

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Micro électronique

présenté par

Belhamidi Mohamed El Amine

&

Benaddad Hakima

Systeme de Récupération d'énergie pour les applications à faible consommation de puissance

Proposé par : Dr. Abdelhalim SLIMANE & Dr. Nacer Said

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement Dr. Abdelhalim SLIMANE et Mr.Nacer Said qui nous ont permis de bénéficier de leur encadrement. Les conseils qu'il nous a prodigué, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail.

Nous tenons à remercier aussi Mr.Sidahmed Tedjini pour son aide précieuse qu'il nous a soutenu tout au long de ce travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

Merci à tous et à toutes.

يتم تقديم بنية فعالة لإدارة الطاقة الشمسية صغيرة النطاق لعقدة إنترنت الأشياء ذاتية التشغيل في هذه المذكرة. العمارة المقترحة تتجنب المنظم الخطي و تتميز بمحول طاقة مكثف مبدل رقاقة كامل لتحقيق كفاءة أعلى. عمليات الهندسة المعمارية المقترحة تحصد الطاقة مرة واحدة فقط قبل الوصول إلى دائرة الشحن ، بغض النظر عن الظروف المحيطة. تم تحسين كفاءة النظام بنسبة 12 ٪ مقارنة مع العمارة التقليدية. تم تصميم نظام إدارة الطاقة بالكامل باستخدام تبلغ 0.18 ميكرومتر CMOS تقنية

كلمات المفاتيح: الطاقة الشمسية

دائرة الشحن

Résumé : Une architecture de gestion efficace de l'énergie solaire à micro-échelle pour le nœud Internet des objets autoalimentée est présentée dans ce mémoire. L'architecture proposée évite le régulateur linéaire et présent un convertisseur de puissance à capacité commutée sur puce complet afin d'atteindre un rendement plus élevé. l'architecture proposée ne traite l'énergie récupéré qu'une seule fois avant d'atteindre le circuit de charge, quelles que soient les conditions ambiantes. L'efficacité du système a été améliorée de 12% par rapport à l'architecture traditionnelle. L'ensemble du système de gestion d'énergie a été conçu en utilisant la technologie CMOS 0,18 µm.

Mots clés : Internet des objets

capacité commutée

Abstract :

An efficient micro-scale solar power management architecture for self-powered Internet of Things node is presented in this memory of graduation. The proposed architecture avoids the linear regulator and presents a complete on-chip switched capacitor based power converter in order to achieve higher end-to-end efficiency. Unlike traditional architectures, where the harvested energy processes twice, the proposed architecture processes the harvested energy only once before it reaches to the load circuit, irrespective of the ambient conditions. The system efficiency has been improved by 12% over the traditional architecture. The entire power management system has been designed using 0.18- μm CMOS technology node.

Keywords : Internet of Things

switched capacitor

Listes des acronymes et abréviations

OCSF : Objets Communicants sans fils

IOT : Internet of things

RF: Radiofrequency

ADS: Advanced Dising System

FCLK: clock Frequency

CU : Control unit

PV : Photovoltaïque

DC : Direct curent

MOSFET: Metal-oxide semi-conductor field effect

NMOS: Negative channel metal-oxide semi-conductor

PMOS: Positive Channel métal-oxyde semi-conducator

HF: Hyperfréquence

Fosc : fréquence oscillation

Dsp : dancite surfacique de puissance

Cb : super condensateur

Cl : condensateur de charge

Vref :tension de référence

Tosc : temps oscillation

Tplh, Tphl : temps de retard bas-haut , haut bas

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art

1. 1.	Introduction	3
1.2.	Internet des objets et Capteur autonome	5
1.3	Récupération d'énergie pour applications IOT.....	7
1.3.1	Architecture d'un récupérateur d'énergie	9
1.4.	Source d'énergies disponibles dans l'environnement.....	10
1. 4.1	L'énergie des vibrations mécaniques.....	10
a.	Récupération d'énergie à partir des vibrations mécaniques	10
1.4.2	L'énergie des Ondes électromagnétiques	12
a	Récupération d'énergie a partir d'onde électromagnétique	12
1.4.3	L énergie thermique.....	14
a	Récupération d'énergie à partir des transducteurs thermique	14
1.4.4	La source d'énergie solaire	17
a	Récupération d'énergie à partir des rayonnement solaire	17
1.5.	Bilan des sources disponibles	19
1.6	Conclusion.....	21

Chapitre 2 Système de récupération d'énergie

2.1	Introduction	22
2.2	Architecture de system.....	23

2.2.1	Cellule solaire.....	24
a	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	26
2.2.2	L'oscillateur en anneau.....	27
a	Inverseur CMOS.....	30
b	Caractéristique de commutation.....	31
c	Générateur de horloge.....	32
2.2.3	Capacité commutée.....	34
a	Fonctionnement de capacité commutée.....	35
2.2.4	Unité de control.....	37
a	Comparateur de tension.....	37
b	Les portes logiques NOR.....	37
c	Principe de fonctionnement.....	38
2.3	Conclusion.....	39

Chapitre 3 Résultats de simulation

3.1	Introduction.....	40
3.2	Système de conception avancé ADS.....	40
3.3	Etude de circuit de système.....	43
3.3.	1 Inverseur CMOS.....	43
3.3.2	Comparateur idéal.....	44
3.3.3	Oscillateur en anneau.....	46
a	Oscillateur avec horloge de control.....	48
3.4	Effet de commutation real sur le circuit a capacité commutée.....	54
3.5	Effet de l'oscillation réel sur le système.....	57
3.6	Conclusion.....	59

..

