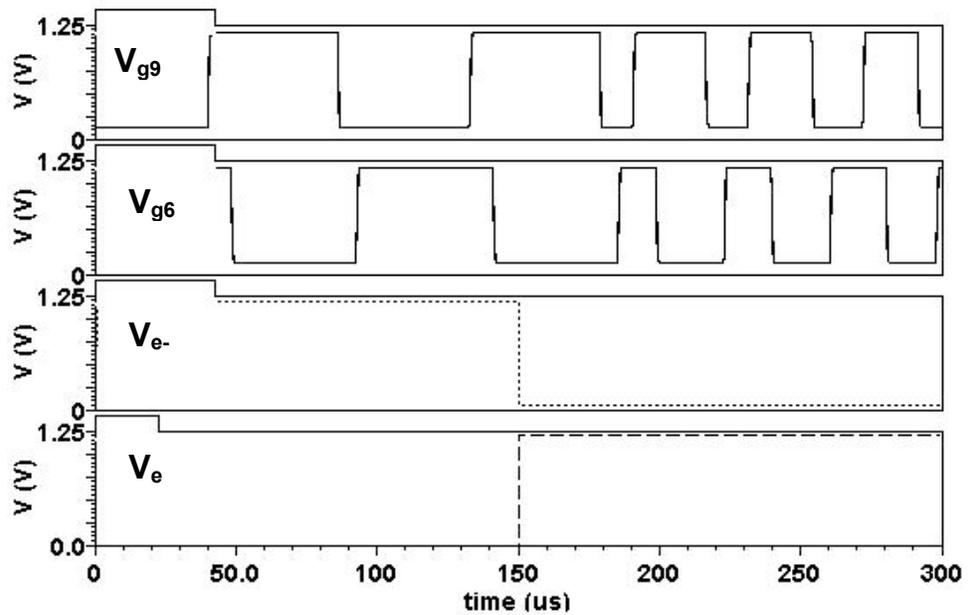


Figure 3.20 : analyse transitoire montrant la tension à l'entrée de différents transistors intervenants dans la génération des impulsions magnétiques

La commutation des transistors M_6 et M_9 permet la génération des impulsions magnétiques en bloquant ou en laissant passer le courant dans les inductances L_1 et L_2 respectivement. La figure 3.20 illustre une modulation de la largeur des impulsions (*PWM*) pour les tensions de grille des transistors M_6 et M_9 en fonction de la tension d'entrée V_e .

Pour sa part, la figure 3.20 indique quatre courbes. La première représente la tension d'entrée et varie entre 0 et 1.2 V. La seconde, représentée en ligne pleine, est la juxtaposition des courants circulant dans les deux inductances L_1 et L_2 . Les deux dernières courbes en pointillés sont les courants dans les inductances L_1 et L_2 respectivement. En raison de la faible distance entre ces deux inductances, les deux

trains d'impulsions magnétiques qu'elles génèrent seront vus comme un seul train par le senseur à magnétorésistance. Celui-ci détectera les impulsions magnétiques créées par le courant I_L illustré dans les figures 3.22 et 3.23.

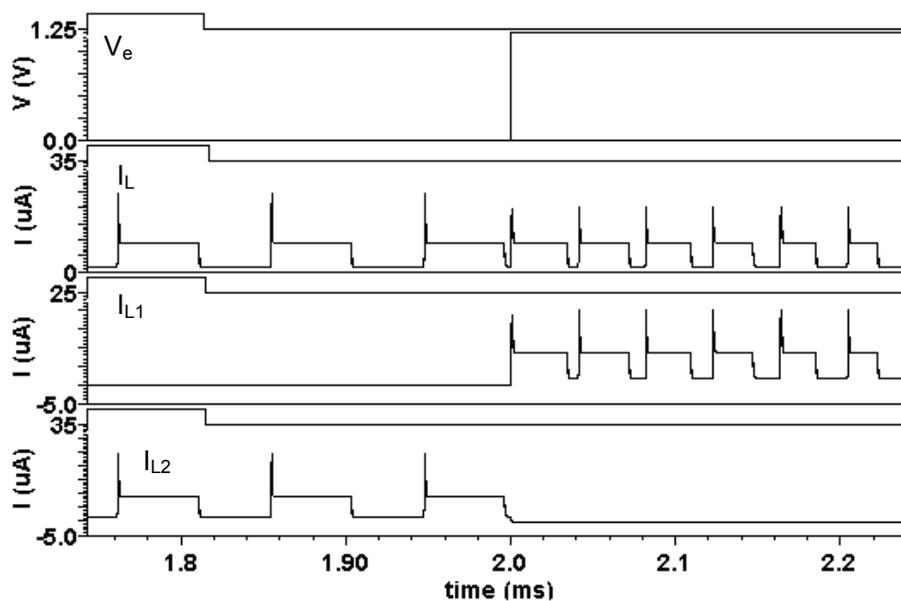


Figure 3.21 : analyse transitoire montrant la modulation en fréquence (de 10 kHz et de 20 kHz) du courant avec une tension d'entrée carrée V_e variant de 0 à 1.2 V

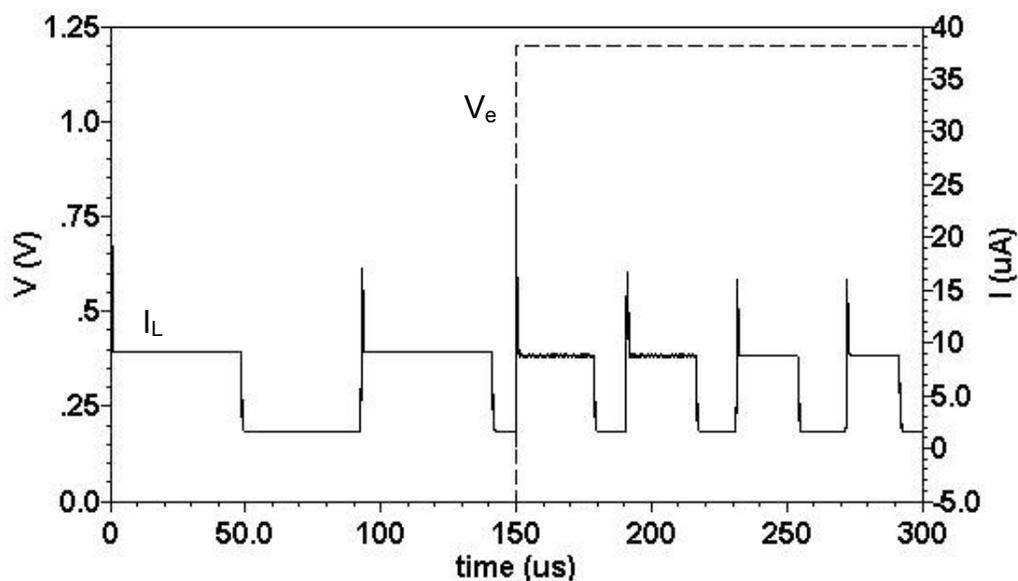


Figure 3.22 : analyse transitoire montrant la modulation en fréquence (de 10 kHz et de 20 kHz) du courant avec une tension d'entrée carrée V_e variant de 0 à 1.2 V

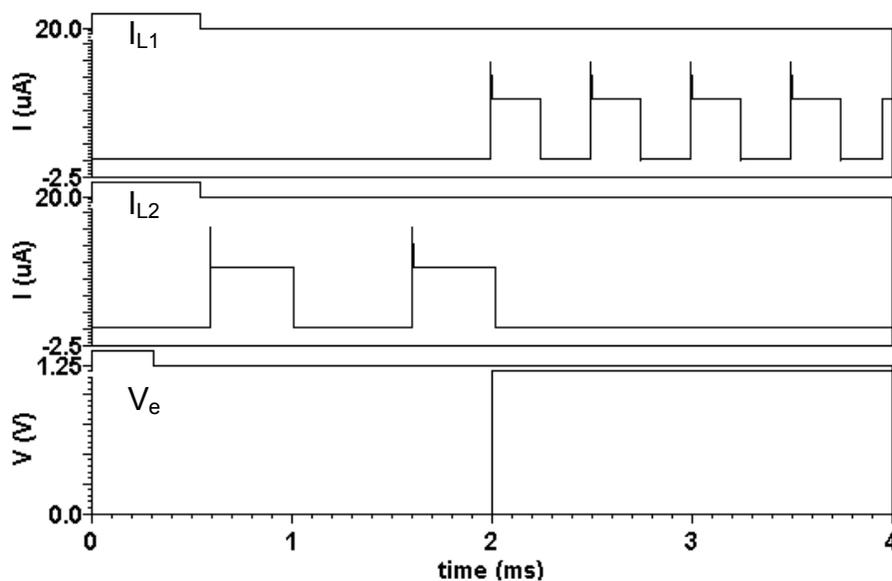


Figure 3.23 : analyse transitoire montrant la modulation en fréquence (de 1 kHz et de 2 kHz) du courant avec une tension d'entrée carrée V_e variant de 0 à 1.2 V

L'analyse DC est présentée à la figure 3.24 et nous permet de déduire une tension de seuil de ~ 375 mV occasionnant un changement de fréquence du signal de sortie.

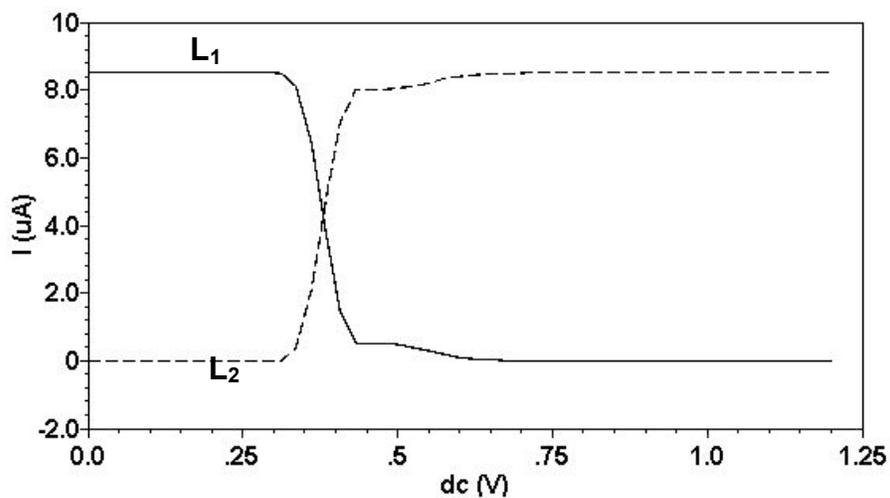


Figure 3.24 : analyse DC - simulation

La figure 3.25 montre le courant de fuite obtenu dans CADENCE qui est de 115 nA, qui est conforme à la valeur théorique.

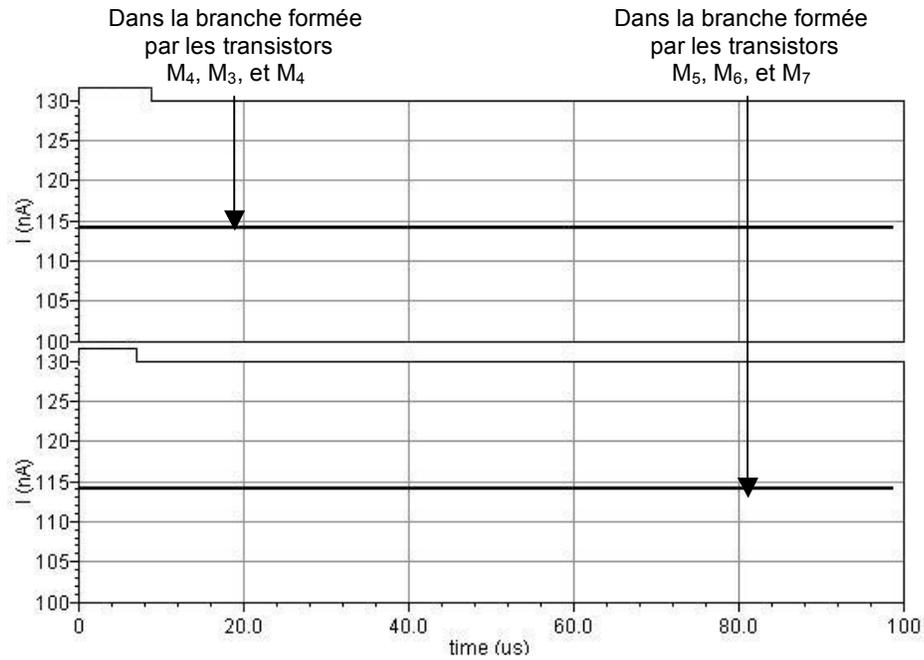


Figure 3.25 : analyse transitoire - courant de fuite en fonction du temps

Dans les paragraphes suivants nous effectuons certains calculs afin de d'évaluer la distance maximale entre le microrobot et le senseur afin que celui-ci puisse encore détecter le signal du champ magnétique produit dans les inductances. Pour ce faire, nous utilisons la figure 3.26.

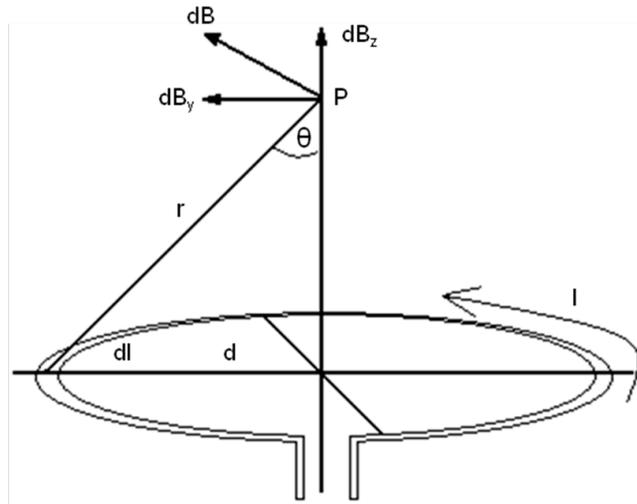


Figure 3.26 : champ magnétique détecté par le capteur situé en un point P avec un courant de $10 \mu\text{A}$ circulant dans une spire de rayon d

La variation du champ magnétique dB est donnée par :

$$dB = \frac{\mu I}{4\pi} \frac{dl}{x^2 + d^2} \quad (3.18)$$

Où μ est la perméabilité du vide, I est le courant circulant dans la spire, d est le rayon de la spire et dl est une variation infinitésimale du rayon de la spire. La figure 3.26 indique deux composantes du champ magnétique dB_y et dB_z , lesquelles sont exprimées par :

$$\begin{aligned} dB_z &= dB \sin(\theta) \\ dB_y &= dB \cos(\theta) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Avec :

$$\begin{aligned}\sin(\theta) &= \frac{d}{(x^2 + d^2)^{1/2}} \\ \cos(\theta) &= \frac{x}{(x^2 + d^2)^{1/2}}\end{aligned}\quad (3.20)$$

La composante du champ magnétique en y (dB_y) s'annulera à cause de la symétrie.

$$\begin{aligned}B &= B_x = \int \frac{\mu I}{4\pi} \frac{d}{(x^2 + d^2)^{3/2}} dl \\ \Rightarrow B &= \frac{\mu I}{2d}\end{aligned}\quad (3.21)$$

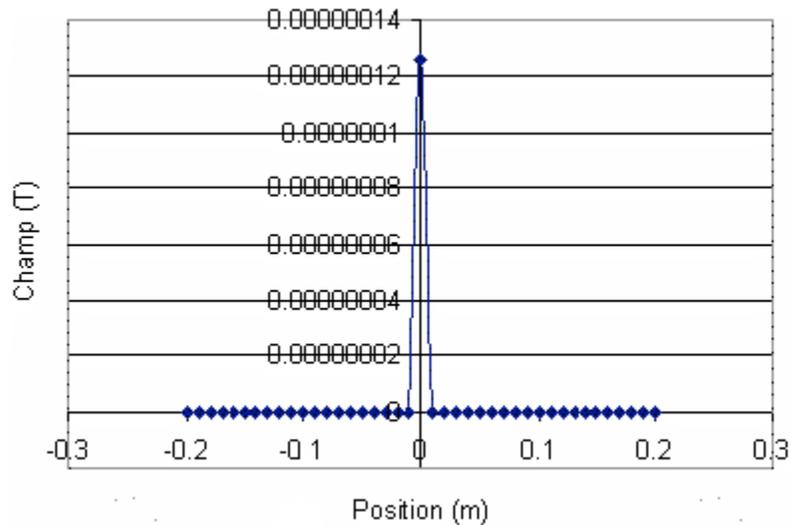


Figure 3.27 : simulation dans MATLAB du champ magnétique détecté par le capteur placé à la position P comprise entre -0.2 m et 0.2 m, lorsqu'un courant de 10 μA circule dans une spire de rayon $d = 25 \mu\text{m}$

Le champ magnétique détectable variera en fonction de la distance séparant le capteur à magnétorésistance du microrobot. En effet, le champ magnétique détectable

est de 1.96×10^{-15} T ; lorsque le senseur est placé à une distance de 2 cm du microrobot et de 1.57×10^{-14} T lorsque la distance est de 1 cm. Ces intensités du champ magnétique peuvent être détectées par le scanner *MEG*, lequel peut détecter des intensités de champ magnétique de l'ordre de femto-Tesla.

L'analyse théorique de notre circuit étant exposée, nous présenterons, dans la prochaine section, les résultats expérimentaux du circuit fabriqué.

3.6 Résultats expérimentaux

La figure 3.28 présente la photomicrographie de notre microrobot mesurant $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$. Le carré noir délimite la surface du microrobot avant d'être coupé et séparé du reste de la puce. Le microrobot est une puce électronique avec une couche de protection à base de parylène.

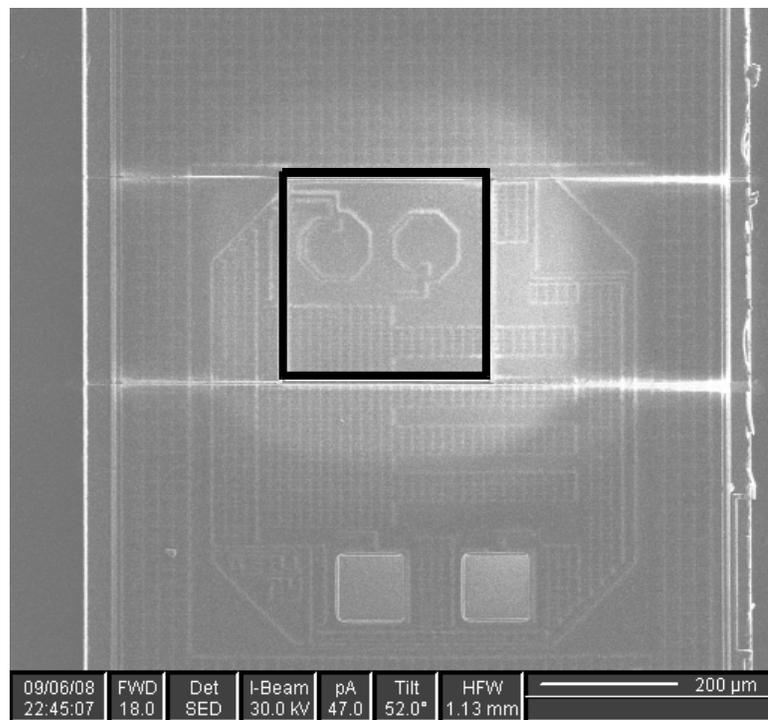


Figure 3.28 : Photomicrographie du microrobot avant d'être coupé du reste du die

Le diagramme conceptuel montrant les différents composants du microrobot est donné dans la figure 3.29. L'objectif est d'avoir le microrobot qui évolue dans un médium qui se situe au-dessus d'un support composé d'une matrice de microélectroaimants responsables de la propulsion.

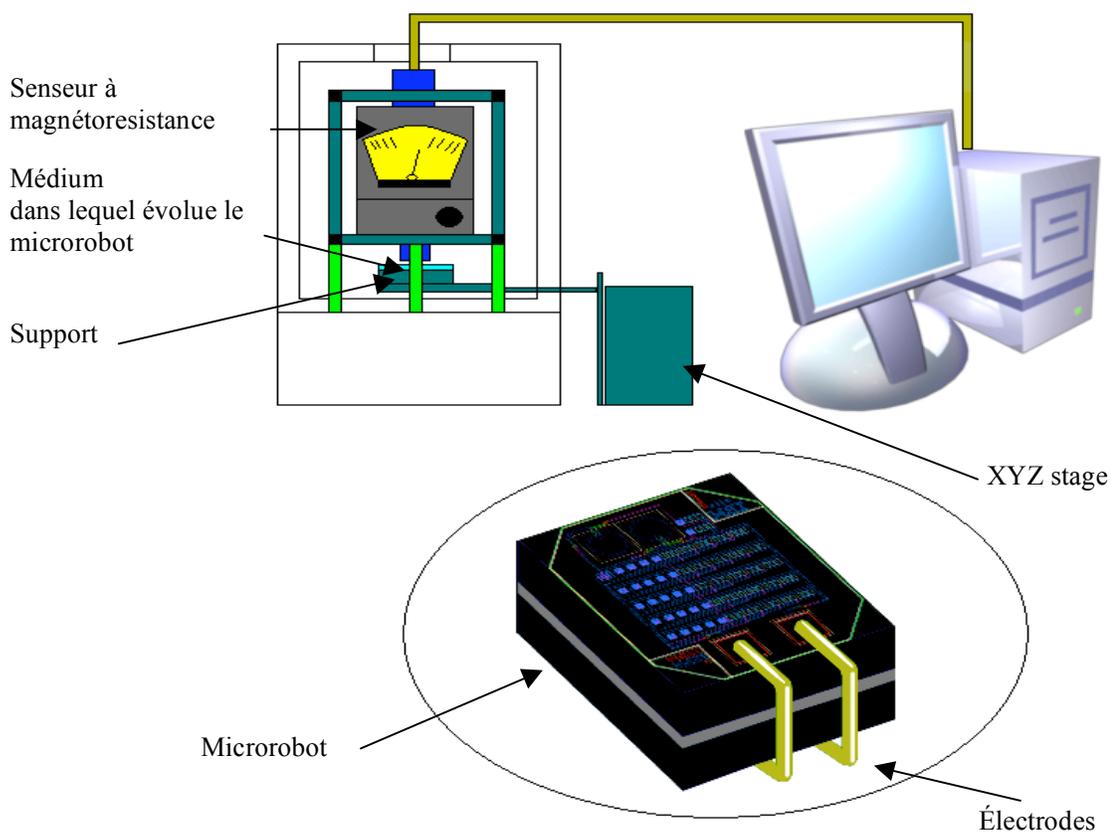


Figure 3.29 : les composants du microrobot présenté dans cette thèse

Afin de valider les tests de fonctionnalité du circuit, nous avons fabriqué deux puces, dont l'une était munie de plots. Le rôle de celle-ci consistait, d'une part, à mesurer la variation de la fréquence et l'amplitude du courant à la sortie du circuit et, d'autre part, à mesurer la tension et le courant produits par les cellules photovoltaïques. La puce a été testée dans une chambre noire afin d'éviter toute influence de la lumière ambiante sur nos résultats. Nous avons d'abord utilisé une source de lumière, qui est un pointeur laser commercial de 1 mW de puissance et d'une longueur d'onde de 650 nm. Nous avons effectué ce test afin de vérifier si la puce pouvait fonctionner dans des conditions de faible luminosité. Nous avons placé le laser à 90 degrés par rapport à la

puce et à une distance de 6 cm. Nous avons mesuré une tension en circuit ouvert V_{oc} de 470 mV et un courant de court-circuit I_{sc} de 2 μA (figure 3.30 (a)).

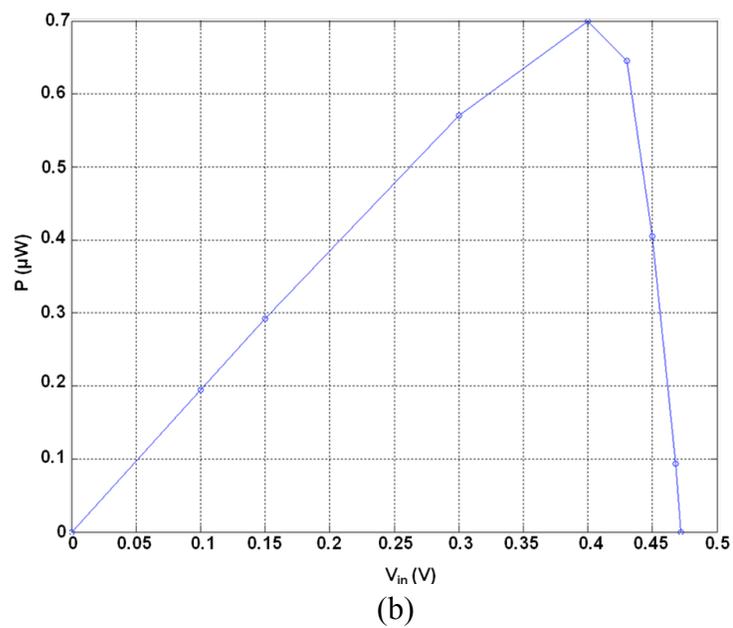
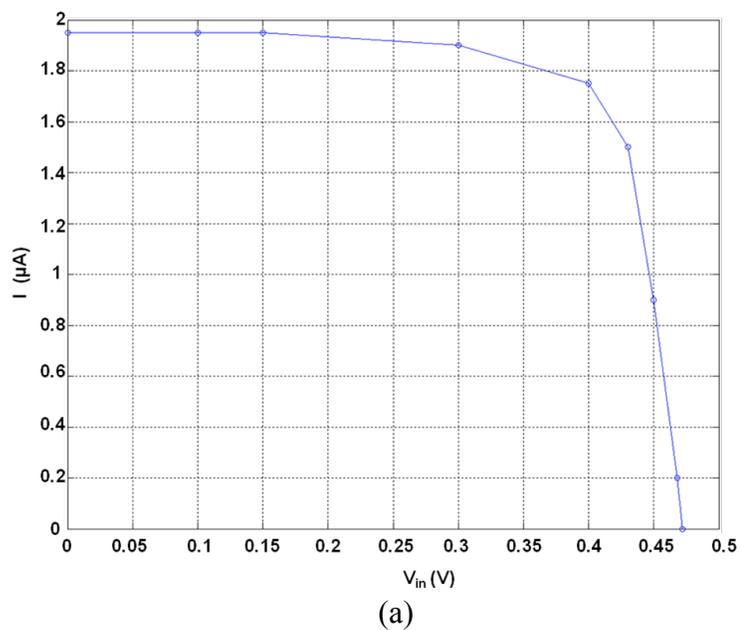


Figure 3.30 (a) : caractéristique I-V; (b) P-V de la photodiode D_4 illuminée par un laser de 1 mW – 650 nm

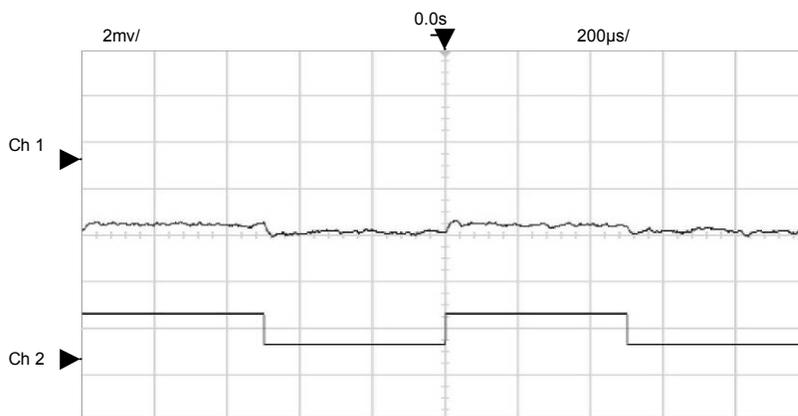


Figure 3.31 : détection du champ magnétique généré dans la bobine avec un senseur à magnétorésistance, Ch1 est la sortie du senseur à magnétorésistance, et Ch2 est le signal d'entrée

Nous avons vu à la figure 3.28 qu'avec une source de laser incidente d'une puissance de 1 mW, le circuit est capable de fournir une puissance maximale (P_m) de $0.7 \mu\text{W}$, ce qui correspond à un courant maximal (I_m) de $1.6 \mu\text{A}$. Cette valeur obtenue peut être quintuplée en utilisant une source de laser de 5 mW pour donner un courant de court circuit de $\sim 10 \mu\text{A}$. Nous avons fait une autre expérience en plaçant le pouce entre le laser et le circuit. Cette expérience nous a démontré qu'il est possible, malgré la faible puissance du laser, de mesurer un signal de sortie de 3.5 mV lorsque la source est à 1 mm de la puce. Ainsi, en utilisant des longueurs d'onde près de l'infrarouge partiellement transmise par le tissu humain, nous pourrions espérer pouvoir alimenter le robot et communiquer avec ce dernier même s'il est placé dans le corps humain.

Afin de tester le circuit implémentant le système de communication proposé, nous avons utilisé le générateur de fonctions d' « *Agilent Technology* », modèle 33120A,

15 MHz et un oscilloscope numérique de Tektronix modèle TDS7154. Pour effectuer nos tests, nous avons utilisé une onde carrée variant de 0 à 1 V fournissant un courant de 10 μA dans une inductance simulant la faible et la haute concentration ionique du médium. La figure 3.29 montre la réponse du détecteur à magnétorésistance. Toutefois, l'intensité du courant obtenu des cellules photovoltaïques intégrées au microrobot était beaucoup plus faible que celle prévue au départ. Ceci est une conséquence de la faible intensité du rayon lumineux incident situé à la surface du module photovoltaïque et responsable de la génération du courant dans l'inductance. Avec une telle intensité du courant, les impulsions magnétiques, bien que présentes, ne sont pas détectables par le senseur à magnétorésistance utilisé lors de nos tests.

Pour résoudre ce problème de sensibilité du senseur à magnétorésistance, nous avons utilisé l'appareil d'IRM pour détecter les impulsions magnétiques générées par le système de communication du microrobot. Nous avons utilisé quatre puces, soit les microrobots, pour compenser pour la limite de la résolution spatiale de l'appareil d'IRM. Ces puces ont été placées dans un gel transparent. Avant d'utiliser le gel, nous nous sommes assurés, par des observations visuelles, que le laser pouvait le pénétrer. Pendant toutes les étapes de mesure, nous avons utilisé une cinquième puce comme référence. Celle-ci a été placée dans le récipient contenant le gel à une distance éloignée des quatre autres puces. Cette cinquième puce n'a été soumise à aucun rayonnement lumineux durant l'expérimentation, ce qui justifie qu'elle ne soit pas visible dans les images capturées par l'IRM.

Nous avons utilisé le « Spin Echo » pour obtenir l'image des champs magnétiques produits par les inductances placées à la surface des quatre puces. Le test a été effectué en quatre étapes.

La première étape consistait à placer les quatre puces dans l'appareil d'IRM sans les exposer à une source lumineuse, et ce, afin de vérifier si les puces ne produisaient pas elles-mêmes d'artéfacts dans L'IRM. Nous avons ajusté l'IRM pour prendre des images pendant quatre minutes. Aucun artéfact n'a été produit par les puces puisque ces dernières n'apparaissent pas dans les images. Cette étape permet de confirmer que les puces, en soit, ne sont pas magnétiques. La figure 3.32 présente le résultat de ce test.

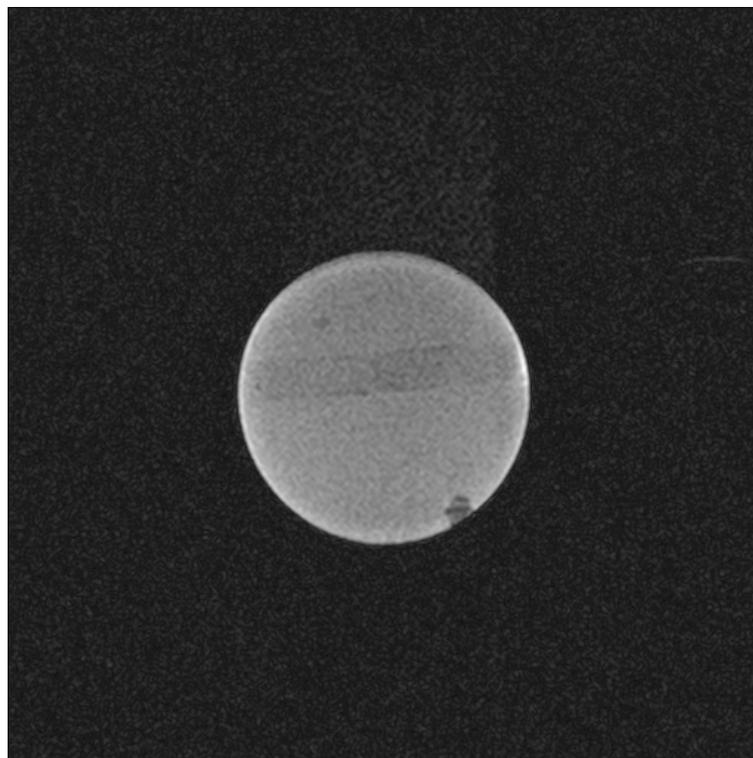


Figure 3.32 : les quatre puces placées dans l'IRM sans la source lumineuse pour s'assurer que ces dernières ne produisent pas d'artéfacts

La deuxième étape consistait à utiliser un pointeur laser de 1 mW dont le faisceau était dirigé par l'intermédiaire d'une fibre optique dont l'ouverture était située à 0.5 cm au-dessus du récipient de test et placée perpendiculairement aux puces. Le résultat du test est présenté à la figure 3.33. Dans cette figure, nous pouvons observer les champs magnétiques générés par les inductances des microrobots qui sont représentés par les tâches noires. Ainsi, ce test permet de confirmer le fonctionnement du circuit de télécommunication proposé.

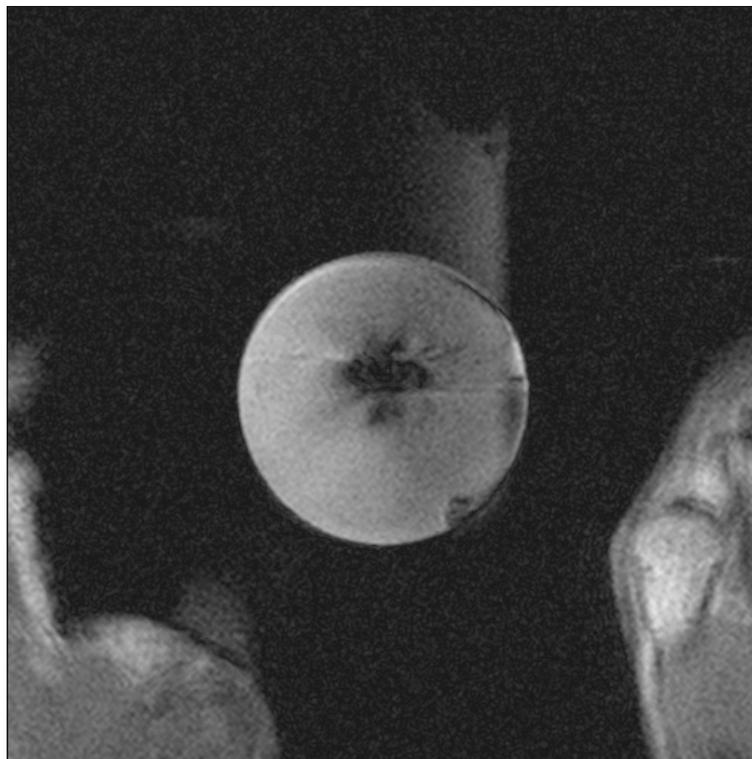


Figure 3.33 : image des champs magnétiques générés par le circuit de télécommunication avec les quatre puces placées dans l'IRM incluant la source lumineuse

La troisième étape a été entreprise pour valider le résultat obtenu à l'étape précédente. Lors de cette troisième étape, nous avons placé dans l'IRM le récipient qui

contient le gel sans les quatre puces. Tel qu'attendu, l'image ne présentait aucun artéfact (figure 3.34). Cette étape nous a permis de valider que l'image des champs magnétiques enregistrée par l'IRM lors de la seconde étape est effectivement générée par le circuit de télécommunication intégré aux puces.

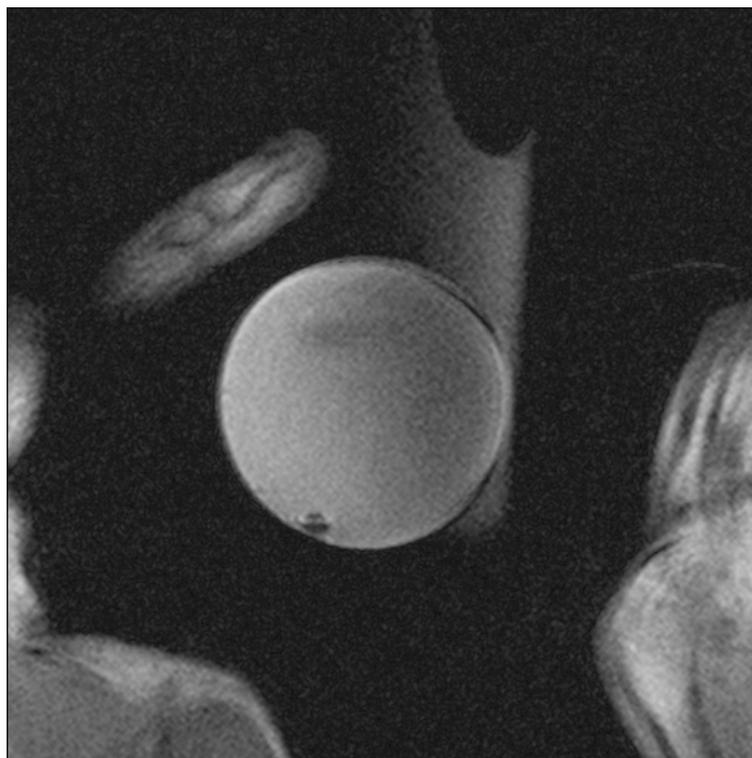


Figure 3.34 : image enregistrée avec le récipient de gel placé dans l'IRM avec la source lumineuse et sans les quatre puces

La dernière étape a été entreprise afin de reproduire le résultat de la deuxième étape. La figure 3.35 présente le résultat obtenu.