Liste des figures

Figure 1.1. Internet des objets regroupe tous les objets physiques communicants.....	6
Figure 1.2. Schéma d'un capteur autonome en énergie.....	7
Figure 1.3. Echelle besoin en puissance pour des appareils électroniques et récupération d'énergie associée aux niveaux de puissance	8
Figure 1.4. Schéma bloc d'un récupérateur d'énergie pour l'alimentation D'un capteur autonome.....	9
Figure 1.5 . Structure d'un dispositif de récupération et de conversion d'énergie vibratoire.....	11
Figure 1.6. Structure d'une recensa class.....	13
Figure 1.7. (a) Schéma du Thermocouple , (b) Schéma du Thermocouple en série	14
Figure 1.8. (a) prototype avec un radiateur [, (b) Montre avec un radiateur.....	15
Figure 1.9. Générateur thermoélectrique développé par la société PERPE.....	16
Figure 1.10. Schéma fonctionnel de récupération d'énergie thermoélectrique.....	16
Figure 1.11. Applications des panneaux photovoltaïques ; (a) Le bateau suisse Tûranor; (b) Centrale solaire photovoltaïque dans les Alpes des Hautes Provences	17
Figure 1.12. a) Structure typique d'une cellule photovoltaïque, b) panneau photovoltaïque.....	18
Figure 2.1. Architecture de gestion d'énergie proposée et les signaux de commande associés pour maintenir la régulation à la charge. VPH représente la tension aux bornes de la cellule PV et Fclk représente la fréquence du convertisseur de commutation.	23
Figure 2.2 schema equivalent d'une cellule photovoltaïque.....	27
Figure 2.3. Variation du courant de sortie en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque pour trois conditions d'éclairage différentes.....	27

Figure 2.4. Exclure la variation de puissance en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque pour trois conditions d'éclairage différentes.....	27
Figure 2.5. Oscillateur en anneau à cinq étages.....	28
Figure 2.6. Structure de l'oscillateur en anneau différentiel.....	29
Figure 2.7. Le schéma et le symbole logique d'un inverseur CMOS.....	30
Figure 2.8. Caractéristiques de commutation de l'onduleur CMOS à l'aide du modèle numérique.....	31
Figure 2.9. Circuit de générateur d'horloge sans chevauchement.....	33
Figure 2.10. Forme d'onde simulée de clkb sous une tension de commande de 405v et une tension d'alimentaion de v1.5 v.....	33
Figure2.11. Capacité commutée.....	34
Figure 2.12. Signaux de commande des interrupteurs.....	34
Figure 2.13. Schéma électrique de l'architecture de gestion de l'alimentation proposée.....	36
Figure 2.14. Schéma équivalent d'une porte logique NOR.....	38
Figure 3.1. Page d'ouverture de l'ADS.....	41
Figure 3.2 Créations d'un nouveau projet sur ADS.....	41
Figure 3.3 page d'accueil de l'ADS.....	42
Figure 3.4 l'extraction d'un composent sur l'ADS.....	42
Figure 3.5. symbole d'un inversseur CMOS.....	43
Figure 3.6. Caractéristiques d'un inverseur CMOS.....	43
Figure 3.7. Schéma d'un comparateur idéal.....	44
Figure 3.8. Caractéristique d'un comparateur de tension.....	45
Figure 3.9. schéma d'un oscillateur en anneau.....	46
Figure 3.10. Tension d'oscillation.....	47

Figure 3.11. les deux tension de sortie Phi et Phib.....	48
Figure 3.12. Schéma d'un oscillateur avec horloge de control.....	49
Figure 3.13. Les deux tension Phi et Phib en opposition de phase.....	50
Figure 3.14. Circuit de récupération d'énergie.....	51
Figure 3.15. simulation temporel montent la charge des capacité C1,C2 et C3.....	52
Figure 3.16. Zoom de simulation temporel montent la charge des capacité C1,C2 et C3.....	52
Figure 3.17. (a)accord du temps de charge la capacité C2 avec le niveau haut de la tension Phi. (b) accord du temps de charge la capacité C1 et C3 avec le niveau haut de la tension Phi.....	53
Figure 3.18. Les tensions prélevé aux niveaux des capacités Cb et Cl.....	54
Figure 3.19. Montage avec un circuit à capacités commutées utilisant des commutateurs réels.....	54
Figure 3.20. Illustration des déférentes tensions aux niveaux des capacités.....	55
Figure3.21. Illustration des déférentes tensions aux niveaux des capacités en variant la largeur des transistors.....	56
Figure 3.22. charge de la capacité Cl en fonction du temps.....	57
Figure 3.23. La simulation des différentes tensions en fonction du temps aux niveaux de l'oscillateur réel.....	58
Figure 3.24. La charge de la capacité Cl en fonction du temps dans le cas d'un oscillateur réel.....	59

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Densité de puissance lumineuse en fonction des conditions externes et densité de puissance électrique correspondante avec une cellule photovoltaïque ayant un rendement de 15%.....	19
Tableau 1.2 Densité de puissance débitée par quelques sources d'énergies.....	20
Tableau 2.2 les entrées et la sortie d'une porte NOR.....	37

Introduction générale

De nos jours, les systèmes communicants sans fil font partie intégrante de notre vie quotidienne en raison de leurs larges gammes d'applications dans différents domaines (domaine médical, la surveillance, le domaine militaire, etc...).

Malgré les énormes progrès que l'électronique a connus, ces systèmes présentent toujours des verrous technologiques. En effet, ces progrès se sont focalisés sur les problèmes d'intégration et la miniaturisation en mettant à l'écart la voie de l'autonomie énergétique. Une des priorités cruciales que les constructeurs devront développer est de mettre en œuvre des techniques de plus en plus évoluées afin de limiter l'utilisation des batteries ou des piles. Ces sources d'énergie ont souvent une durée de vie limitée ou de recharge élevée. Elles risquent également d'être dans des emplacements difficilement accessibles voire totalement inaccessibles. Ce qui peut représenter un coût de remplacement conséquent. Pour satisfaire ce besoin, différentes sources d'énergies ambiantes (solaire, vibratoire, radiofréquence, thermique, etc...) ont été exploitées pour contribuer à l'alimentation des objets communicants voir même d'alimenter certains dispositifs à faible consommation sans recours à une batterie ou à une pile. Plusieurs travaux de recherche ont eu comme objectif le développement de systèmes capables de convertir en énergie électrique l'énergie disponible dans le milieu immédiat du capteur.

Dans ce travail , nous nous intéressons à une seule source d'énergie ; l'énergie provenant de rayonnement solaire. L'objectif du mémoire consiste à concevoir un dispositif de récupération et de conversion d'énergie photovoltaïque.

Le manuscrit comporte trois chapitres. Dans le premier chapitre nous décrivons les enjeux des dispositifs sans fil et les différentes sources d'énergie exploitées

actuellement pour les alimenter. Nous présenterons la récupération d'énergie à partir du rayonnement solaire et les différentes techniques de transduction.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de l'architecture de gestion de puissance proposé. Fondamentalement il se compose d'un convertisseur DC-DC entre le récupérateur et la charge de sortie. Le convertisseur (DC-DC) est utilisé pour présenter une impédance optimale au récupérateur pour transférer la puissance maximale ainsi que convertir la tension d'entrée a un niveau tel qu'il rencontre l'exigence de charge.