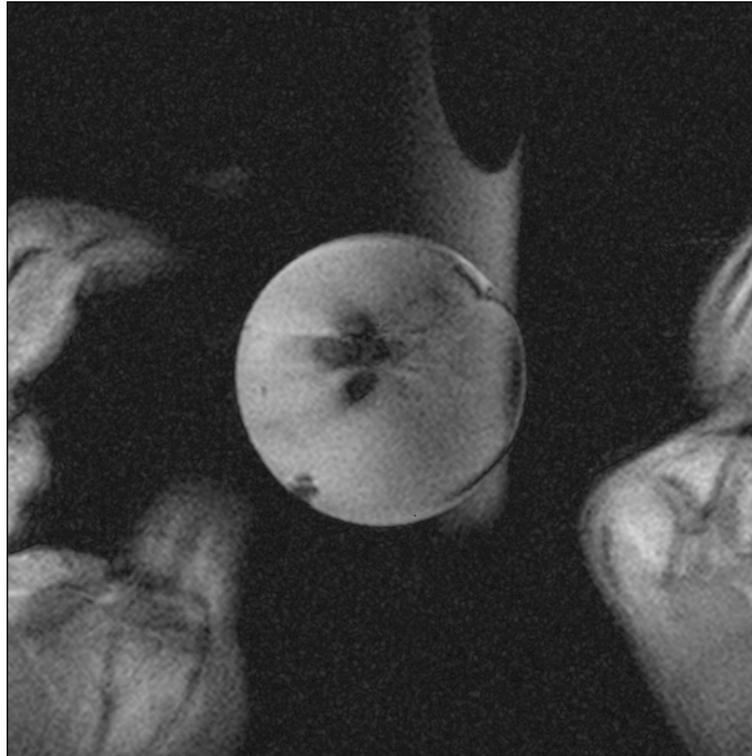


Figure 3.35 : image des champs magnétiques générés par le circuit de télécommunication avec la source lumineuse et les quatre puces placées dans l'IRM

Le circuit de télécommunication des microrobots a généré des impulsions magnétiques qui sont représentées par les tâches noires. Cette dernière étape nous a permis de confirmer la validité des résultats des tests des étapes précédentes et, par le fait même, la fonctionnalité de notre système de communication intégré dans les microrobots.

3.7 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons conçu et fabriqué un circuit autoalimenté à faible consommation de puissance permettant au robot de communiquer avec son environnement externe en générant des impulsions magnétiques dont la fréquence varie en fonction du niveau de la concentration ionique détectée dans le médium. Cela étant, nous avons proposé deux circuits; le premier utilise deux inductances et le second, une inductance pour acheminer de l'information. Nous avons effectué des tests expérimentaux sur les circuits en utilisant un senseur à magnétorésistance. Or, celui-ci n'étant pas suffisamment sensible, nous avons utilisé l'appareil d'IRM pour tester notre circuit de télécommunication. Les résultats des tests sont concluants et valident le circuit de télécommunication. Un tel circuit de télécommunication intégré à un microrobot à cette échelle ($300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m} \times 260\ \mu\text{m}$) n'a jamais été rapporté dans la littérature. Il constitue donc une première mondiale.

CHAPITRE 4

SYSTÈME DE PROPULSION

Dans le précédent chapitre, nous avons présenté un système de télécommunication basé sur l'utilisation des impulsions magnétiques. Dans le présent chapitre, nous proposons un système de propulsion de notre microrobot. La section 4.1 traitera des motivations qui nous ont incités à proposer un tel système. L'architecture globale du système de propulsion sera présentée à la section 4.2, alors que les sections 4.3 et 4.4 traiteront de la description matérielle et logicielle de la plateforme. Finalement, l'architecture du circuit pour l'injection du courant dans le microélectroaimant, sera exposée dans la section 4.5. La section 4.6 sera consacrée à la présentation de nos résultats expérimentaux.

4.1 Motivations

De nos jours, la tendance est à la miniaturisation des composants, car ceux-ci permettent d'obtenir des systèmes étonnamment petits. Cette tendance est notamment observée dans le domaine de la mécatronique. Lors de la fabrication des microrobots mobiles, il est primordial d'implémenter un système de propulsion qui leur est adapté. Par conséquent, les chercheurs ont considéré la possibilité d'utiliser les nanotubes de carbone en vue de fabriquer des micro/nano moteurs. À titre d'exemple, citons les travaux des chercheurs du laboratoire « *Lawrence Berkeley National Laboratory* » et de l'université *UC Berkeley*. Bien que ces travaux ne constituent qu'une preuve de concept,

il n'en demeure pas moins que le moteur qui en résulte a un diamètre qui avoisine les 200 nm. Par ailleurs, des variantes au moteur à base de nanotubes de carbone existent, bien qu'elles demeurent toujours inutilisées, puisqu'il n'est pas aisé de les intégrer dans des microsystèmes.

En dépit de l'existence des micromoteurs à base de nanotubes de carbone et d'autres variantes, les chercheurs ne sont toujours pas parvenus à créer un système de propulsion fonctionnel et complètement intégrable à un microrobot autonome mesurant quelques centaines de micromètres de côté. C'est pourquoi nous proposons, dans le cadre de cette thèse, un système de propulsion pour notre microrobot utilisant une matrice formée de microélectroaimants. Cette matrice sera fabriquée sur un substrat externe et sera contrôlée par un autre circuit qui peut fournir la puissance minimale requise pour créer un champ magnétique capable d'attirer notre microrobot. Un tel système de propulsion pour un microrobot de $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ limitant la demande énergétique demeurerait, jusqu'à ce que l'on s'y attarde, non réalisé. Le système que nous proposons permet de propulser et d'orienter la trajectoire de notre microrobot à partir d'un ordinateur.

4.2 Architecture globale du système de propulsion proposée pour notre microrobot

Dans cette section, nous présentons une plateforme automatisée pour le contrôle de la trajectoire de notre microrobot. Bien que cette plateforme a spécifiquement été

conçue pour un microrobot, rien n'empêche son utilisation pour contrôler les déplacements parallèles d'une flotte de microrobots autonomes.

Les expériences préliminaires démontrent qu'il est possible de rendre une puce électronique magnétique simplement en la frottant à un aimant permanent. La puce est constituée de silicium. Bien que le silicium ne soit pas magnétique, son frottement avec un aimant a permis à des particules de cet aimant de s'y accrocher. Ces particules sont responsables de l'attraction de la puce vers l'aimant. Une fois magnétisée, nous avons laissé flotter la puce dans un liquide.

Nous avons par la suite placé un aimant en dessous du support à une distance d'un centimètre et avons mesuré le champ magnétique en utilisant un gaussmètre. La mesure obtenue était de 270 Gauss. Cette intensité du champ magnétique a permis le déplacement de la puce, soit notre microrobot, comme le démontre la figure 4.1.

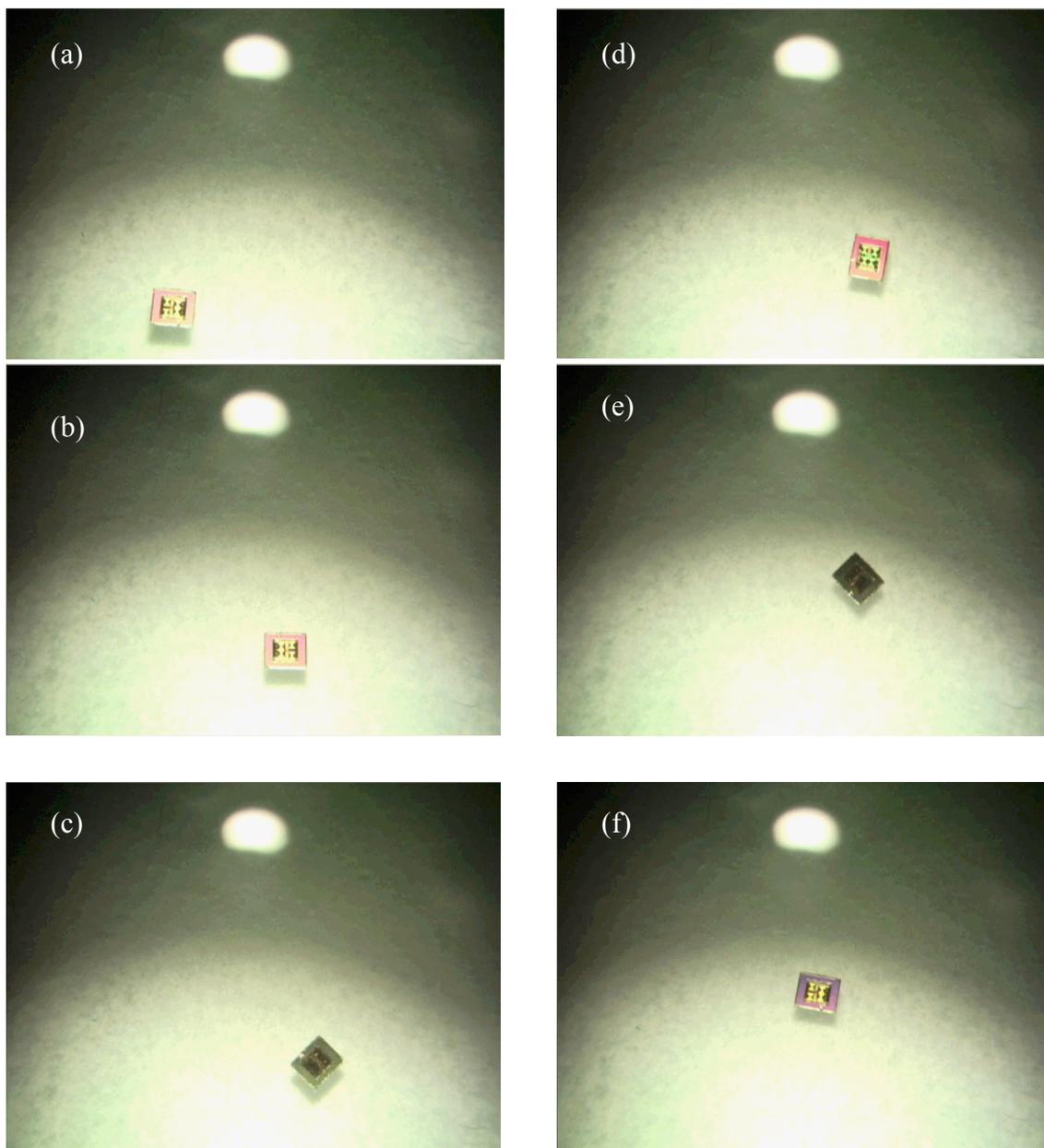


Figure 4.1: déplacement du microrobot dans un milieu aqueux

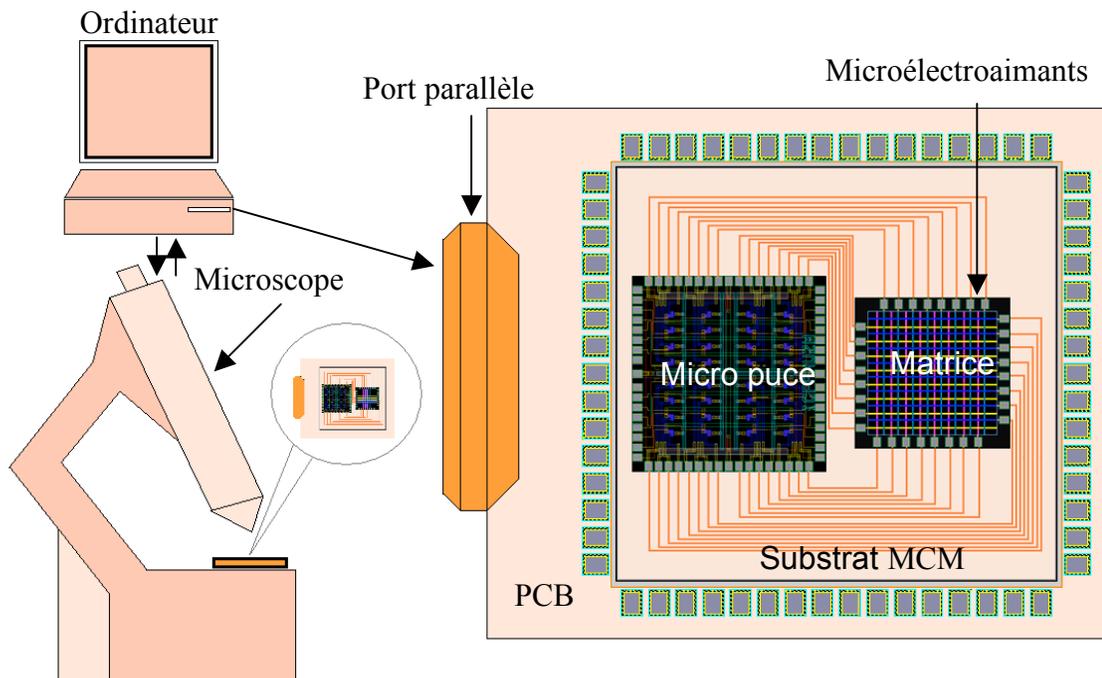


Figure 4.2 : Plateforme de propulsion du microrobot

Ces résultats nous permettent de suggérer le design et de fabrication d'une plateforme automatisée pour le contrôle de notre microrobot (figure 4.2). Ainsi, nous avons conçu un système de propulsion basée sur une matrice de microélectroaimants. Pour déplacer le microrobot, il suffit d'injecter le courant dans le microélectroaimant situé le plus près de celui-ci. La puce étant déjà magnétisée, le champ magnétique que doit être généré par le microélectroaimant sert à fournir la force électromagnétique nécessaire pour provoquer le déplacement du microrobot.

La figure 4.2 illustre la plateforme de propulsion de notre microrobot. Avec une telle plateforme, nous visons à contrôler avec précision notre microrobot placé au-dessus d'une matrice de microélectroaimants.

L'architecture proposée pour le contrôle de la matrice d'électroaimants est composée de trois éléments principaux, soit : (1) une plateforme pour la propulsion; (2) un microscope optique pour l'observation et le pistage et (3) un ordinateur pour le contrôle.

Le système de propulsion proposé est réalisé en deux étapes. La première étape consiste à concevoir la matrice de microélectroaimants. Pour sa part, la seconde étape concerne la conception d'un logiciel pour le pistage de la trajectoire de notre microrobot évoluant dans le médium. Ce logiciel est également responsable d'établir le lien entre la plateforme et un ordinateur externe.

4.3 Description matérielle de la plateforme

La plateforme pour la propulsion comporte trois niveaux d'abstraction (figure 4.3). Au sommet, nous retrouvons notre microrobot. Celui-ci se déplace dans un milieu aqueux. Ensuite, les microélectroaimants situés au deuxième niveau sont générateurs d'une force portante responsable de la propulsion du microrobot. Au dernier niveau se situe le circuit électronique pour l'injection du courant dans les microélectroaimants pour la génération de champs magnétiques. La plateforme décrite ci-dessus est présentée à la figure 4.3.

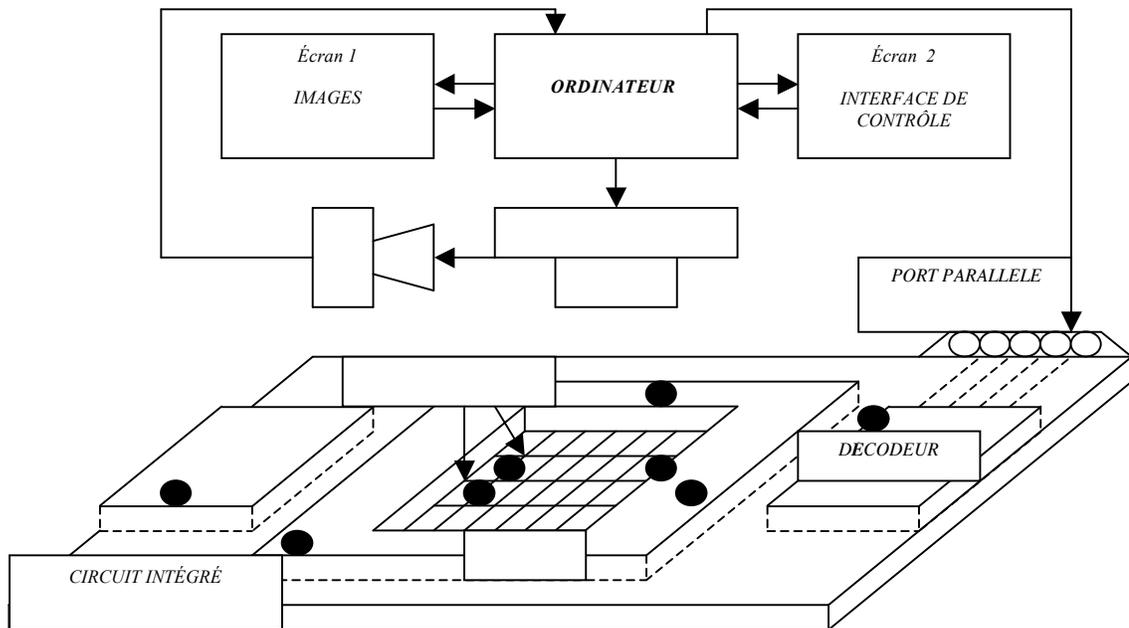


Figure 4.3 : architecture globale pour le contrôle de la matrice [AND06]

Dans cette plateforme, un décodeur reçoit les commandes en provenance d'un ordinateur et sélectionne le microélectroaimant désiré pour modifier la trajectoire de notre microrobot. La vitesse du microrobot peut être contrôlée en augmentant le courant circulant dans la bobine.

Cela étant dit, nous avons fabriqué sur puce le circuit de contrôle et de génération des champs magnétiques. Le calcul de la force portante des microélectroaimants est présenté à la section 4.3.1. Dans notre architecture, chaque microélectroaimant est branché à la sortie d'un convertisseur tension/courant que nous avons conçu et fabriqué avec la technologie *CMOS* 0.18 μm plutôt que d'utiliser des convertisseurs tension/courant existant déjà sur le marché. Cela s'explique par le fait qu'avec la

méthodologie des *SoCs*, nous pouvons augmenter la densité des électroaimants dans la matrice, nous permettant ainsi d'obtenir davantage de précision dans le contrôle de la trajectoire de notre microrobot.