Nous présenterons ensuite les différentes étapes de conception du système avant de le caractériser afin de vérifier le bon fonctionnement du dispositif. Des études paramétriques ont été effectuées moyennant des simulations sur ADS.

Dans le troisième chapitre nous présenterons le logiciel de simulation ADS et comment l'utiliser pour réaliser et simuler notre système. Au final nous présente les résultats de simulation.

Chapitre 1 Etat de l'art

1.1 introduction

La dernière décennie a été marquée par une augmentation sans précédent des objets Communicants sans fils qui ont envahi notre quotidien.

En effet, les progrès technologiques incessants ont permis, à l'aide de la microélectronique, une meilleure intégration dans l'environnement. Cela se traduit par la possibilité d'introduire Plusieurs fonctionnalités dans un volume de plus en plus réduit et d'échanger avec un autre objet certaines informations (pression, température, humidité, ...). En effet, la plupart des secteurs ont été touché par cette vague technologique innovante des objets communicants. Parmi ces secteurs :

➤ Le secteur médical



- Capteur de pression sanguine et de rythme cardiaque.

-Lentilles connectées sensibles au taux de Glycémie pour Du diabète

-Capteur SImOS pour suivre l'évolution les différents Paramètres biomécaniques d'une prothèse de genou

- Implants auditifs.

➤ Le secteur lié à la sécurité



- Détecteur de fumée et de monoxyde de carbone.

tecteur d'inondation utilisé dans les zones à risque.

- Détecteur de mouvements.

➤ Le secteur lié à l'environnement



- Capteur de pollution de l'air.
- Capteur de prévention des incendies de forêts.
- Capteur pour prévenir de tempêtes de sable.

➤ Le secteur militaire



- Détecteur de déplacement d'objets.
- Réseau de capteurs déployés dans les endroits à risque.
- Capteur d'identification de certaines variétés d'explosifs.

➤ Le secteur du transport



- Suivre de flotte.
- Diagnostic à distance des pannes.

Malgré les énormes progrès que les objets communicants ont connus, l'autonomie énergétique n'a pas suivi cette tendance d'évolution et reste l'un des verrous majeurs. En effet, la majorité des objets communicants sont encore alimentés par pile ou batterie dont l'autonomie est limitée. Cela représente une contrainte en termes de maintenance pour les capteurs implémentés dans des endroits difficiles d'accès (implants médicaux, surveillance d'un barrage où le capteur est noyé dans du béton, ...) ou le cas d'un réseau de capteurs composé d'une centaine voir des milliers de cellules.

En effet, au-delà des coûts de recyclage des piles et des batteries, l'intervention humaine sur site devient indispensable et contraignante. Une solution pertinente permet de donner un appui à la batterie, voir même d'alimenter des dispositifs sans

à faible consommation, par récupération de sources d'énergies disponibles dans l'environnement. Parmi les sources d'énergies les plus exploitées on peut citer les énergies : solaire, thermique ; radiofréquence, vibratoire, ...

1.2 Internet des objets et Capteur autonome

Selon l'Union internationale des télécommunications, l'internet des objets (en anglais IOT : Internet Of Things) est une « infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution ». En réalité, la définition de ce qu'est l'Internet des objets n'est pas figée [1]. Elle recoupe des dimensions d'ordres conceptuel et technique figure 1.1. D'un point de vue conceptuel, l'Internet des objets caractérise des objets physiques connectés ayant leur propre identité numérique et capables de communiquer les uns avec les autres. Ce réseau crée en quelque sorte une passerelle entre le monde physique et le monde virtuel. D'un point de vue technique, l'IOT consiste en l'identification numérique directe et normalisée (adresse IP, protocoles smtp, http...) d'un objet physique grâce à un système de communication sans fil qui peut être une puce RFID, Bluetooth ou Wi-Fi [2].



Figure 1.1. Internet des objets regroupe tous les objets physiques communicants.

Les capteurs autonomes sont des petits appareils électroniques sans fil capables de communiquer soit entre eux soit vers une entité maîtresse. Ils forment un réseau de capteurs sans fil capables de donner et transmettre des informations utiles sur une région ou pour un domaine d'intérêt. Grâce à leurs capacités de calcul, ces capteurs communicants sans fil permettent d'envisager de nombreuses applications encore irréalisables il y a quelques années. Aujourd'hui, ces capteurs petits et peu coûteux peuvent être, par exemple, disposés sur le long des routes ou dans des bâtiments pouvant donc détecter une variété de phénomènes physiques. De nombreux domaines d'application sont alors envisagés tels que le contrôle de l'environnement, le bâtiment, l'agriculture, la surveillance de machines industrielles ou du trafic urbain, la santé, ou le sport figure 1.2. Ces capteurs composent notamment la couche physique de l'internet des objets [3].

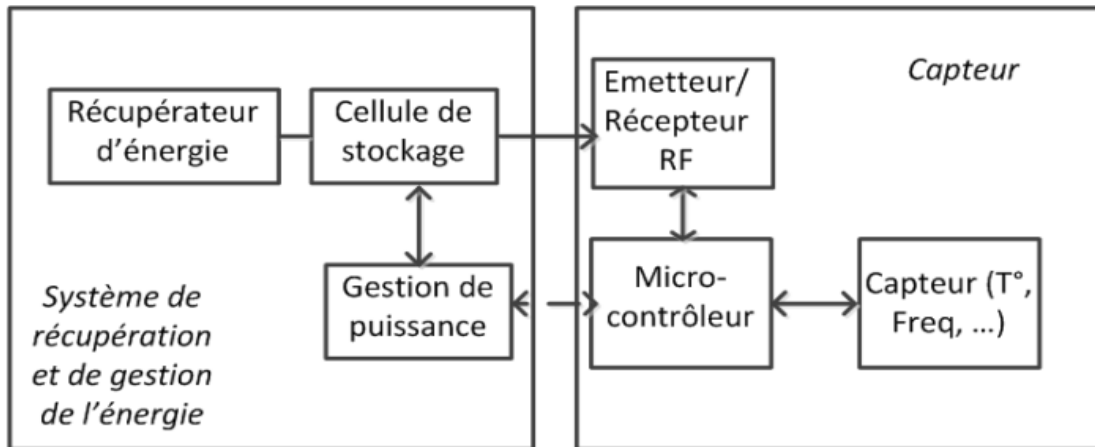


Figure 1.2. Schéma d'un capteur autonome en énergie

1.3 Récupération d'énergie pour applications IOT

Bien que l'avancement remarquable dans les systèmes nœuds de capteurs sans-fils pour les applications IOT, et leur déploiement progressif pour couvrir les besoins de l'échange des données et le contrôle des actionneurs dans la vie quotidienne de l'être humain, le souci majeur constituant un parmi les sujets de recherche pendant les dernières années est l'alimentation des nœuds de capteurs éparpillés dans des endroits lointains des sources d'énergie électrique 50 Hz.