Cela étant nous estimons la force magnétique produite par le microélectroaimant. Lorsque la distance séparant le microrobot du microélectroaimant est petite, soit 300 μm , le principe régissant l'attraction de notre microrobot placé au-dessus d'un électroaimant, tel qu'illustré à la figure 4.4, est similaire à celui régissant la force d'attraction d'un relai électromécanique.

La force magnétique créée par les microélectroaimants ne peut attirer le microrobot vers le fond en raison de la tension de surface du liquide et aussi en raison de son intensité, ce qui est un effet désiré. Ainsi, le robot ne pourra que glisser en surface tout en suivant une direction planaire vers le microélectroaimant qui l'attire.

Le fer est considéré pour le noyau de l'électroaimant. Malgré le fait que le microrobot soit magnétisé, celui-ci ne sera pas attiré vers les électroaimants. En injectant un courant dans les inductances, un champ magnétique est créé et le microrobot est attiré vers ce champ dépendamment de son intensité (figure 4.4 (a) et (b)). Avec la configuration des microélectroaimants proposée ci-dessus, un très grand gradient magnétique n'est pas requis, le microrobot étant déjà fortement magnétisé.

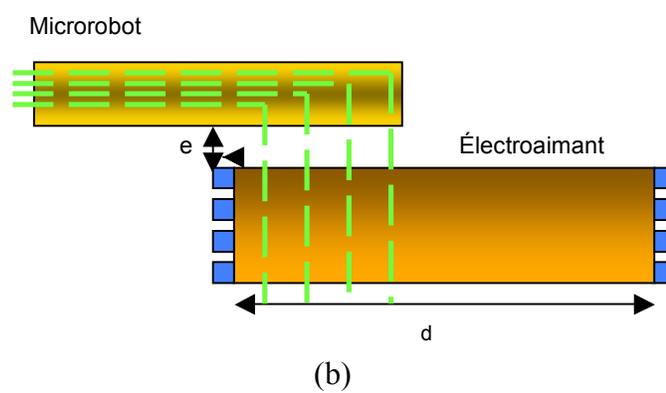
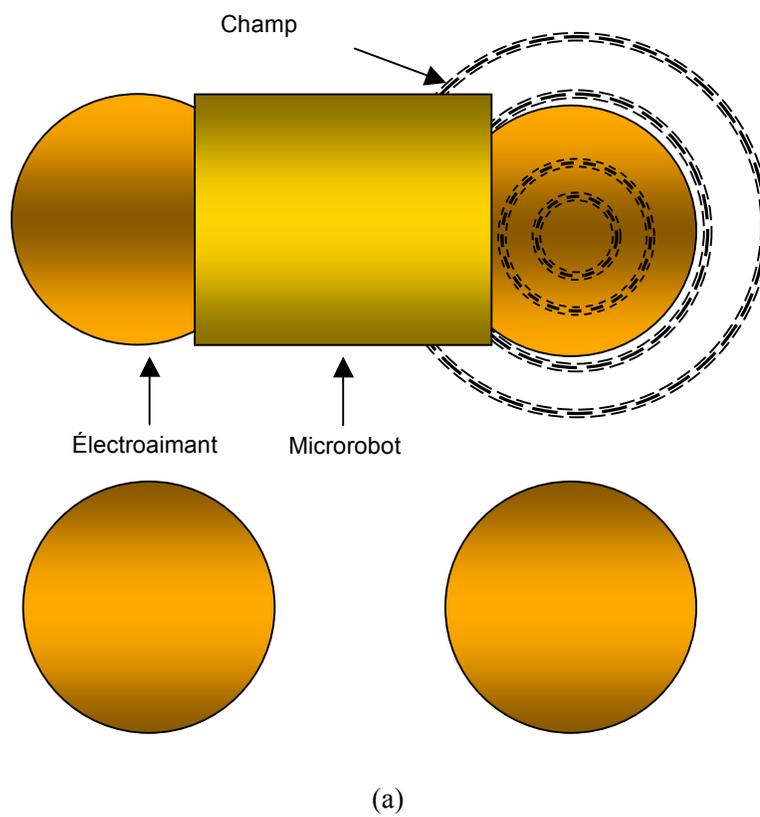


Figure 4.4 : (a) schéma du principe ; (b) vue de profil montrant uniquement la bobine (2) attirant le microrobot

Dans l'hypothèse où le champ magnétique entre notre microrobot et le noyau du solénoïde est uniforme (figure 4.4 (b)), la densité d'énergie dans le noyau du solénoïde est donnée par :

$$E_d = \frac{B^2}{2\mu} \quad (4.1)$$

Dans l'équation 4.1, B est le champ magnétique et μ est la perméabilité absolue. En multipliant la densité d'énergie par le volume total du champ magnétique ($V = e \times A$, où e est l'écart entre le microrobot et le noyau du solénoïde et A est l'aire de la coupe transversale du noyau du solénoïde), nous obtenons l'énergie totale donnée par :

$$E_r = \frac{B^2}{2\mu_0} (e \times A) \quad (4.2)$$

Le but de cette démarche est de trouver la force d'attraction exercée sur notre microrobot, qui dépend de la variation de l'énergie avec la distance e et est donnée par :

$$F = \frac{dE_d}{de} \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (4.4)$$

La presque totalité de la force du champ magnétique produit par le solénoïde apparaîtra dans l'espace situé entre le microrobot et le noyau. Ainsi, nous pouvons négliger la réluctance du noyau. La valeur du champ magnétique s'obtient par :

$$B = \frac{F_m \mu_0}{e} \quad (4.5)$$

En substituant cette valeur dans les équations de Maxwell nous obtenons :

$$F = \frac{F_m^2 \mu_0 A}{2e^2} \quad (4.6)$$

Avec

$$F_m = N \times I \quad (4.7)$$

Dans l'équation 4.12, N est le nombre de spires et I est le courant traversant le solénoïde. Nous avons utilisé le logiciel de Matlab afin de déterminer le courant minimal pouvant produire une force portante suffisamment élevée pour attirer notre microrobot. Les tests effectués nous ont permis de déterminer que le courant minimal requis pour attirer notre microrobot est de 5 mA.

La figure 4.5 présente le résultat de la simulation pour $N = 50$ spires et $d = 300$ μm .

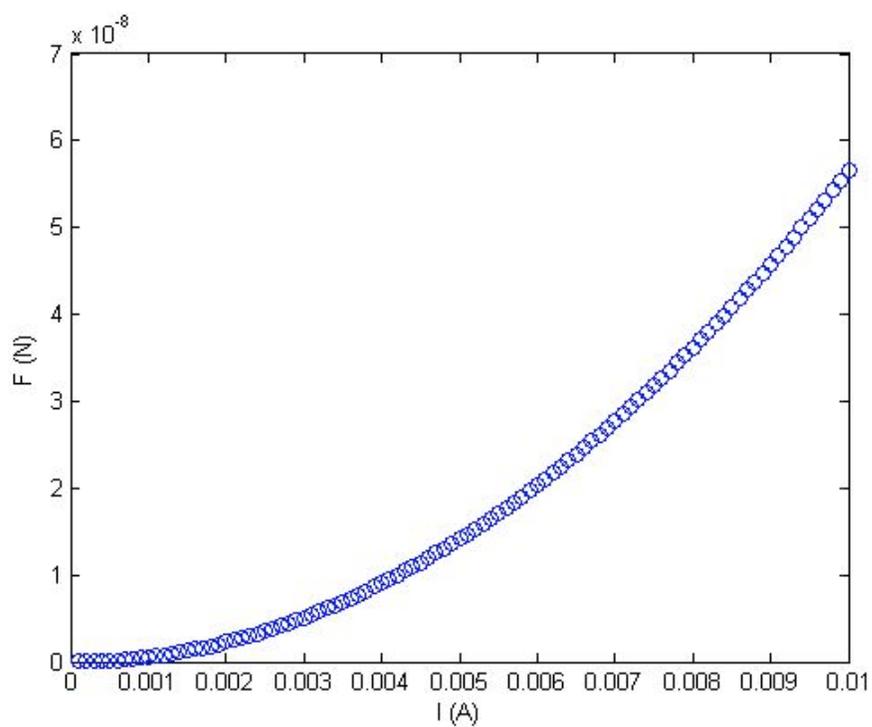


Figure 4.5 : graphe de la force portante en fonction du courant dans le solénoïde pour la détermination du courant minimal

Le tableau 4.1 présente les valeurs des paramètres utilisés pour le calcul théorique de la force portante de notre microélectroaimant.

Tableau 4.1 : valeurs des paramètres utilisés

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>
e	500 μm
d	300 μm
μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$
N	50
I	5 mA
F	14 nN

4.4 Description du logiciel de la plateforme

Notre microrobot étant mobile, il était nécessaire de concevoir un système de pistage capable de détecter son positionnement afin qu'il puisse recevoir en tout temps l'énergie lumineuse dont il a besoin pour fonctionner. En effet, nous avons développé, avec l'aide d'un étudiant à la maîtrise en génie informatique au laboratoire de nanorobotique de l'École Polytechnique de Montréal, un logiciel qui contrôle avec précision le déplacement des bactéries magnétotactiques placées sur une matrice formée de fils conducteurs (figure 4.7).

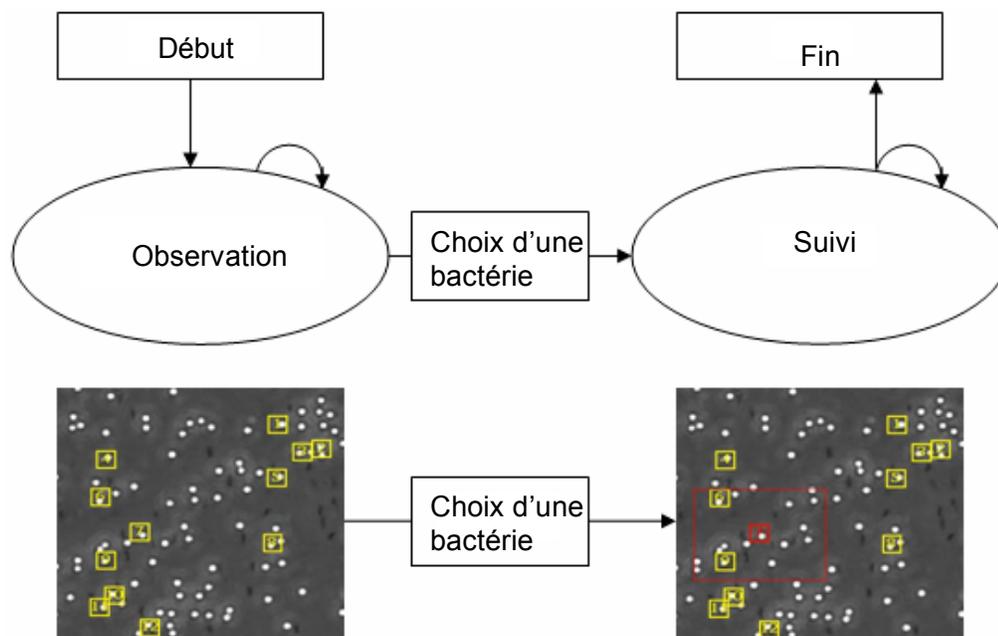


Figure 4.6 : architecture du système de pistage [AND06]

Nous avons ensuite adapté ce logiciel à la plateforme de propulsion de notre microrobot (figure 4.7 et 4.8).

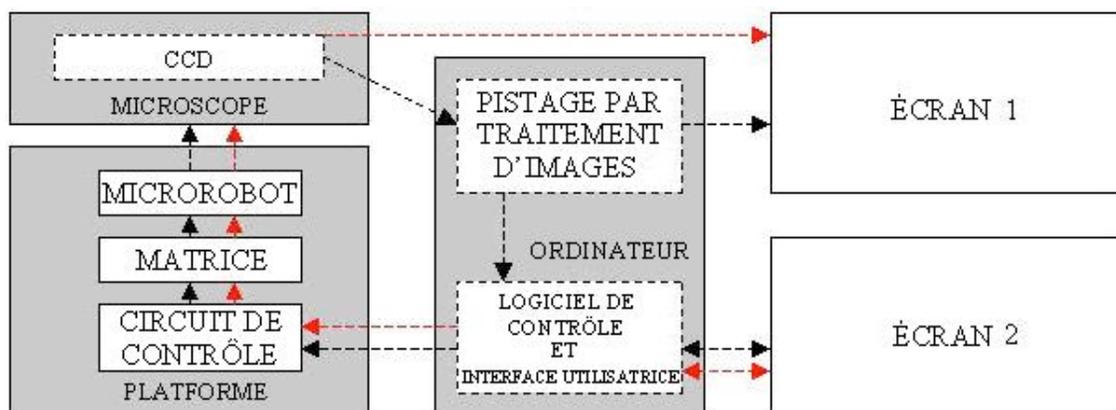


Figure 4.7 : architecture du système de pistage [AND06]

La figure 4.8 nous montre deux concepts que nous avons proposés et développés. Le premier concept fonctionne en boucle ouverte et requiert l'interaction avec l'utilisateur tel qu'illustré à la figure 4.8.

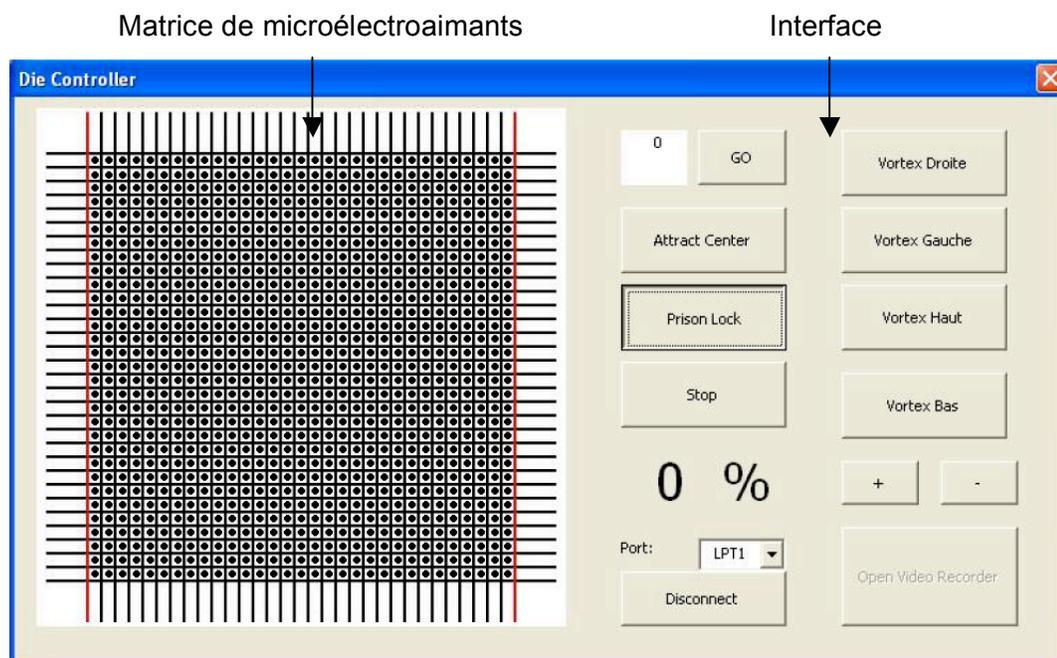


Figure 4.8 : Interface usagée [AND06]

Pour sa part, le second concept fonctionne en boucle fermée. Bien que ce second concept soit une adaptation du premier, il s'en distingue par l'ajout d'un module de traitement de l'image permettant le pistage et fournissant une rétroaction pour le contrôle automatique des bactéries.

4.5 Architecture du circuit pour l'injection du courant dans le microélectroaimant

L'architecture pour la génération des champs magnétiques est conçue de façon à ce que nous ne puissions commander qu'un seul microélectroaimant à la fois afin de minimiser la demande énergétique. La figure 4.9 présente l'architecture interne du circuit de contrôle des microélectroaimants visant à orienter la trajectoire du microrobot.

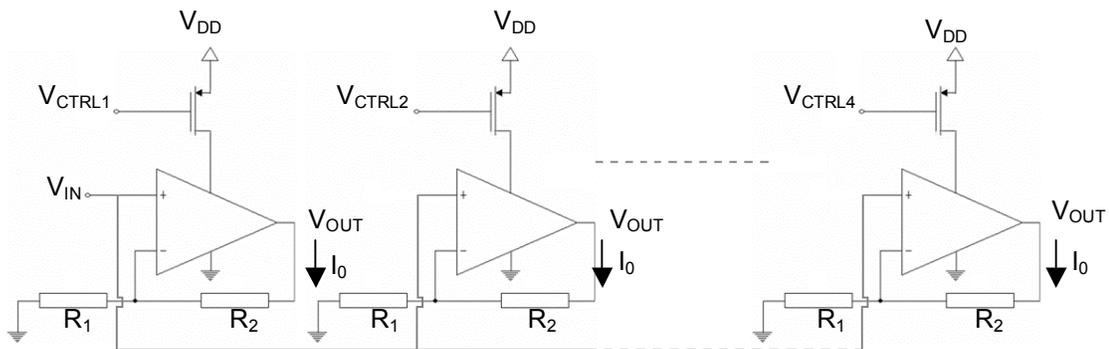


Figure 4.9 : circuit de génération de champ magnétique

Dans la figure 4.9, chaque configuration tension/courant utilise un transistor *PMOS* connecté à la tension d'alimentation V_{CTRL} qui sert d'activation. Les entrées V_{CTRL} sont connectées au décodeur de la figure 4.10 qui prennent des valeurs de 0 V ou de 1.8 V pour activer ou désactiver le *PMOS*. Ainsi, la configuration de l'amplificateur opérationnel en mode non inversé peut être utilisée comme convertisseur tension/courant afin de contrôler le courant dans les microélectroaimants.

$$G_m = \frac{i_0}{v_{in}} = \frac{-1}{R_1} \quad (4.8)$$

$$i_0 = \frac{-v_{in}}{R_1}$$

La figure 4.10 et 4.11 présentent le layout du circuit dans CADENCE tandis que la figure 4.12 présente la photomicrographie du circuit fabriqué.