L'utilisation de la batterie a été bien évidemment une solution inadéquate en vue de sa durée de vie limitée ayant besoin d'être rechargée dès son déchargement [4].

Les travaux menés par les chercheurs dans le domaine des applications IOT ont conduit à convertir l'énergie ambiante issue de l'environnement de l'application elle-même à titre d'exemple, l'énergie solaire, l'énergie thermique, l'énergie mécanique, l'énergie radiofréquence, etc. En outre les chercheurs ont conçu les systèmes de conversion correspondants chacun au type d'énergie à convertir et la quantité de puissance fournie pour alimenter le nœud de capteur.

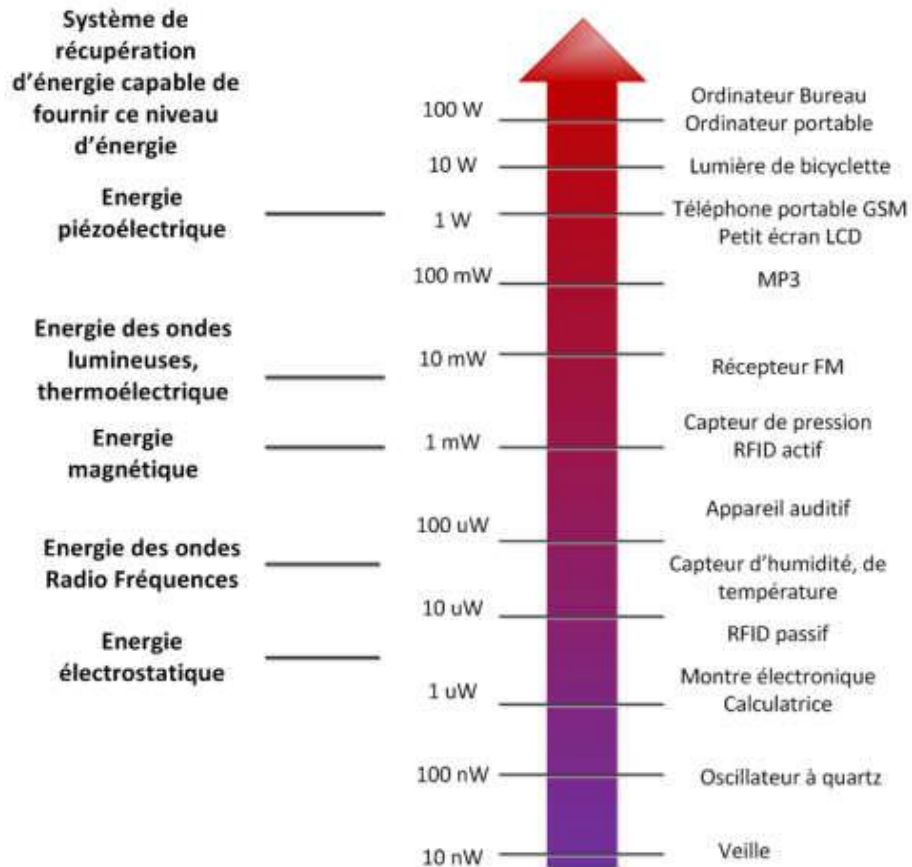


Figure 1.3. Echelle besoin en puissance pour des appareils électroniques et récupération d'énergie associée aux niveaux de puissance [5].

Afin de donner quelques ordres de grandeurs, la Figure 1.3 donne une estimation des puissances nécessaires pour le fonctionnement de plusieurs capteurs et appareils électroniques. Les différents types de récupération d'énergie sont également énumérés et répertoriés sur cette figure en fonction de leur capacité à fournir ces niveaux d'énergie.

La gamme de capteurs pour laquelle nous allons nous concentrer dans ce mémoire est celle des systèmes de consommation à partir du milliwatt à dizaine de watt maximum [5].

Ainsi, du fait de l'encombrement des systèmes, plusieurs énergies ne seront pas considérées ici comme par exemple l'énergie éolienne, géothermique ou encore l'hydroélectricité.

1.3.1 Architecture d'un récupérateur d'énergie

Un système de récupération d'énergie pour l'alimentation d'un capteur est composé de cinq blocs distincts comme présenté la Figure 1.4.

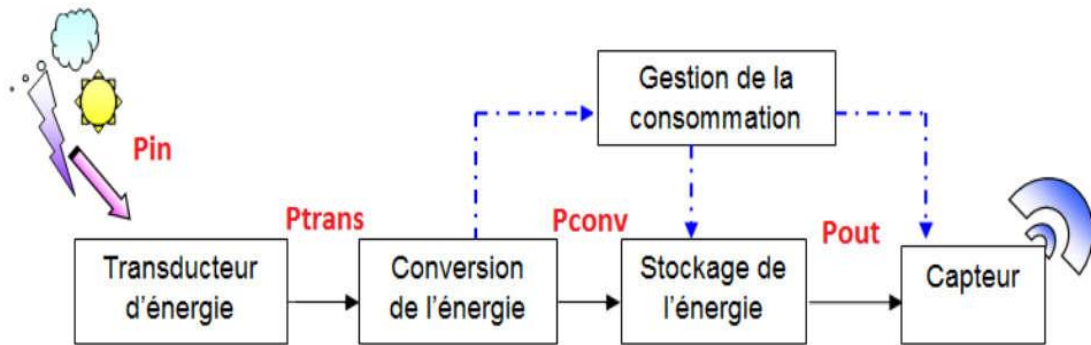


Figure 1.4. Schéma bloc d'un récupérateur d'énergie pour l'alimentation D'un capteur autonome.

La première partie du système complet est le transducteur d'énergie. Celui-ci fournit comme signal de sortie une grandeur physique utilisable en réponse à une autre grandeur physique spécifique comme signal d'entrée. Les principes de cette transduction sont basés sur l'existence de divers effets physiques ou chimiques [6].

Ensuite, la seconde partie permet la conversion de l'énergie. L'énergie reçue en sortie du transducteur est convertie en puissance électrique continue. Cette partie peut être constituée de redresseurs, de convertisseurs ou de pompes de charges.

La troisième partie est une cellule de stockage de l'énergie convertie. Il peut s'agir de condensateurs électriques, de super-capacités ou encore de batteries rechargeables [7].

Enfin, la quatrième partie de ce système est celui de la gestion de la consommation. Il est composé de micro-processeurs et convertisseurs intégrant des algorithmes qui permettent d'acheminer l'énergie reçue soit vers la cellule de stockage, soit vers le capteur en fonction des besoins.

1.4 Source d'énergie disponibles dans l'environnement

Comme expliqué précédemment, seules les sources d'énergie ayant des systèmes de récupération de petite dimension sont considérées. Les sources étudiées dans ce chapitre sont regroupées en plusieurs catégories : l'énergie des vibrations mécaniques, magnétique, thermique, et l'énergie des radiations (ondes lumineuses et Radio-fréquences).

1.4.1 L'énergie des vibrations mécaniques

Les vibrations mécaniques sont considérées comme étant l'une des sources d'énergie les plus prometteuses en raison de leurs disponibilités dans notre environnement (les milieux Industriels, les avions, les autoroutes, ...). Par exemple la fréquence des vibrations mécaniques de certaines structures aérospatiales peut varier entre 300 Hz et 1 KHz pour des accélérations supérieures à 1G. Cependant, pour des vibrations récupérées à domicile la fréquence est inférieure à 150 Hz pour des accélérations autour de 0.1G. En effet, la puissance fournie par cette source d'énergie dépend essentiellement de la fréquence et de l'amplitude. Elle permet d'alimenter certains dispositifs n'ayant pas recours à des batteries ou des piles [8] .

a Récupération d'énergie à partir des vibrations mécanique

L'énergie récupérée à partir des vibrations mécaniques demeure l'une des sources d'énergie les plus prometteuses vue sa disponibilité dans notre environnement. Cette puissance sera convertie en puissance électrique utile afin d'alimenter certains systèmes électroniques. Le processus de conversion est assuré par un dispositif de récupération et de conversion d'énergie vibratoire Figure 1.5 composé de trois blocs de base dont chacun réalise une tâche bien spécifique

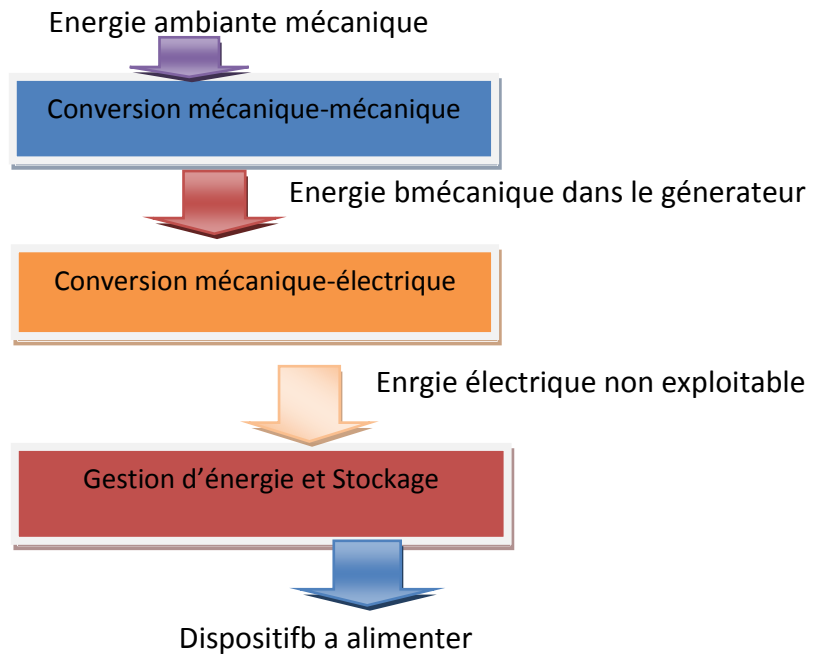


Figure 1.5. Structure d'un dispositif de récupération et de conversion d'énergie vibratoire.

La première étape de conversion mécanique-mécanique est assurée par un résonateur mécanique permettant de convertir les vibrations mécaniques récupérées du milieu extérieur (ambiantes ou contrôlées) en un mouvement relatif entre la source des vibrations et la masse.

Ces vibrations sont transmises à un dispositif électromécanique capable de les convertir en énergie électrique, mais cette énergie n'est pas directement exploitable, c'est pour cela qu'un Circuit d'extraction est primordial pour convertir l'énergie électrique alternative en énergie électrique utile. Enfin, un dispositif de stockage de l'énergie récupérée est utilisé pour garantir un fonctionnement durable du dispositif à alimenter même en cas d'absence de la source des vibrations.

Chaque récupérateur d'énergie vibratoire comporte forcément une structure mécanique souvent sous forme d'un système masse-ressort. En effet, deux types sont possibles pour ce type de générateur, résonant et non résonnant. Concernant le premier type il est utilisé pour les applications dont l'amplitude de variation est faible par rapport au déplacement possible de la masse et le rendement chute dès qu'on s'éloigne de la fréquence de résonance puisque la bande passante est étroite [9].

Le second type de générateur non-résonnant est destiné à des applications présentant une grande amplitude de variation par rapport à la variation limite du système mécanique et où les vibrations sont réparties sur une large bande vers les basses fréquences [10].

1.4.2 L'énergie des ondes électromagnétiques

Les systèmes de récupération et de conversion d'énergie électromagnétique appelés rectennas [11], ont connu un essor considérable grâce à la disponibilité des signaux RF ambiants dans les milieux urbains. Cependant, la densité surfacique de puissance DSP captée par certaines rectennas reste limitée à cause des pertes dans l'espace libre.

Pour ce faire elles doivent être proches des sources d'émissions (ambiantes ou contrôlées) ce qui n'est pas toujours le cas, ou encore augmenter les surfaces des antennes de captation. Une autre alternative consiste à utiliser des antennes multifréquence afin de capter les puissances associées aux fréquences de fonctionnement avec la même antenne la densité surfacique de puissance DSP en espace libre à pour expression :

$$dsp = \frac{E^2}{Z_0} \text{ (w/m}^2\text{)} \quad (1.1)$$

Où $Z_0(377 \Omega)$ est l'impédance d'onde en espace libre et E (V/m) représente la valeur efficace du champ électrique.

a . Récupération d'énergie a partir d'onde électromagnétique

La récupération et la conversion de l'énergie électromagnétique en énergie électrique utile est assurée par un dispositif appelé rectenna (pour Rectifiant Antenne) [12-17].