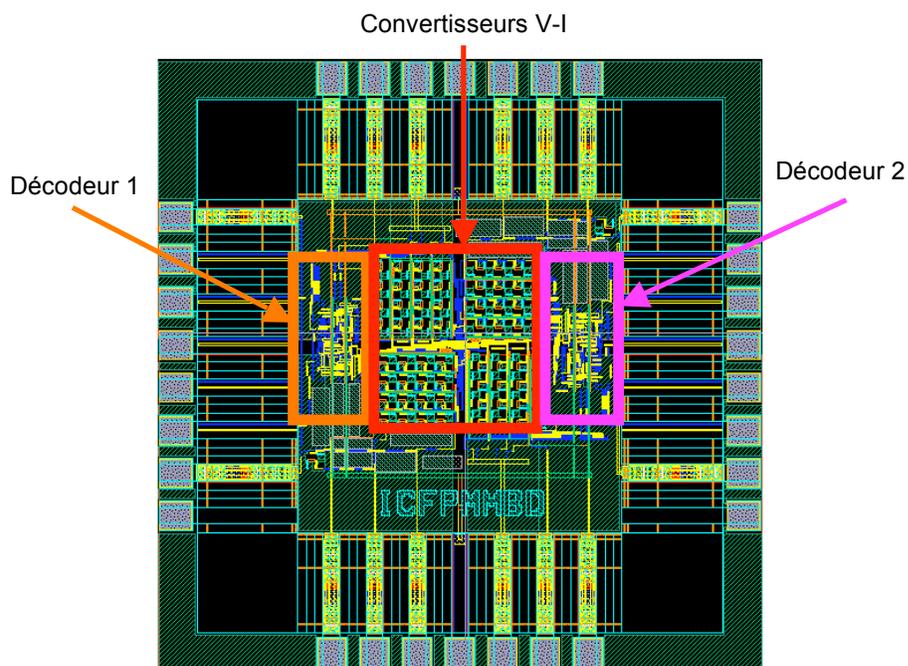


Figure 4.10 : layout du circuit de contrôle des microélectroaimants

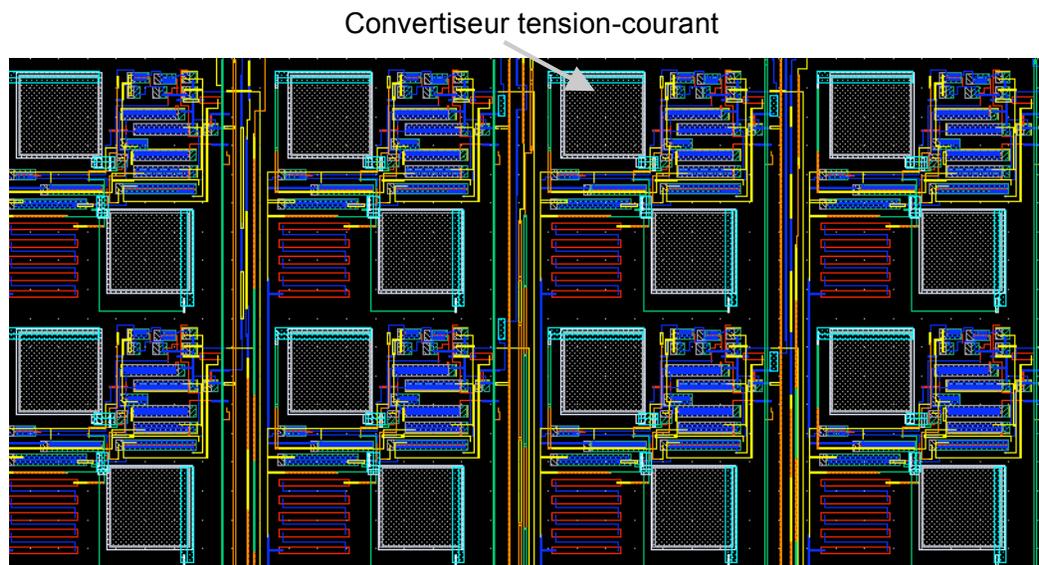


Figure 4.11 : layout des convertisseurs tension/courant utilisés pour générer le champ magnétique dans la matrice

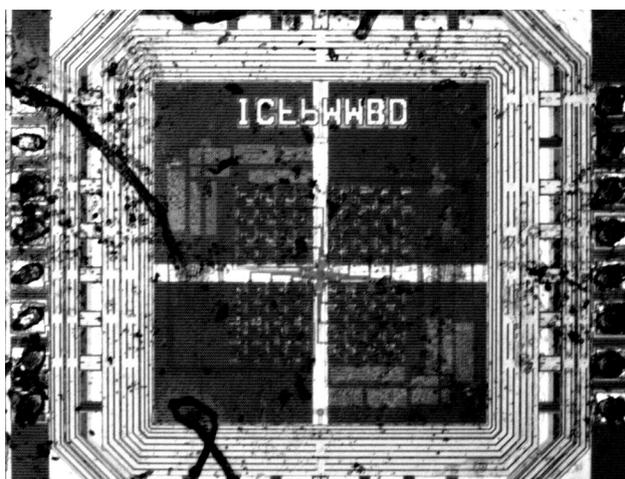


Figure 4.12: photomicrographie du circuit après fabrication

4.6 Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux des convertisseurs courant/tension.



Figure 4.13 : Setup expérimental

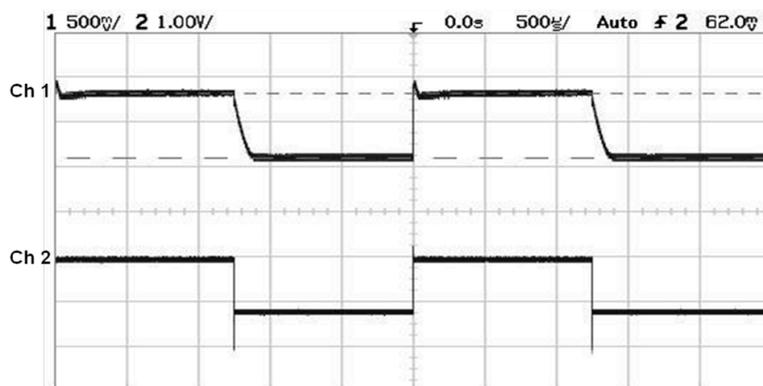


Figure 4.14 : Mesure expérimental de l'amplificateur en mode suiveur

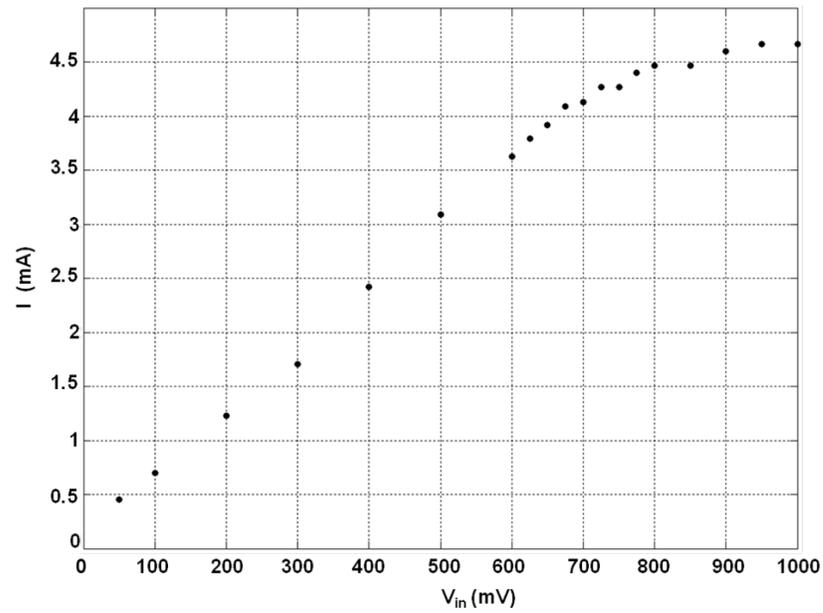


Figure 4.15: convertisseur tension-courant avec une plage de tension d'entrée V_{IN} qui varie entre 0.1 V et 1 V

Nous avons mesuré un courant maximal de 4.8 mA en pour une tension d'entrée de 0.6 V et une puissance maximale de 2.88 mW.

4.7 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement de la plateforme automatisée pour le contrôle de la trajectoire de notre microrobot. Nous avons également démontré la nécessité de développer un logiciel de pistage qui permet de localiser en temps réel la position du microrobot afin qu'il puisse être en tout temps exposé au rayon lumineux duquel il tire son énergie. De même, nous avons présenté les résultats des tests effectués sur la puce responsable de générer le courant dans la matrice de microélectroaimants. Enfin, dans le prochain chapitre nous allons effectuer des tests pour valider la possibilité d'utiliser les bactéries magnétotactiques comme système de propulsion pour les futurs microrobots à fabriquer. De même, dans le prochain chapitre, nous ferons certaines recommandations à l'égard des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse.

CHAPITRE 5

RECOMMANDATIONS

Dans le chapitre 3, nous avons présenté l'architecture du circuit microélectronique de notre microrobot. Dans la première version de notre microrobot, nous avons utilisé une architecture qui utilisait deux inductances, chacune ayant un diamètre de 50 μm . Pour diminuer la taille du microrobot, nous proposons une architecture pour notre circuit de télécommunication qui fait appel à une seule inductance. Dans la section 5.1 du présent chapitre, nous présentons cette nouvelle architecture pour le système de télécommunication.

5.1 Modification du circuit de télécommunication

La figure 5.1 présente une variante du circuit de génération des impulsions magnétiques qui substitue les transistors *PMOS* M_5 et M_8 à des transistors de type *NMOS*.

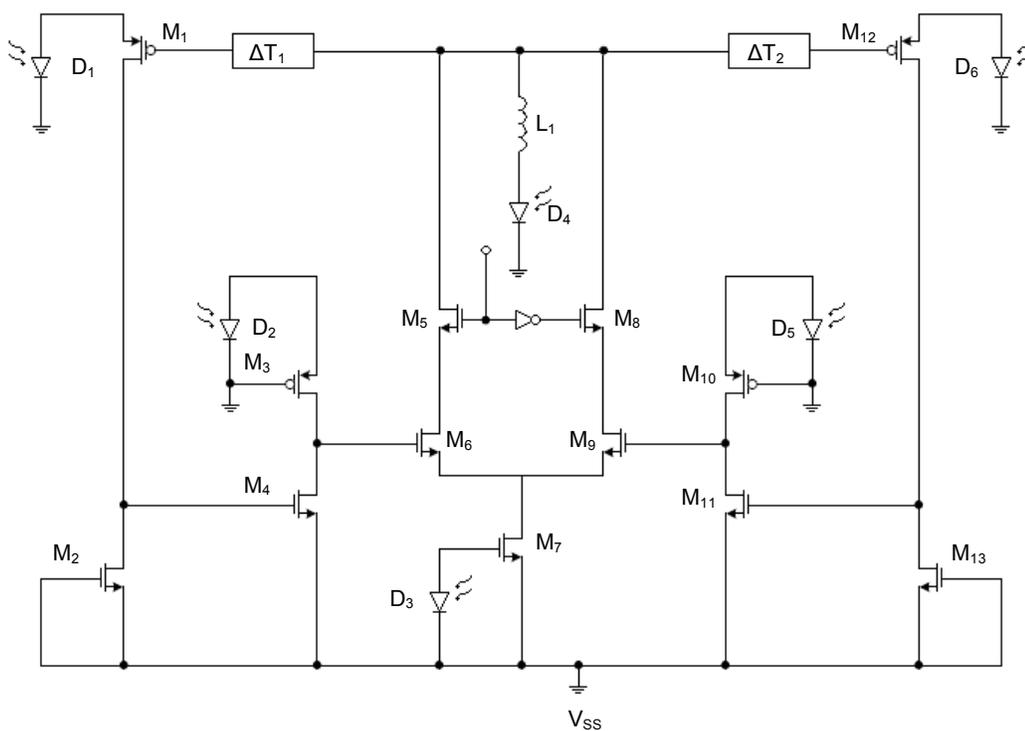


Figure 5.1 : modification apportée au circuit de génération d'impulsions magnétiques en fonction du niveau de la concentration ionique dans un médium

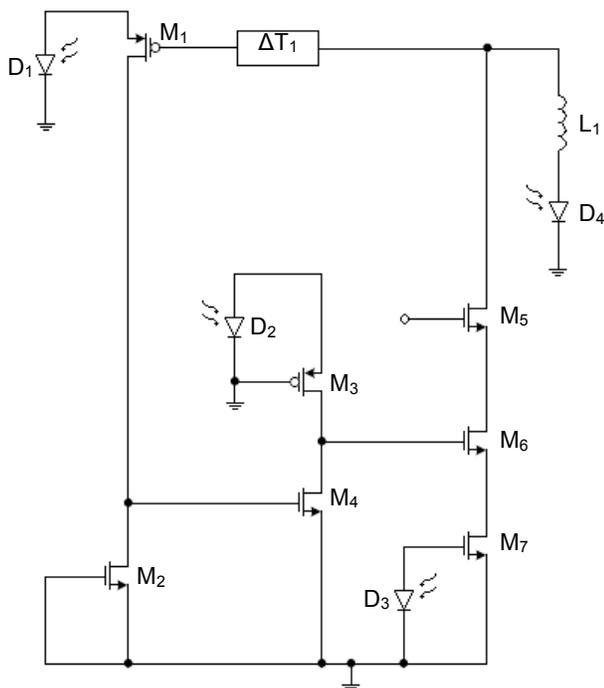


Figure 5.2 : réduction du circuit de génération d'impulsions magnétiques après l'activation du transistor M_5

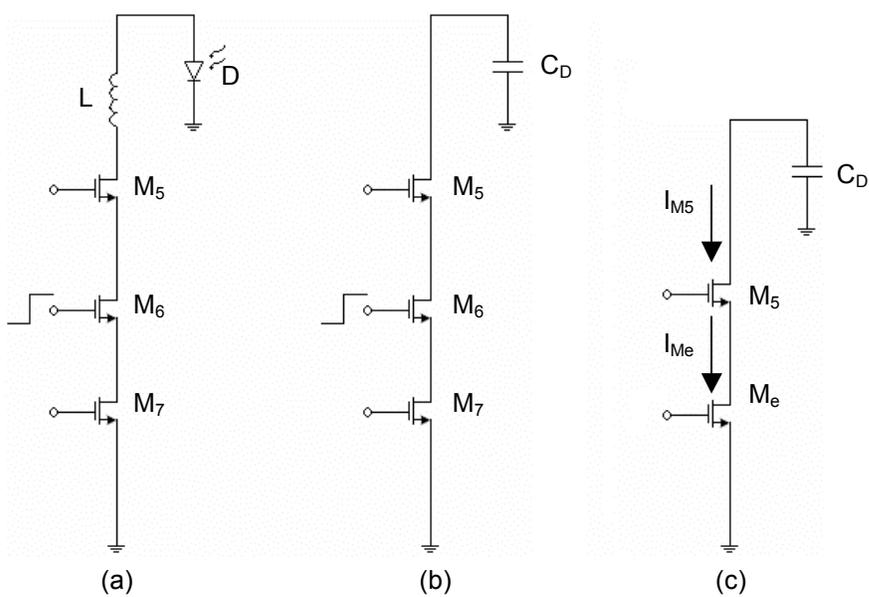


Figure 5.3 : modèle équivalent en inverseur

En remplaçant les transistors M_5 et M_8 par des NMOS, l'analyse est toujours la même. Cette dernière architecture, qui utilise une seule inductance, permettra de diminuer la taille du microrobot.

L'outil de CADENCE *Layout Virtuoso* est utilisé pour le layout de notre circuit qui est présenté à la figure 5.4. Ainsi, nous distinguons deux modules photovoltaïques $PV-1$ et $PV-2$. Le premier ($PV-1$) sert à alimenter le circuit du système de télécommunication de notre microrobot, tandis que le dernier ($PV-2$) est dédié au senseur. Nous distinguons également une inductance pour la génération du champ magnétique, un module de délai pour fixer à 1 kHz la fréquence d'oscillation du circuit, un module de contrôle qui est responsable de la modulation de l'amplitude du courant à travers l'inductance. Finalement, une boîte noire qui représente le *ISFET* qui sera fabriqué avec le procédé standard *CMOS* 0.13 μm .

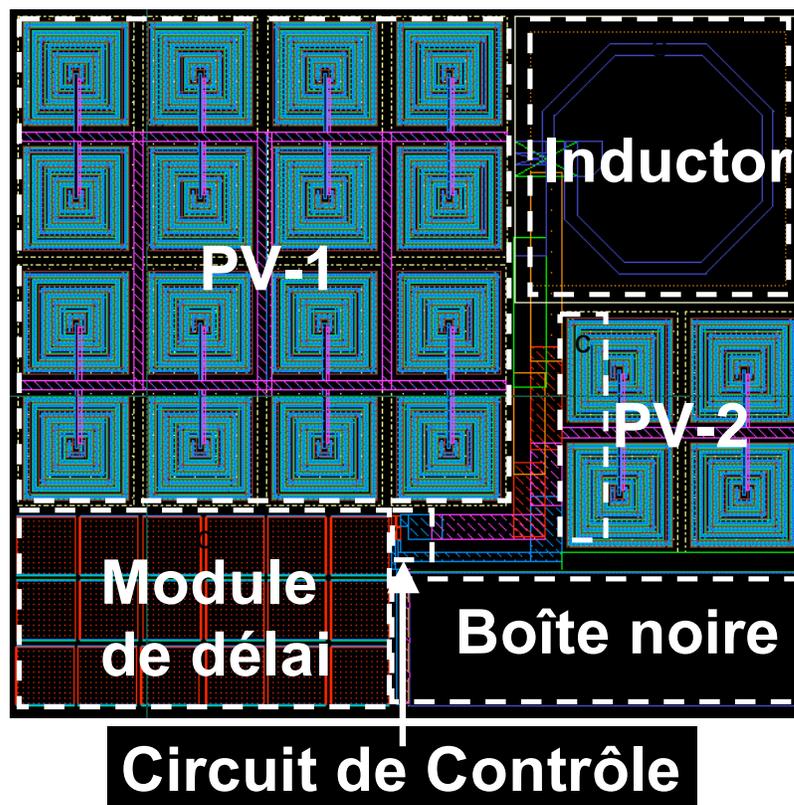


Figure 5.4 : layout du circuit dans CADENCE

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé un capteur qui détecte le niveau de la concentration ionique dans un milieu et qui permet à notre microrobot d'orienter sa trajectoire dans un milieu aqueux.

Pour une éventuelle application des microrobots à titre d'outils de diagnostic, nous considérons qu'un capteur *ISFET* qui permet de détecter les fluctuations du niveau du pH serait plus approprié, ce dernier pouvant être utilisé comme indicateur de l'état de santé d'un malade. À titre d'exemple, les cellules saines ont un niveau de pH se situant autour de 7.35, alors que les cellules cancéreuses présentent un niveau de pH se situant généralement entre 6.5 et 7. Cette diminution du niveau de pH s'explique par le fait que

la membrane des cellules cancéreuses agit comme un filtre qui empêche l'absorption du magnésium dans le cytoplasme, lequel est responsable de l'alimentation de ce dernier en oxygène. Privé d'oxygène par la membrane, le milieu intracellulaire s'acidifie.

5.2 Utilisation des bactéries magnétotactiques comme système de propulsion

Selon les résultats de certains calculs préliminaires effectués sur les cellules photovoltaïques servant à alimenter notre microrobot, la taille des prochaines générations de celui-ci pourrait être réduite jusqu'à 150 μm par 300 μm . Cela étant, nous avons effectué des expériences au laboratoire de nanorobotique de l'École Polytechnique de Montréal afin de vérifier la possibilité d'utiliser les bactéries magnétotactiques comme système de propulsion d'un microrobot réduit à ces dernières dimensions. Ce type de bactéries a été introduit brièvement au chapitre premier. Nous mentionnons que leur vitesse est comprise entre 200 à 300 $\mu\text{m} / \text{s}$ et qu'elles exhibent une force de 4.5 pN de poussée.