Ce dispositif contient une antenne de captation suivie d'un circuit de rectification à caractéristique non linéaire.

La structure d'une rectenna classique est représentée dans la Figure 1.6.

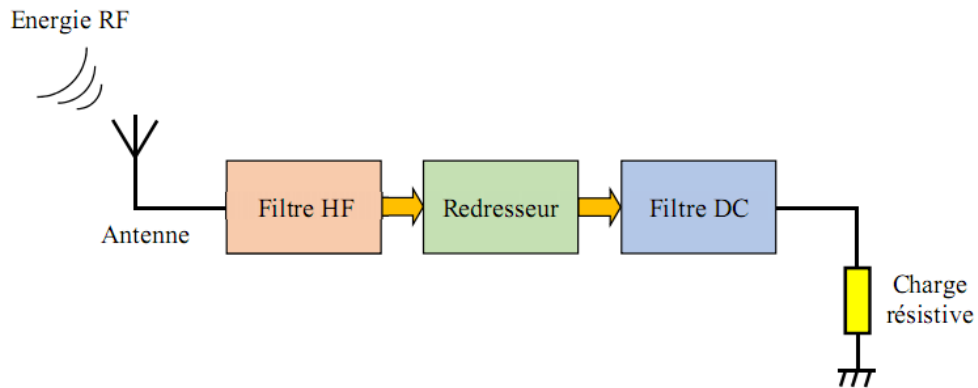


Figure 1.6. Structure d'une rectenna class.

L'antenne permet tout d'abord de capter les ondes électromagnétiques rayonnées et de les convertir en ondes électromagnétiques guidées, qui seront transmises au circuit de conversion RF-DC. Ensuite, ce circuit conçu le plus souvent avec des diodes Schottky, convertit l'énergie RF captée en énergie électrique utile, qui sera transmise à son tour à une charge résistive, celle-ci représentant l'impédance d'entrée du dispositif à alimenter.

Un filtre HF et un filtre DC sont placés de part et d'autre de la diode. En effet, le filtre HF assure deux tâches, il réalise l'adaptation entre l'antenne et le circuit de conversion à la fréquence de travail pour un maximum de transfert de puissance et il permet la rejection des harmoniques d'ordre supérieur qui peuvent être générés par la diode Schottky. Le filtre DC bloque les composantes RF et ne laisse passer que la composante continue.

La rectenna peut être caractérisée et évaluée à l'aide de deux grandeurs, le rendement de conversion RF-DC et la tension de sortie DC.

À partir de l'application visée, ces grandeurs sont fixées comme objectifs lors de la conception et l'optimisation du circuit. On peut trouver des applications qui s'intéressent seulement à la tension de sortie de la rectenna et d'autres applications au rendement, on peut trouver également des rectennas qui s'intéressent aux deux grandeurs à la fois.

1.4.3 L'énergie thermique

Le transfert d'énergie thermique est une transmission de cette énergie d'une région à une autre, sous l'influence d'une différence de température. La chaleur, qui est elle-même une forme de transfert d'énergie thermique, provient de différentes formes d'énergie, comme par exemple, le soleil, l'électricité (mouvement des électrons le long d'un conducteur), ou encore le corps humain.

L'énergie thermique qui est récoltée peut être utilisée comme chaleur pour préchauffer l'eau à usage domestique ou industriel, alternativement ; il peut être converti en énergie mécanique ou électrique.

a Récupération d'énergie à partir des transducteur thermique

Les transducteurs thermiques se servent d'un gradient de température pour produire de l'énergie électrique, par effet Seebeck. Ce phénomène, mis en évidence en 1822 par Thomas Seebeck, évoque l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction de deux matériaux soumis à un gradient de température. A l'inverse, l'effet Peltier montre que la circulation d'encourant dans un couple de matériaux distincts induit une différence de température entre les deux extrémités des conducteurs. Ces transducteurs sont basés sur l'utilisation de thermocouples ; ce sont la plupart du temps deux barreaux de semi-conducteur de type N et P qui sont reliés par un matériau conducteur Figure (1-7).

Un des semi-conducteurs les plus utilisés est le tellure de Bismuth (Bi_2Te_3) qui est l'un des matériaux possédant le rendement le plus élevé à des températures inférieures à 450K. Les alliages silicium germanium (Sieg) sont souvent utilisés à haute température jusqu'à 1300 K [18] .

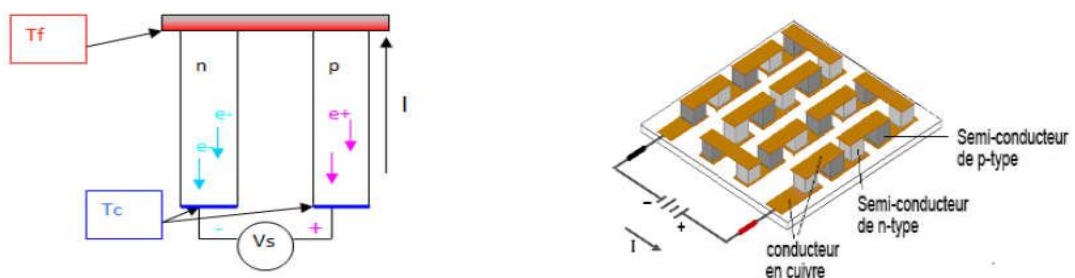


Figure 1.7. (a) Schéma du Thermocouple [19], (b) Schéma du Thermocouple en série [18]

Un flux de chaleur induit un déplacement des trous et des électrons dans les thermocouples et l'apparition d'un courant électrique. Plus le gradient de température est important, plus l'énergie récupérée est importante comme le montre l'équation suivant ;

$$\frac{P}{S} = h\Delta T \quad (1.2)$$

Avec P la puissance de sortie, S la surface, ΔT le gradient de température et h la densité de puissance par $^{\circ}\text{C}$ et par m^2 du convertisseur.

Afin que ces systèmes soient les plus efficaces possible, il est généralement indispensable d'avoir de forts gradients de températures ainsi qu'un flux thermique important. Pour canaliser le flux thermique entre les deux armatures du thermocouple, un radiateur doit être placé sur une des 2 faces du module. La Figure 1.8 illustre des prototypes avec des radiateurs. La taille de ces radiateurs est non négligeable par rapport à la taille du récupérateur d'énergie thermique.

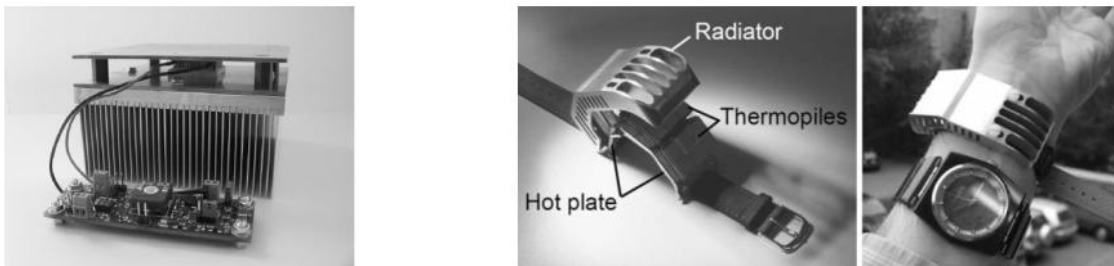


Figure 1.8. (a) prototype avec un radiateur [20], (b) Montre avec un radiateur [21].

Malgré les contraintes de coût et de volume importantes, les nouvelles technologies de miniaturisation ont permis le développement des générateurs thermoélectriques. Par exemple la société PERPETUA, spécialisée dans le développement de solutions de sources d'énergie pour l'alimentation des capteurs sans fil, a développé un générateur conçu à partir d'un film Thermoélectrique flexible figure 1.9 Ce produit assure un rendement de conversion élevé avec une tension de sortie réglable (1.8 V, 2.5 V, 3 V, 3.3 V) capable d'alimenter un capteur sans fil, et qui répond aux critères de taille et de prix [22].



Figure 1.9 . Générateur thermoélectrique développé par la société PERPETUA.

➤ Circuit de conversion

De point de vue topologie, la tension fournie par le générateur TEG et correspondante à la quantité de chaleur à convertir, doit être mise en forme par le biais d'un étage d'adaptation d'impédance et d'un convertisseur DC-DC [23]. Ensuite, la tension stable obtenue doit être stockée dans une batterie appropriée (figure 1-10), et/ou régulée en termes de puissance pour être enfin utilisée en alimentation des circuits faibles puissance comme des nœuds de capteurs sans-fil [24].

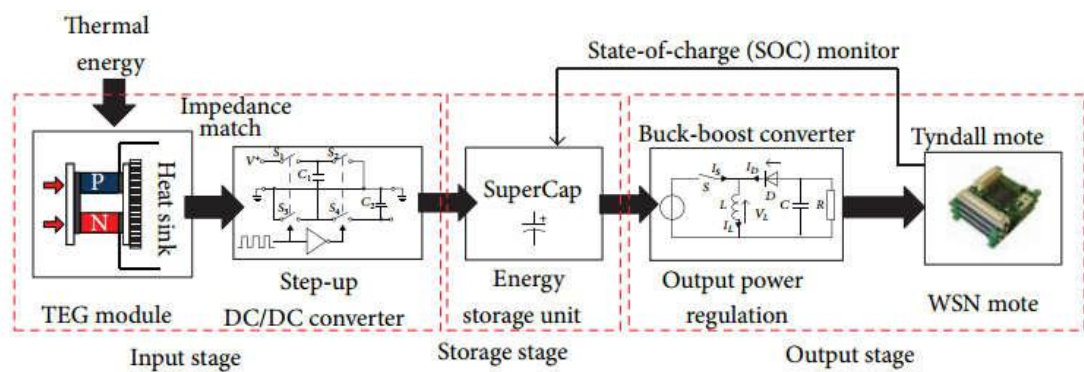


Figure 1.10. Schéma fonctionnel de récupération d'énergie thermoélectrique.

1.4.4 La source d'énergie solaire

Le rayonnement solaire est une réserve d'énergie inépuisable et bien répartie partout dans le monde la quantité d'énergie qui illumine la terre est trois mille fois supérieure aux besoins énergétiques quotidiens de la planète [25]. En effet, l'énergie reçue est d'environ 100 W/m^2 . Cependant, pour un temps nuageux elle est autour de 10 W/m^2 [26]. À l'aide des cellules photovoltaïques, l'énergie solaire peut être captée et convertie en énergie électrique utile. Cependant, l'apport énergétique dépend essentiellement des conditions météorologiques (ciel nuageux, ...), du milieu (intérieur ou extérieur) ainsi que le type d'éclairage (éclairage solaire direct ou lumière artificielle). En effet, selon les matériaux utilisés dans la fabrication des panneaux photovoltaïques, le rendement de conversion peut varier entre 5 et 20 % [26].



(a)

(b)

Figure 1.11. Applications des panneaux photovoltaïques; (a) Le bateau suisse Tûranor; (b) centrale solaire photovoltaïque dans les Alpes des Hautes Provinces [27]

a Récupération d'énergie à partir des rayonnements solaires

Une des sources d'énergie les plus exploitées actuellement est la lumière. Qu'elle provienne du soleil ou d'un dispositif d'éclairage artificiel, la lumière est convertie en électricité à l'aide des cellules photovoltaïques Figure 1.12.

Une cellule typique est constituée d'une jonction p-n, avec des contacts métalliques des deux côtés. Les photons incidents créent des paires électron-trou, qui sont séparées grâce au champ électrique présent dans la jonction. Une force électromotrice

est ainsi créée est un circuit peut être alimenté. Les cellules solaires les plus répandues sont en silicium, qui présente un bon compromis entre le cout et la performance.