Lors de nos expériences, nous avons contrôlé un essaim de 3000 bactéries du type MC-1 destinées à propulser un micro objet mesurant une centaine de micromètres [MAR09]. Les résultats de nos expériences furent fructueux et sont présentés à la figure 5.5.

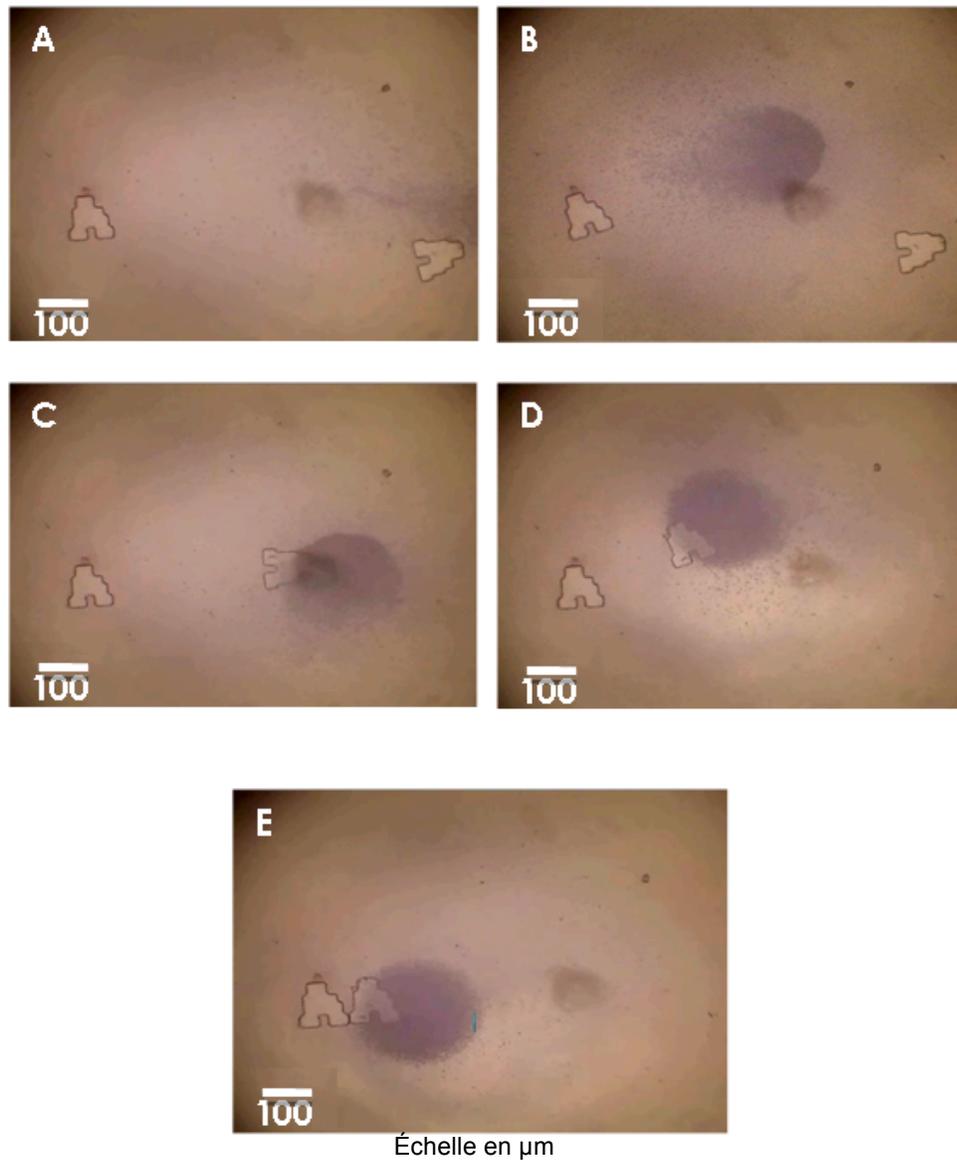


Figure 5.5 : un essaim de 3000 bactéries déplaçant un micro objet [MAR09]

5.3 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté les travaux qui doivent être complétés ainsi que des recommandations. Au niveau de l'architecture du circuit du système de communication, nous proposons un circuit dans lequel une seule inductance est utilisée pour la génération d'impulsions magnétiques, ce qui permet de réduire davantage la taille du microrobot.

De plus, dans ce chapitre nous avons effectué des tests en utilisant les bactéries magnétotactiques pour pousser sur des micro objets dont la taille est environ de 100 μm . Les tests ont été conduits avec succès et ont ouvert la voie sur la possibilité d'utiliser les bactéries magnétiques comme système de propulsion.

CONCLUSION

Les immenses progrès dans le domaine de la fabrication des circuits microélectroniques font d'eux des dispositifs des plus sollicités dans le domaine médical afin d'établir, par exemple, des diagnostics médicaux ou pour détecter des bactéries pathogènes dans le sang. De même, les recherches sur les microrobots visant à mesurer leur potentiel à titre d'instruments chirurgicaux augmentent de façon exponentielle. Cependant, les dimensions atteintes jusqu'à présent posent problème.

C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé et fabriqué un microrobot qui surpasse les contraintes d'alimentation, de communication et de propulsion. En effet, le microrobot que nous avons conçu, qui mesure $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m} \times 260\ \mu\text{m}$ comprenant un système de communication, est autonome et autoalimenté par des cellules photovoltaïques. De plus, il est doté d'un système de communication basé sur la génération d'impulsions magnétiques. Notre microrobot est capable de détecter le niveau de la concentration ionique du médium dans lequel il évolue pour ensuite décider de sa trajectoire. Son déplacement est contrôlé par un système de propulsion basé sur des champs magnétiques.

Nous avons opté pour les cellules photovoltaïques comme source d'alimentation de notre microrobot, celles-ci s'étant avérées être une option intéressante dans la mesure

où notre microrobot n'utilise aucun composant requérant beaucoup d'énergie pour son fonctionnement.

Ainsi, nous avons proposé une architecture de la cellule photovoltaïque pour augmenter la surface de son aire utile. Les premières cellules photovoltaïques ont été fabriquées avec la technologie *CMOS* 0.18 μm . Les résultats de nos tests ont indiqué qu'elles fournissent un courant de court-circuit variant entre 40 et 70 μA . Cela étant, nous avons été en mesure de conclure que les cellules photovoltaïques fournissent suffisamment d'énergie pour alimenter des circuits à faible tension. Ainsi, les tests réalisés ont permis de confirmer la pertinence de l'architecture proposée.

Les résultats obtenus avec les cellules photovoltaïques fabriquées avec la technologie *CMOS* 0.18 μm ne diffèrent pas de ceux obtenus avec la technologie *CMOS* 0.13 μm , soit celle que nous avons utilisée pour fabriquer notre microrobot. Ainsi, en choisissant la technologie *CMOS* 0.13 μm , nous réduisons la demande énergétique, les tensions grille et drain passant de 1.8 V à 1.3 V.

La seconde étape de notre projet était de concevoir le circuit interne de notre microrobot, c'est-à-dire le circuit de détection et de communication unidirectionnelle. Le système de communication que nous avons proposé est basé sur la génération des impulsions magnétiques et n'avait jamais été proposé auparavant. Ce système, une fois intégré à notre microrobot, a permis une utilisation efficace de la puissance fournie par les cellules photovoltaïques.

La dernière étape de notre thèse était la conception d'une plateforme automatisée pour le contrôle de la trajectoire de notre microrobot. La plateforme automatisée de propulsion que nous avons conçue est prévue pour contrôler une matrice de microélectroaimants. Une autre option serait donc d'utiliser les bactéries magnétotactiques comme systèmes de propulsion.

La possibilité, pour notre microrobot, de communiquer avec un ordinateur externe permet d'espérer, dans un proche avenir, l'utilisation des microrobots à des fins thérapeutiques, c'est-à-dire pour la détection des bactéries pathogènes dans le sang ou des tumeurs cancéreuses. Cependant, avant d'en arriver là, il faudra revoir le système d'alimentation de notre microrobot, celui-ci étant privé de sa source d'alimentation lorsque placé à l'intérieur du corps humain. C'est pourquoi, lors de la conception de notre cellule, nous avons effectué des simulations en tenant compte des longueurs d'onde dans le domaine de l'infrarouge qui a une très grande profondeur de pénétration dans le corps humain.

Malgré les divers ajustements nécessaires à l'amélioration de notre microrobot, les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse constituent une avancée scientifique dans le sens qu'ils permettent l'intégration, sur un même microrobot, de l'électronique et d'un système d'alimentation et de communication

Les travaux effectués dans cette thèse sont pionniers puisque peu d'efforts ont été déployés dans le domaine de la conception de microrobots intelligents. Bien que

nous ayons démontré des nouvelles techniques qui pourraient contribuer au développement de la microrobotique, nous sommes conscients qu'il reste encore beaucoup de travail à faire, ce domaine étant encore très jeune.

BIBLIOGRAPHIE

- [ABB08] J. J. Abbott, K. E. Peyer, L. Dong, B. J. Nelson, "How Should Microrobots Swim?," The 13th Int. Symposium of Robotic Research, Hiroshima, Japan, NOV. 2007.
- [ADL96] V. Adler and E. G. Friedman, "Delay and Power Expressions for a CMOS Inverter Driving a Resistive-Capacitive Load," IEEE Proceedings, International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 101-104, 1996.
- [ALL93] R. M. Allen and H. P. Bennett, "Microbial Fuel Cells," Applied Biochemistry and Biotechnology, Vol. 39/40, pp. 27-40, 1993.
- [AND06] W. Andre, B. Moufarrej, and S. Martel, "Towards Bacterial Microfactories," 5th International Workshop on Microfactories (IWMF), Besançon, France, Oct. 25-27, 2006.
- [ARI06] Y. Arimata and M. Ehara, "On-chip Solar Battery Structure for CMOS LSI," IECE Electron. Express, Vol. 3, No. 13, pp. 287-293, 2006.
- [ARM92] J. P. Armitage, "Bacterial Motility and Chemotaxis," Sci. Progr., Vol. 76, pp. 451-477, 1992.
- [BAI04] Y. Baily, "Control of a high Dexterity Micro-robot based Catheter for Aortic Aneurysm Treatment," IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Vol 1, pp. 465-472, Dec. 2004.
- [BER72] H. C. Berg and D. A. Brown, "Chemotaxis in Escheria Coli Analyzed by three-dimensional tracking," Nature, Vol. 239, pp. 500-504, 1972.

- [BLA75] R. P. Blakemore, "Magnetotactic Bacteria," *Science*, Vol. 190, pp. 377-379, 1975.
- [BLA79] R. P. Blakemore, D. Martea, and R. S. Wolfe, "Isolation and Pure Culture of freshwater Magnetic Spirillum in Chemically Defined Medium," *Journal Bacteriol*, Vol. 140, pp. 720-729, 1979.
- [BAZ88] D. A. Bazylinsky and R. B. Frankel, "Anaerobic Production of Magnetite by a Marine Magnetotactic Bacterium," *Nature*, Vol.334, pp. 518-531.
- [BAZ99] D. A. Bazylinsky, "Synthesis of the Bacterial Magnetosome: The Making of a Magnetic Personality," *Journal Microbiol*, Vol. 2, pp. 71-80, 1999.
- [BER03] On line documentation, "Physicists build World's smallest Motor using Nanotubes and etched Silicon", Online, UC Berkeley, medias release, JUL. 2003.
- [BSI01] On line documentation, "<http://www.ece.uci.edu/docs/hspice>"
- [BUT07] Butzen P. F, A. I. Reis, C. H. Kim, and R. P. Ribas, "Modeling and Estimating Leakage Current in Pass Transistor Logic Networks," *Proceedings of the 17th ACM Great Lakes Symposium on VLSI*, Stresa-Lago Maggiore, Italy, pp. 269-274, 2007.
- [CAO06] C. CAO and K. O. Kennet, "A 140-GHz Fundamental Mode Voltage-Controlled Oscillator in 90-nm CMOS Technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 16, No. 10, OCT. 06.
- [CAP03] G. Caprari, "Autonomous Microrobot Applications and Limitations," *École Polytechnique Fédérale de Losane*, Thesis No. 2753, pp. 36-37, 2003.

- [CAU67] D. M. Caughey and R. E. Thomas, "Carrier mobilities in Silicon Empirically related to Doping and Field," IEEE Proceedings, Vol. 55, pp. 2192-2193, 1967.
- [CHA03] S. Chaudhuri and D. Lovley, "Electricity Generation by Direct Oxidation of Glucose in Mediatorless Microbial Fuel Cells," Nature Biotechnology, Vol. 21 (10), pp. 1229-32, 2003.
- [DEM02] F. Demarthon, "Les bactéries ne perdent pas le Nord," Info. Science, le quotidien en Ligne, Science, Vol. 282, pp. 1868-1870, 2002.
- [DEV98] B. Devouar, M. Posfai, X. Hua, D. A. Bazylinsky, R. B. Frankel, and P. R. Buseck, "Magnetite from Magnetotactic Bacteria: Size Distributions and Twinning," American Mineralogist, Vol. 83, pp. 1387-1398, 1998.
- [DIA92] J. C. Diaz-Rizzi and J. L. Kirschvink, "Magnetite Domain State and Coercivity Predictions for Bionic Greigite (Fe₃S₄): A Comparison of Theory with Magnetosome Observations," Journal Geophys. Res. Vol. 97, pp. 17309-17315, 1992.
- [DON08] Y. Dongdong, Y. Guozheng, W. Kundong, and M. Guanying, "Development of Micro-robot for Endoscopes based Wireless Power Transfert," Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies, Vol. 17, Issue 3, pp. 181-189, 2008.
- [EBE99] T. Ebefors, J. U. Mattsson, E. Kalvesten and Stemm, "A Walking Silicon Micro-robot," IEEE, The 10th Int. Conference on Solid-State Sensors and actuators (Transducer '99), Sendai, Japan, pp. 1202-1205, JUN. 1999.

- [EDD03] J. Edd, S. Payen, B. Rubinsky, M. Stoller, and M. Sitti, "Biomimetic Propulsion for a Swimming Surgical Micro-Robot," Proceeding IEEE/RSJ, Intelligent Robots and Systems, Vol. 3, pp. 2583-2588, OCT. 2003.
- [EIS91] W. Eisenman and M. Kohl, "Power Calculation for High Density CMOS Gate Arrays," Euro ASIC'91, pp. 198-203, MAY 1991.
- [FAR90] M. Farina, D. M. S. Esquivel, H. G. P. Lins de Barros, "Magnetic Iron-Sulfure Crystals from a Magnetotactic Microorganism," Nature, Vol. 343, pp. 256-258, JAN. 1990.
- [FOR91] R. M. Ford, B. R. Phillips, J. A. Quinn, D. A. Lauffenburger, "Measurement of Bacterial Random Motility and Chemotaxis Coefficients. I, Stopped-flow Diffusion Chamber Assay," Biothech. and Bioeng., Vol. 37 (7), pp. 647-660, 1991.
- [FRA79] R. B. Frankel, R. P. Blakemore, and R. S. Wolfe, "Magnetite in Freshwater Magnetotactic Bacteria," Science, Vol. 3, pp. 1355-1356, 1979.
- [FRA80] R. B. Frankel and R. P. Blakemore, "Navigational Compass in Magnetic Bacteria," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 15, pp. 1562-1564, JAN. 1980.
- [FRA97] R. B. Frankel, D. A. Bazylinski, Mark S. Johnson, and B. L. Taylor, "Magneto-Aerotaxis in Marine Coccoid Bacteria", Biophysical Journal, Vol. 73, pp. 994-1000, AUG. 1997.
- [GAO05] J. Gao, "Inductive Power Transmission for Untethered Micro-Robots," IEEE, The 31st Annual Conference on Industrial Electronics Society, NOV. 2005.

- [GOW98] A. Goetsberger, J. Knobloch, and B. Vos, "Crystalline Silicon Solar Cell", Book style, John Willey and Sons Ltd., pp. 39, 1998.
- [HEY03] U. Heyen and D. Schuller, "Growth and Magnetosome Formation by Microaerophilic Magnetospirillum strains in Oxygen-Controlled Fermentor," Appl. Microbiol Biotechnol, Vol. 61, pp. 536-544, FEB. 2003.
- [HIR02] M. Hirose, "Challenge for Future Semiconductor Development," IEEE, Micropress and Nanotechnology, International Conference, pp. 2-3, NOV. 2002.
- [HIT06] M. Usami, A. Sato, H. Tanabe, et al, "An SOI-Based 7.5 μm -Thick 0.15 \times 0.15 mm² RFID Chip," IEEE, Solid-State Circuits Conference, *ISSCC 2006* Digest of Technical Papers, pp. 308 – 309, FEB 2006
- [HIT 07] M. Usami, H. Tanabe, A. Sato, et al, "A 0.0A – 0.05 mm² RFID Chip with Easy Scaled-Down ID-Memory," IEEE, Solid-State Circuits Conference, *ISSCC 2007*. Digest of Technical Papers, pp. 482-483, FEB. 2007.
- [HOL03] S. Hollar, A. Flynn, C. Bellew, and K. S. J. Pister, "Solar Powered 10 mg Silicon Robot, " IEEE, The 16th Annual Int. Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Kyoto, Japan, pp. 706-711, JAN. 2003.
- [IWA04] H. Iwai, "Future of CMOS technology," IEEE, Semiconductor Manufacturing Technology Workshop Proceedings, pp. 5-17, SEP. 2004.
- [JOR90] W. E. Jorg Fassbender, H. Stanjek, and H. Vali, "Occurrence of Magnetic Bacteria in Soil, " Nature, Vol. 343, pp. 161-163, JAN. 1990.

- [KAL07] S. Karl, P. V. Bhanu, "Design and Modeling of ISFET for pH sensing," Indian Inst. Of Technol., Kharagpur, pp. 1-4, NOV. 2007.
- [KEN06] C. CAO and K. O. Kennet, "Millimeter-Wave Voltage-Controlled Oscillators in 0.13- μ m CMOS Technology," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 41, No. 6, JUN. 2006.
- [MAR06] S. Martel, S. Ngakeng, and G. Langlois, "Controlled Manipulation and Actuation of Micro-Objects with Magnetotactic Bacteria," Applied Physic Letters, Vol. 89, DEC. 2008.
- [MAR07] Martel S. and Mohammadi M., "High throughput controlled bacterial transport using geometrical fluidic microchannels or 3D microfibers structures" The 11th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (μ TAS), Paris, France, Oct. 7-11, 2007.
- [MAR07] S. Martel, "Automatic Navigation of an Untethered Device in the Artery of a living Animal Using a Conventional Magnetic Resonance Imagery System," Applied Physic Letters, Vol. 90, No. 10, MAR. 2007.
- [MAR09] S. Martel, W. Andre, M. Mohammadi, and Z. Lu, "Towards Swarms of Communication-enable and Intelligent Sensotaxis-based Bacterial Microrobots Capable of Collective Tasks in an Aqueous Medium," The 2009 IEEE International Conference on Robotic and Automation ICRA 2009 (Accepted).

- [MAT91] T. Matsunaga, T. Sakaguchi, and F. Tadokoro, "Magnetite Formation by a Magnetic Bacterium Capable of Growing aerobically," *Appl. Microbiol, Biotechnol*, Vol. 35, pp. 651-655, APR. 1991.
- [MEL93] F. C. Meldrum, B. R. Heywood, S. Mann, R. B. Frankel, and D. A. Bazylinski, " Electron Microscopy Study of Magnetosomes in a Cultured Coccoid Magnetotactic Bacterium," *Proceedings – Royal Society of London. Biological sciences*, Vol. 251, No. 1332, pp. 231-236, 1993.
- [MOS08] On Line documentation, "<http://www.mosis.com/test/>".
- [PAR00] D. Park and J. Zeikus, "Electricity Generation in Microbial Fuel Cells Using Neutral Red as an Electronophore," *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 66, No. 4, pp. 1292-1297, APR. 2000.
- [PAT05] K. R. Patel, D. R. Nasby, J. D. Stein, H. A. HSIA, and S. R. Bennett, "High Voltage Series connected Si Photovoltaic Cells," *Proceedings of SPIE, Conference, San Diego, CA*, Vol. 5871, pp. 58710F.1-58710F.8, AUG. 2005.
- [PIP03] J. Piprek, "Semiconductor Optoelectronic Device: Introduction to Physics and Simulation," Book style, Academic Press, Elsevier Science, pp. 64-70, 2003.
- [RAD03] S. Radomanovic, A. J. Anneoma, and B. Nauta, "High Speed Lateral Polysilicon Photodiode in Standard CMOS technology," *Proceedings of the 33rd European Solid-State Device Research (ESSDERC'03)*, pp. 521-524, 2003.

- [RAD06] S. Radomanovic, A. J. Anneoma, and B. Nauta, "High Speed Photodiodes in Standard CMOS technology," Book style, The Springer International Series in Engineering and Computer Science, Vol. 869, 2006.
- [RIC02] C. J. Richard, "Introduction to Microelectronic Fabrication," Book style, Modular Series on Solid State Devices, 2nd ed., Prentice Hall, Vol.5, pp. 77, 2002.
- [SAK93] T. Sakaguchi, J. G. Burgess, and T. Matsunaga, "Magnetic Formation by a Sulphate Reducing Bacterium," Nature Vo. 365, pp. 47-49, 1993.
- [SED04] A. S. Sedra and K. C. Smith, "Microelectronic Circuits," 5th ed., Oxford Series in Electrical and Computer Engineering, pp. 150-210, 2004.
- [SEO01] S. Seong and T. H. Park, "Swimming Characteristics of Magnetic Bacterium, Magnetospirillum sp. AMN-1, and Implication as toxicity Measurement" Journal Biotechnology and Bioengineering, Vol. 76, ISSUE 1, pp. 11-16, MAY 2001.
- [SHI98] T. Shibata, T. Sasaya, and N. Kawahara, "Microwave Energy Supply System for In-Pipe Micromachine," Proceedings of the International Symposium on Micromechatronics an Human Science, Nagoya, Japan, pp. 25-28, NOV. 1998.
- [SIM05] E. T. Simpson, T. Kasana, M. Posfar, P. R. Buseck, R. J. Harisson and R. E. Dunin-Borkowski, "Magnetic Induction Mapping of Magnetic Chains in Magnetotactic Bacteria at Room Temperature and Close to the Verwey

- Transition using Electron Holography,” *Journal Phys.*, Vol. 17, pp. 108-121, 2005.
- [SIT08] S. Floyd, C. Pawashe, and M. Sitti, “A Untethered Magnetically Actuated Micro-Robot Capable of Motion on Arbitrary Surfaces,” *IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, MAY, 2008.
- [SRI94] R. V. Srinivasa and N. Scheinberg, “Short-Circuit Power Dissipation Estimation for CMOS Logic Gates,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I Fundamental Theory and Applications*, Vol. 41, No. 11, NOV. 1994.
- [TAR05] T. B. Tarim, “Mixed Signal and SoC design Flow Requirements,” *IEEE, International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Kobe, Japan, pp. 23-26, MAY 2005.
- [TEX09] On line documentation, “<http://www.ti.com/sc/docs/msp/irda/default.html>”.
- [VOL08] K. Vollmers, “Wireless Resonant Magnetic Microactuator for Untethered mobile,” *Applied Physic Letters*, Vol. 92, No. 12, APR. 2008.
- [WAN05] C. Wang and F. Devos, “Design and Implementation of Electrical-Supply-Free VLSI circuits,” *Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings*, Vol. 152, No.3, pp. 272-278, JUN. 2005.
- [XUE93] H. Xuejie, C. Liqun, and H. Xuejie, C. Liqun and J. Schoonman, “All-solid state lithium microbatteries,” in *Journal, Power Sources, international meeting on Lithium microbatteries*, vol. 44, no 1-3, pp. 487-492, 1993.

- [YES06] K. Yesin, K. Vollmers, and B. J. Nelson, "Modeling and Control of Untethered Biomicrobots in a Fluidic Environment Using Electromagnetic Fields," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 25, No. 5-6, pp. 527-536, 2006.

ANNEXE A

Micro-photovoltaic Cells Designed for Magnetotaxis-based Controlled Bacterial Microrobots

Walder André and Sylvain Martel

NanoRobotics Laboratory,

Department of Computer and Software Engineering,

and Institute of Biomedical Engineering, École Polytechnique de Montréal (EPM),

Campus of the Université de Montréal, Montréal, Canada

Publication source:

IEICE Electronic Express, Vol. 5, No.3, 101-106

Abstract: A new architecture allowing an increase of the photocurrent of a photovoltaic cell fabricated with a *CMOS* 0.18 μm process is described. This cell has been designed specifically to power the onboard electronics of a 400 μm \times 600 μm untethered microrobot propelled by magnetotactic bacteria (*MTB*). Four cascaded cells of an area of 200 μm \times 200 μm each, provide a short circuit current of 70 μA and an open voltage of 0.48 V from a 555 nm 150 Watts commercial incandescent bulb. Experimental results show a power/area of the photocell of ~ 110 $\text{pW}/\mu\text{m}^2$.

Keywords: Photovoltaic cell, microelectronic, photonic, system-on-chip

Classification: Integrated circuits

1. Introduction

CMOS technology has been chosen here to implement low power circuitry to be embedded in a new type of aqueous untethered microrobots. For collecting photons to power the onboard electronics, it is not possible in *CMOS* technology to build *P-I-N* photodiodes or resonant cavity photodiodes, but only planar photodiodes. However, planar photodiodes are not as efficient as *P-I-N* and resonant cavity photodiodes. Typically, the ratio of active area is often responsible for the poor efficiency of the planar photodiodes. They are often made of only one *PN*-junction and since the diffusion lengths in the *P* and *N*-type junctions are small, the output current is decreased accordingly. Few designs in the past have been proposed to improve the active area of the photodiode, such as the lateral polysilicon photodiode with responsivity of 1.20 mA/W [1]. However, because it does not take advantage of the vertically arranged *PN*-junctions as our proposed architecture does, the responsivity is less than the 5.6 mA/W at 555 nm recorded in our implementation.

Another design is the on-chip solar battery built in *CMOS* 0.35 μm technology ($200\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$) which does not take into account the lateral *PN*-junctions that also contribute to the photocurrent, and only produces a short circuit current of $\sim 0.42 \mu\text{A}$ at 10000 lx optical power [2], whereas our proposed design ($200\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$) provides

1.6 μA at 10000 lx. The proposed architecture makes use of the lateral PN -junctions, which are the P^+ and N^+ junctions and the vertical PN -junctions, which are the P^+ and the N -well junctions and the N^+ and the P -substrate junctions as depicted in Fig. 2.4 (a). The use of $CMOS$ technology to build the battery and power the internal circuit of the microrobot allows the integration over the same substrate of both microelectronic circuits and of the photocell.

2. Proposed architecture for a CMOS planar photocell

The creation of a depletion region occurs when a radiation with sufficient energy falls onto a silicon PN -junction, i.e. when its energy is greater than the energy band gap of the silicon. This is a consequence of the electrons moving from the valence band to the conduction band, therefore generating electron-holes pairs in the depletion region. This region is created without immediate recombination due to the presence of an internal field called built-in voltage potential. The electrons-holes pairs being created will diffuse onto a certain distance called the diffusion lengths L_n and L_p [3]. Therefore, the pairs of electrons-holes which are outside the diffusion zone will not contribute to the external flow of the photonic current since they recombine in the N and P -type semiconductors. Thus, having a very large single PN -junction does not imply that all the area will be used for photonic current conversion. Therefore, here, a new architecture of an on-chip photovoltaic module that allows the creation of more PN -junctions over a given surface area is proposed to increase the generated photocurrent. As depicted in Fig. 2.4 (a), alternate concentric squares of N and P -type semiconductors are implemented

[4]. This particular pattern creates a total of n lateral PN -junctions and $(n + 1)$ vertical PN -junctions. As a result, more depletion areas are obtained, increasing the drift and the diffusion currents. In this architecture, the first square has a surface area of A_0 the second $2A_0$, the third $3A_0$ and so on so that n -th square has a surface area of nA_0 . Equation 2.14 gives the expression for the photonic current, and shows the dependence of the photonic current on the diffusion lengths and the depletion region:

$$I = qG[A_0 + 2A_0 + 3A_0 + \dots + (n-1)A_0 + nA_0](L_n + L_p + W_d) \quad (2.13)$$

$$I = qGA_0 \frac{n(n+1)}{2}(L_n + L_p + W_d) \quad (2.14)$$

where A_0 is the area of the photocell first square from the center and G is the generation rate of holes and electrons pairs estimated to be equal to $3 \times 10^{21} / \text{cm}^3 \cdot \text{s}^1$. L_n and L_p are the diffusion lengths in the P and N -type semiconductor, W_d is the depletion width, and n is the number of concentric squares. The total area for one cell is $(200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$. Equation 2.14 takes into account only the lateral PN -junctions. If the vertical PN -junctions are considered it becomes:

$$I = qG \left(A_0 \frac{n(n+1)}{2} + A_{n0} \sum_0^n 2^i + A_{p0} \sum_0^n 2^i \right) (L_n + L_p + W_d) \quad (2.15)$$

where A_{n0} and A_{p0} are the areas of first square from the center of the N^+ and P^+ layers respectively. Since the doping concentration is the same, the values of L_n , L_p and W_d are the same for both lateral and vertical PN -junctions.

Fig. 2.4 (c) shows the equivalent circuit of the photocell; all the P^+ are connected together while all the N^+ are connected together via metal one, therefore putting all the created PN -junctions in cascade and increasing the output photonic current. Inside the dash circle are shown the different PN -junctions that can be formed, including lateral and vertical PN -junctions. Fig.2.4 (d) shows the photovoltaic module that is fabricated. It is able to provide a $70 \mu\text{A}$ short circuit current and an open voltage of 0.48 V . Fig. 2.4 (a) and 2 (b) show the results obtained for two different sizes of the photovoltaic modules, the first one is $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ and the other one is $200 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$. However, the voltage provided is not enough to perform a logic function because of the necessary threshold voltages that are approximately equal to 0.5 V and -0.5 V for $NMOS$ and $PMOS$ transistors respectively in $CMOS$ $0.18 \mu\text{m}$ processes [5]. According to the size constrain, we avoid increasing the size of the photocells which is one way to increase the actual power generated. Accordingly, one approach is to keep the onboard electronics of the microrobot minimal to perform a simple task. Since the microrobot is in die form and intended to operate in an aqueous medium, it is covered with a thin ($\sim 100 \text{ nm}$) transparent layer of parylene. Therefore, we show how light sensitivity has

been exploited in order to reduce the threshold voltage of the robot on-chip circuit, and the test results show a decrease in voltage from 0.5 V to 0.25 V.

3. Experimental results

In order to facilitate testing and validation, a *DIP* package has been used as depicted in Fig.2.4 (d). The cell is placed inside an enclosure to avoid ambient light. A 555 nm 150 Watts incandescent lamp is used to illuminate the photocell. A 500 k Ω potentiometer is used to draw the current voltage characteristics of the photocell. A multimeter (Fluke 189) is used to measure the photocurrent while an Agilent 54641A oscilloscope is used to measure the voltage across the photocell. The measurements are taken within 10 to 15 minutes after the high power of the bulb is switched on in order to avoid overheating the cells.

The measures are taken for two sizes of the proposed photovoltaic modules, which are 400 $\mu\text{m} \times 400$ and 200 $\mu\text{m} \times 400$ μm respectively. Fig. 2.5 (b) shows the measured current of the photocells for different light intensities, while Fig. 2.6 (a) shows that the 400 $\mu\text{m} \times 400$ μm circuit can operate with a weak incident light, and can produce an output open voltage of ~ 400 mV. Fig. 2.6 (b) shows the test result of a *VI* converter when exposed and then not exposed to an incident light. We see that the circuit begins to operate at a lower threshold voltage (~ 0.25 V) than when it was not illuminated (~ 0.5 V). This is a result of the accumulation of electrons and holes in the canals of the *NMOS* and *PMOS* transistors respectively. This result could be exploited to lower the energy requirement in the implementation of a control system for the microrobot.

4. Conclusion

The experimental results of a new architecture of a photovoltaic circuit fabricated with a *CMOS* 0.18 μm process are presented. This architecture allows the use of both lateral and vertical *PN*-junctions. The lateral *PN*-junctions are formed with the juxtaposition of alternate concentric squares of *P* and *N*-types in order to create more *PN*-junctions over the given surface of the photocell and hence increase the output photonic current. The vertical *PN*-junctions are formed by the *P*⁺ and the *N*-well, and the *N*⁺ with the *P*-substrate. A short circuit of 70 μA , and an open voltage of 0.48 V are measured for the 400 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ photocell that aims to power the onboard electronics of the untethered microrobot.

5. Acknowledgements

The project is supported in part by the Canada Research Chair (*CRC*) in Micro/Nanosystem Development, Fabrication, and Validation, the Canada Foundation for Innovation (*CFI*), the National Sciences and Engineering Council of Canada (*NSERC*) and the Government of Québec.

Figures

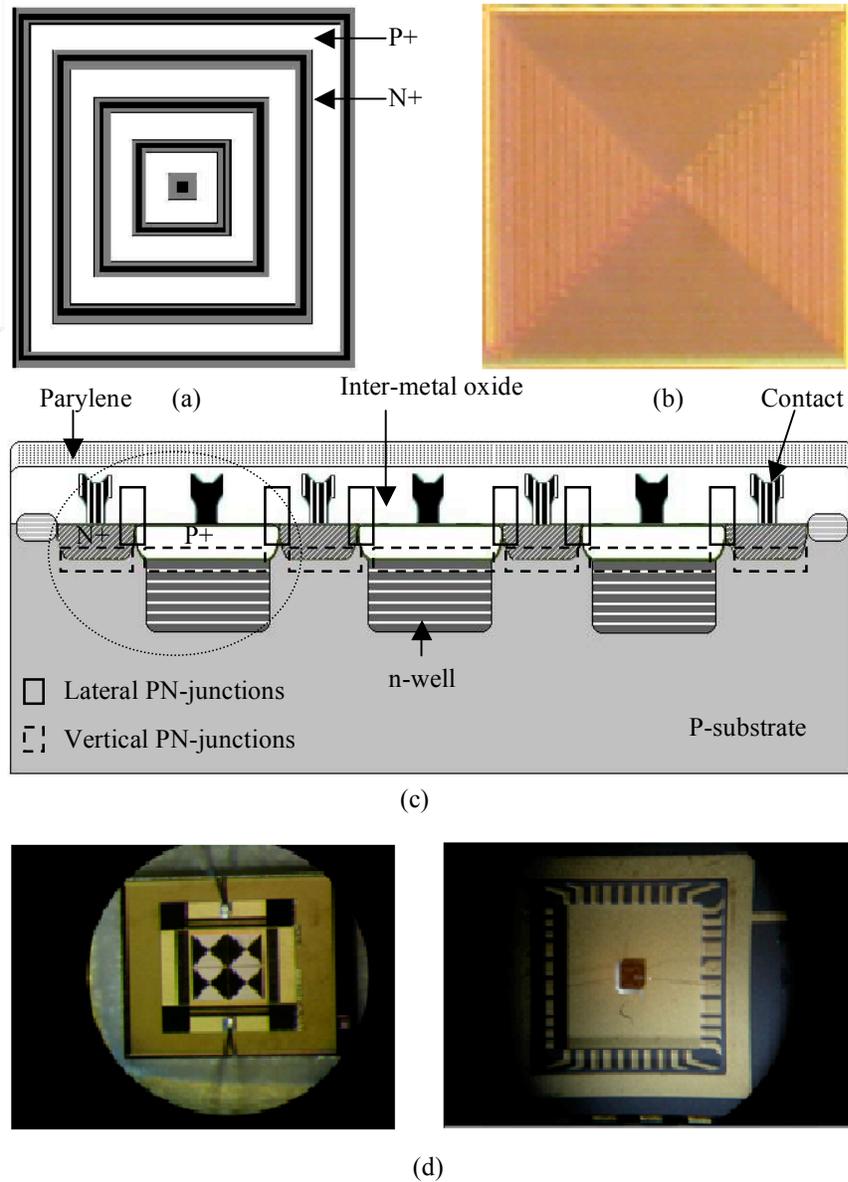


Figure 2.4: proposed architecture: (a) cross-sectional view of the lateral pn-junctions photodiode cell; (b) photomicrograph of the cell (c) cross-sectional view of the cell showing the lateral and the vertical pn-junctions (d) photomicrograph showing the cell in a package prior testing

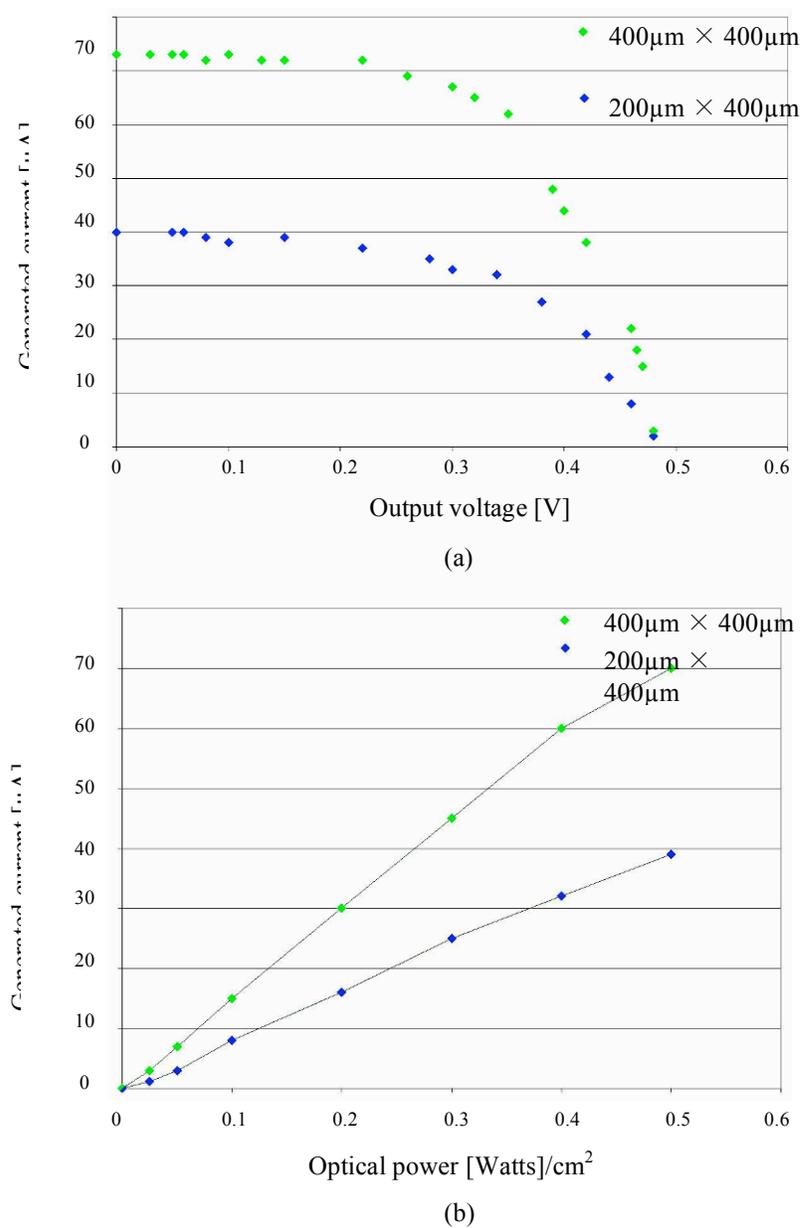


Figure 2.5: experimental results: (a) measured I-V characteristic of the photocell at 0.25 Watt/cm^2 light intensity (b) measured current of the photocell for different light intensities

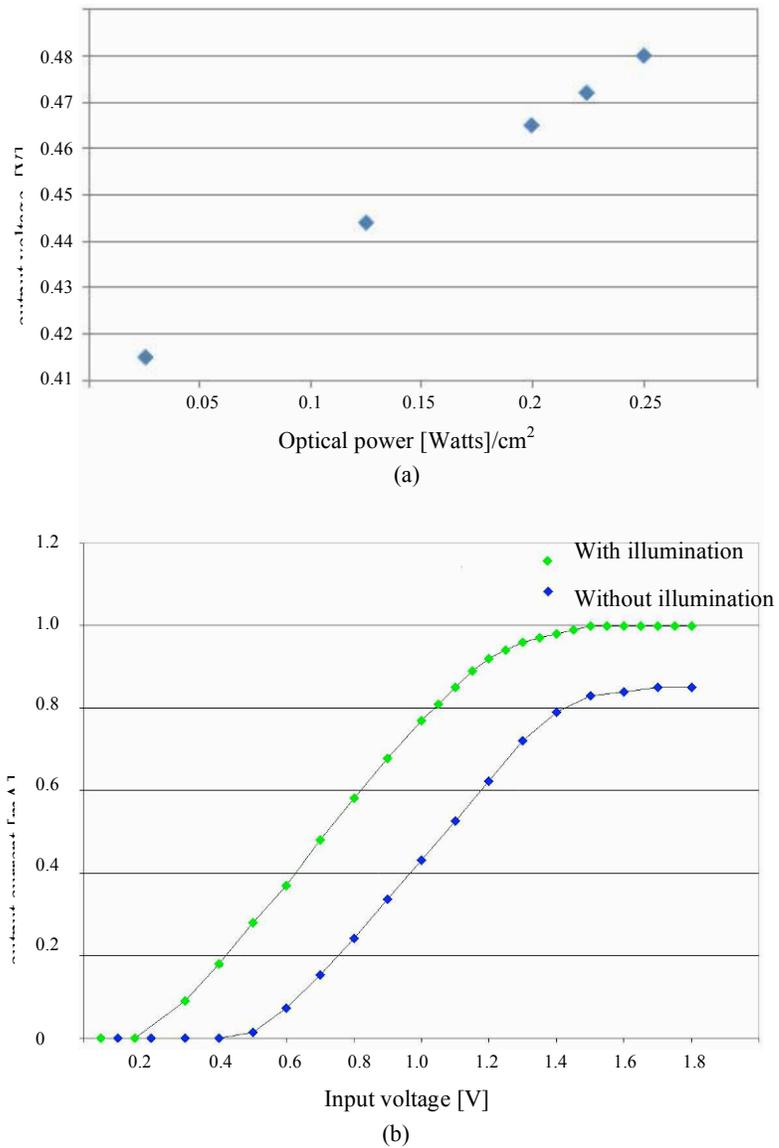


Figure 2.6 : experimental results: (a) measured voltage of the photocell for different light intensities (b) measured I-V for the VI converter with and without illuminations

References

- [1] S. Radovanovic, A. J. Annoma, and B. Nauta, “High-speed, lateral polysilicon photodiode in standard CMOS technology”, Proc. European Solid-State Device Research (ESSDERC’03), pp. 521-524, 2003.
- [2] Y. Arimata and M. Ehara, “On-chip solar battery structure for CMOS LSI”, IEICE Electron. Express, Vol. 3, No. 13, pp. 287-293, 2006.
- [3] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Book-Author, Book Title Microelectronic circuits*, 5th ed., Oxford series in electrical and computer engineering, pp. 150-210, 2004.
- [4] W. Andre and S. Martel, “Design of photovoltaic cells to power the electronics embedded in an untethered aqueous microrobots propelled by bacteria”, Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Beijing China, October 9-15, pp. 1335-1340, 2006.
- [5] Visit <http://www.mosis.org> for CMOS 0.18 μm parameters.

ANNEXE B

```

%////////////////////////////////////
%MATLAB PV CELL SIMULATION BY WALDER ANDRE
%////////////////////////////////////
%*****
%Carrier mobility doping concentration

VT = 25.86*10^(-3); % Thermal voltage
mu_0n = 1430; %cm^2/V*s, %max mobility (nodoping) for electron
mu_dop_n = 80; %cm^2/V*s, %minmobility for high doping density (electron)
mu_NDOP_n = 523.93; %cm^2/V*s (electron)
mu_0p = 460; %cm^2/V*s %max mobility (nodoping) for hole
mu_dop_p = 45; %cm^2/V*s %minmobility for high doping density (hole)
mu_NDOP_p = 87.44; %cm^2/V*s (hole)
alpha_n = 0.72;
alpha_p = 0.72;
N_ref_n = 1.12*10^17;
N_ref_p = 2.23*10^17;
NA = N_ref_n * ( ((mu_0n - mu_dop_n)/ (mu_NDOP_n - mu_dop_n )) -
1 )^(1/alpha_n);
ND = N_ref_p * ( ((mu_0p - mu_dop_p)/ (mu_NDOP_p - mu_dop_p )) -
1 )^(1/alpha_p);
Dn = mu_NDOP_n * VT;
Dp = mu_NDOP_p * VT;
%*****
%Electron hole-Hole Generation
%*****
C = 299.8* 10^6; % speed light
h = 6.6261*10^-34; %Js , %4.1357*10^15 eV % Planck constant
%lambda = 500*10^(-9): 50*10^(-9): 1100*10^(-9); %wavelength

```

```

%alpha_0 = [1*10^(4) 8*10^(3) 6*10^(3) 3*10^(3) 2*10^(3) 1.5*10^(3) 1*10^(3)
7*10^(2) 4.5*10^(2) 2*10^(2) 7*10^(1) 4*10^(1) 1*10^(1)];%3.08*10^3; % cm^-
%*****
% absorption coefficient of red in silicon
%*****

lambda0 = 500*10^(-9);
alpha_0 = 1*10^(4);
lambda1 = 550*10^(-9);
alpha_1 = 8*10^(3);
lambda2 = 600*10^(-9);
alpha_2 = 6*10^(3);
lambda3 = 650*10^(-9);
alpha_3 = 3*10^(3);
lambda4 = 700*10^(-9);
alpha_4 = 2*10^(3);
lambda5 = 750*10^(-9);
alpha_5 = 1.5*10^(3);
lambda6 = 800*10^(-9);
alpha_6 = 1*10^(3);
lambda7 = 850*10^(-9);
alpha_7 = 7*10^(2);
lambda8 = 900*10^(-9);
alpha_8 = 4.5*10^(2);
lambda9 = 950*10^(-9);
alpha_9 = 2*10^(2);
lambda10 = 1000*10^(-9);
alpha_10 = 7*10^(1);
lambda11 = 1050*10^(-9);
alpha_11 = 4*10^(1);
lambda12 = 1100*10^(-9);
alpha_12 = 1*10^(1);

```

```

%*****
Iopt_0 = 250*10^(-3);    % W/cm2 optical fielf intensity at the surface
hw0 = h*C./lambda0;    % photon energy 1.18
hw1 = h*C./lambda1;
hw2 = h*C./lambda2;
hw3 = h*C./lambda3;
hw4 = h*C./lambda4;
hw5 = h*C./lambda5;
hw6 = h*C./lambda6;
hw7 = h*C./lambda7;
hw8 = h*C./lambda8;
hw9 = h*C./lambda9;
hw10 = h*C./lambda10;
hw11 = h*C./lambda11;
hw12 = h*C./lambda12;
%*****

z = 1.5*10^(-5);    % Junction depth xJ = 1.5*10^-7 m, p135, BSIM4.6.2
G0_z0 = ((Iopt_0 ./ hw0).*exp(-z.*alpha_0)).*alpha_0;    %hole-ele /cm3
G0_z1 = ((Iopt_0 ./ hw1).*exp(-z.*alpha_1)).*alpha_1;    %hole-ele /cm3
G0_z2 = ((Iopt_0 ./ hw2).*exp(-z.*alpha_2)).*alpha_2;    %hole-ele /cm3
G0_z3 = ((Iopt_0 ./ hw3).*exp(-z.*alpha_3)).*alpha_3;    %hole-ele /cm3
G0_z4 = ((Iopt_0 ./ hw4).*exp(-z.*alpha_4)).*alpha_4;    %hole-ele /cm3
G0_z5 = ((Iopt_0 ./ hw5).*exp(-z.*alpha_5)).*alpha_5;    %hole-ele /cm3
G0_z6 = ((Iopt_0 ./ hw6).*exp(-z.*alpha_6)).*alpha_6;    %hole-ele /cm3
G0_z7 = ((Iopt_0 ./ hw7).*exp(-z.*alpha_7)).*alpha_7;    %hole-ele /cm3
G0_z8 = ((Iopt_0 ./ hw8).*exp(-z.*alpha_8)).*alpha_8;    %hole-ele /cm3
G0_z9 = ((Iopt_0 ./ hw9).*exp(-z.*alpha_9)).*alpha_9;    %hole-ele /cm3
G0_z10 = ((Iopt_0 ./ hw10).*exp(-z.*alpha_10)).*alpha_10;    %hole-ele /cm3

```

```

G0_z11 = ((Iopt_0 ./ hw11).*exp(-z.*alpha_11)).*alpha_11; %hole-ele /cm3
G0_z12 = ((Iopt_0 ./ hw12).*exp(-z.*alpha_12)).*alpha_12; %hole-ele /cm3
%*****
%Wave_alpha_test = hw/(1.602*10^(-19)), 2.34ev --> alpha_0 = 6.81*10^3
%Carrier life time time tn et tp Deffusion length Ln and Lp Book SPICE
%photo and W_depletion
%*****
A_cell = 200*10^(-4)*150*10^(-4) % cell area in cm2
q = 1.6022*10^(-19); % electron charge
tn = 50*10^(-12);%((NA*3.45*10^(-12)) + 0.95*10^(-31)*NA^(2))^(1); %s elec life
time
tp = 50*10^(-12);%((ND*7*10^(-13)) + 1.810*10^(-31)*NA^(2))^(1); %s hole life
time
Ln = (Dn*tn)^(1/2); % cm
Lp = (Dp*tp)^(1/2); %cm
e0 = 8.854*10^(-14); %F/cm vaccium permittivity
es = 11.7; %Permittivity of silicon
ni = 1*10^(10); % at- m3
V_bi = VT*log((ND*NA)/ni^(2));
VD = 0;
W_dep = (((2*e0*es/q)*(V_bi - VD)*(NA + ND)/(NA*ND)))^(0.5);
%*****
%Iph determination
%*****
Jsc0 = q*G0_z0*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc1 = q*G0_z1*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc2 = q*G0_z2*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc3 = q*G0_z3*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc4 = q*G0_z4*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc5 = q*G0_z5*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc6 = q*G0_z6*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc7 = q*G0_z7*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2

```

```

Jsc8 = q*G0_z8*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc9 = q*G0_z9*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc10 = q*G0_z10*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc11 = q*G0_z11*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
Jsc12 = q*G0_z12*(W_dep + Ln + Lp); %A/cm2
%*****
Isc0 = Jsc0*A_cell; %A/cm2
Isc1 = Jsc1*A_cell; %A/cm2
Isc2 = Jsc2*A_cell; %A/cm2
Isc3 = Jsc3*A_cell; %A/cm2
Isc4 = Jsc4*A_cell; %A/cm2
Isc5 = Jsc5*A_cell; %A/cm2
Isc6 = Jsc6*A_cell; %A/cm2
Isc7 = Jsc7*A_cell; %A/cm2
Isc8 = Jsc8*A_cell; %A/cm2
Isc9 = Jsc9*A_cell; %A/cm2
Isc10 = Jsc10*A_cell; %A/cm2
Isc11 = Jsc11*A_cell; %A/cm2
Isc12 = Jsc12*A_cell; %A/cm2
%*****
%Graph for I/V characteristic
%*****
I_0 = 10^(-15);
I0 = Isc0 - (I_0*(exp(V_oc / VT) - 1));
I1 = Isc1 - (I_0*(exp(V_oc / VT) - 1));
I2 = Isc2 - (I_0*(exp(V_oc / VT) - 1));
I3 = Isc3 - (I_0*(exp(V_oc / VT) - 1));
I4 = Isc4 - (I_0*(exp(V_oc / VT) - 1));
I5 = Isc5 - (I_0*(exp(V_oc / VT) - 1));
I6 = Isc6 - (I_0*(exp(V_oc / VT) - 1));
I7 = Isc7 - (I_0*(exp(V_oc / VT) - 1));

```

```

I8 = Isc8 - (I_0*(exp(V_oc / VT) -1));
I9 = Isc9 - (I_0*(exp(V_oc / VT) -1));
I10 = Isc10 - (I_0*(exp(V_oc / VT) -1));
I11 = Isc11 - (I_0*(exp(V_oc / VT) -1));
I12 = Isc12 - (I_0*(exp(V_oc / VT) -1));

%*****
%I-V Plot for wave lengths between
%*****
%500nm - 650nm

%plot(V_oc, I0, 'o', V_oc, I1,'o', V_oc, I2, 'o', V_oc, I3, 'o'); %waveLength = 500 –
650nm

%grid on
%hold on

%plot(V_oc, I0, '-', V_oc, I1,'-', V_oc, I2, '-', V_oc, I3, '-');

%*****

%700nm 850 nm

%plot(V_oc, I4, 'o', V_oc, I5,'o', V_oc, I6, 'o', V_oc, I7, 'o'); %waveLength = 700 – 850
nm

%grid on
%hold on

%plot(V_oc, I4, '-', V_oc, I5,'-', V_oc, I6, '-', V_oc, I7, '-');

%*****

%900-1000 these are not considered these wave length are to long, we juststop at 850 nm
%plot(V_oc, I8, 'o', V_oc, I9,'o', V_oc, I10, 'o'); %waveLength = 900- 1000

%grid on
%hold on

%plot(V_oc, I8, '-', V_oc, I9,'-', V_oc, I10, '-'); %waveLength = 900- 1000

% plot(V_oc, I11, 'x')
%*****
%plot (V_oc, I12, 'o')

%grid on
%hold on

%plot (V_oc, I12, '-')

```

```

%*****
%plot(V_oc, I1);
%*****
%*****
%En dessous est presente le resultat
%*****

%Compute the power
P0 = V_oc .* I0;
P1 = V_oc .* I1;
P2 = V_oc .* I2;
P3 = V_oc .* I3;
P4 = V_oc .* I4;
P5 = V_oc .* I5;
P6 = V_oc .* I6;
P7 = V_oc .* I7;
P8 = V_oc .* I8;
P9 = V_oc .* I9;
P10 = V_oc .* I10;
P11 = V_oc .* I11;
P12 = V_oc .* I12;
%*****

% P-V Plot for wave lengths between
%*****
%plot(V_oc, P0, 'x', V_oc, P1,'x', V_oc, P2, 'x', V_oc, P3, 'x'); %waveLength = 500 -
650
%plot(V_oc, P4, 'x', V_oc, P5,'x', V_oc, P6, 'x', V_oc, P7, 'x', V_oc, P8, 'x', V_oc,
P9,'o', ); %waveLength = 700 - 850
%*****

%500nm - 650nm

```

```

%*****

plot(V_oc, P0, 'o', V_oc, P1,'o', V_oc, P2, 'o', V_oc, P3, 'o'); %waveLength = 500 - 650
grid on
hold on
plot(V_oc, P0, '-', V_oc, P1,'-', V_oc, P2, 'x', V_oc, P3, '-')
%*****

%700nm - 850nm
%*****
%plot(V_oc, P4, 'o', V_oc, P5,'o', V_oc, P6, 'o', V_oc, P7, 'o'); %waveLength = 700 –
850 nm
%grid on
%hold on
%plot(V_oc, P4, '-', V_oc, P5,'-', V_oc, P6, '-', V_oc, P7, '-'); %waveLength = 700 –
850 nm
%*****

%900-1000 these are not considered these wave lenth are to long, we just
%plot( V_oc, P8, 'o', V_oc, P9,'o', V_oc, P10, 'o'); %waveLength = 900- 950- 1000
nm
%grid on
%hold on
%plot( V_oc, P8, '-', V_oc, P9,'-', V_oc, P10, '-');
%*****

% 1200 nm
%*****

%plot( V_oc, P12, 'o')
%grid on
%hold on
%plot( V_oc, P12, '-')
%End of simulation 2008-10-21 a 10H03 pm

```

```
%*****  
  
%I-V and P-V Plot for wave lengths between [ 900 1050 ]nm  
  
%*****  
  
%plot(V_oc, I8, 'x', V_oc, I9,'x', V_oc, I10, 'x', V_oc, I11, 'x', V_oc, I12, 'x', 'color',  
'r'); %waveLength = 900- 1100 nm  
  
%grid on  
  
%hold on  
  
%plot(V_oc, P8, 'x', V_oc, P9,'x', V_oc, P10, 'x', V_oc, P11, 'x', V_oc, P12, 'x', 'color',  
'r'); %waveLength = 900- 1100 nm  
  
%+++++
```