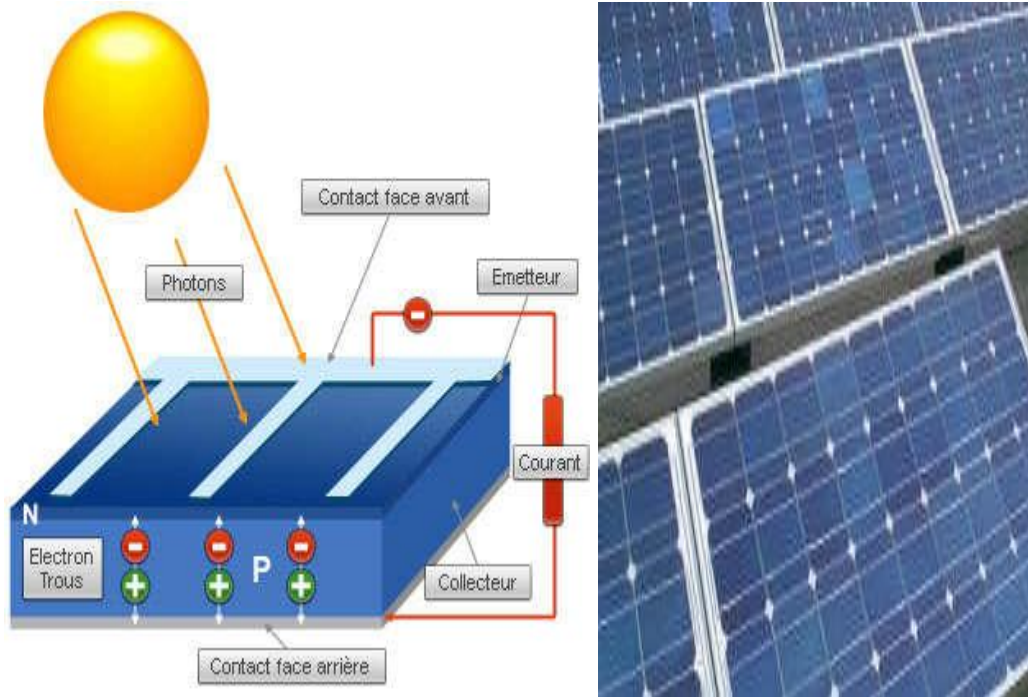


Figure 1.12. a) Structure typique d'une cellule photovoltaïque, b) panneau photovoltaïque

La puissance lumineuse en plein soleil est d'environ 1000 W/cm^2 , ce qui revient à 100mW/cm^2 . Un module solaire avec un rendement typique de 15 % est capable de fournir 15 mW/cm^2 dans ces conditions. Sous un éclairage artificiel cette puissance devient de l'ordre de $10\text{-}100 \mu\text{W/cm}^2$ tableau (1.1). Ce sont des ordres de grandeur compatibles avec la puissance consommée par plusieurs types des dispositifs autonomes. Les cellules photovoltaïques sont donc les sources d'énergie de choix dans les milieux lumineux [28].

Condition	Puissance lumineuse (mW/cm ³)	Puissance électrique (mW/cm)
Plein soleil	100	15
Soleil voilé	50	7.5
Ciel nuageux	5-20	0.75-3
A l'intérieur, à proximité d'une fenêtre	0.4-2	0.06-0.3
Eclairage artificiel	0.1-1.5	0.015-0.225
A l'intérieur, bureau	0.5	0.075
Nuit	0	0

Tableau 1.1. Densité de puissance lumineuse en fonction des conditions externes et densité de puissance électrique correspondante avec une cellule photovoltaïque ayant un rendement de 15%.

1.5 Bilan des sources disponibles

La densité de puissance pour multiples sources d'énergie est montrée dans le tableau ci-dessous. A partir de celui-ci, on peut remarquer bien l'énergie solaire pourrait fournir une forte et durable puissance convenable aux applications IOT et noeuds de capteurs en plein air comme celles d'une ville intelligente.

Source d'énergie	Densité de puissance	Environnement dont s'effectue la conversion d'énergie
Radiofréquence < 1	<1 μ W/m ²	Dans les zones urbaines
Lumineuse	100 mW/m ² 100 μ W/m ²	En plein soleil. En un bureau sous éclairage artificiel.
Thermoélectrique	60 μ W/m ²	Four, engins de combustion, chaleur humaine.
Vibrationnel	4 μ W/m ³ 800 μ W/m ³	Machines avec engins rotationnels .Mouvements humains.
Micro-éolienne	1 mW/m ²	En plein air.
Générateurs en Mains	30 W/kg	Actions humaines sur des machines spécifiques
Mouvement de talon humain	7 W/homme de 70 kg à 1 cm de déviation en une marche de 1 Hz.	Insertion par chaussette avec un mouvement de la marche.

Tableau 1.2 .Densité de puissance débitée par quelques sources d'énergies [29].

Une possibilité pour comparer les sources de façon équivalente revient à regarder leurs niveaux de densité de puissance. De toute évidence, l'énergie photovoltaïque est

celle qui présente de loin la plus grande densité de puissance. Cependant, l'inconvénient majeur de cette source réside dans sa non-régularité.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs sources et techniques de récupération d'énergie pour l'autonomie énergétique des capteurs communicants ont été étudiées. Seules les sources permettant une intégration de systèmes de l'ordre du cm^3 ont été retenues.

Les techniques de récupération d'énergie des vibrations mécaniques, magnétique, thermique, et l'énergie des radiations (ondes lumineuses et Radiofréquences) ont été étudiées. Ce qui nous a permis de dresser un bilan. Les deux paramètres essentiels sont aussi mentionnés, qui sont la puissance de sortie qu'il puisse fournir à l'application qu'il alimente et le rendement maximal total du transducteur et son circuit de conditionnement, la source d'énergie solaire y apparait comme la plus élevée. Cependant, l'énergie des ondes RF est omniprésente dans notre environnement urbain et l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie RF est de plus bien supérieure à celle obtenue avec des récupérateurs d'énergie photovoltaïque.

Chapitre 2 Système de récupération d'énergie

2.1 Introduction

L'énergie solaire est la première source d'énergie renouvelable exploitée sur Terre. Elle ne produit pas de gaz à effet de serre et de ce fait, contribue à la lutte contre le changement climatique. De plus, elle est gratuite, non polluante et peut être produite sur le lieu de consommation.

Ce chapitre est dédié à la conception de notre système de récupération d'énergie dans le domaine de l'internet des objets par le soleil ou bien le photovoltaïque.

Dans ce chapitre, on va décrire l'approche suivie dans notre travail. Nous allons donner l'architecture de notre système à concevoir pour détailler l'approche étudiée et bien montrer les étapes et l'approche utilisée, une description de processus de travail est aussi introduite dans le chapitre.

2.2 Architecture de système

Afin de mieux expliquer notre système et de montrer tous ces détails, une architecture est formée pour montrer le processus de notre travail :

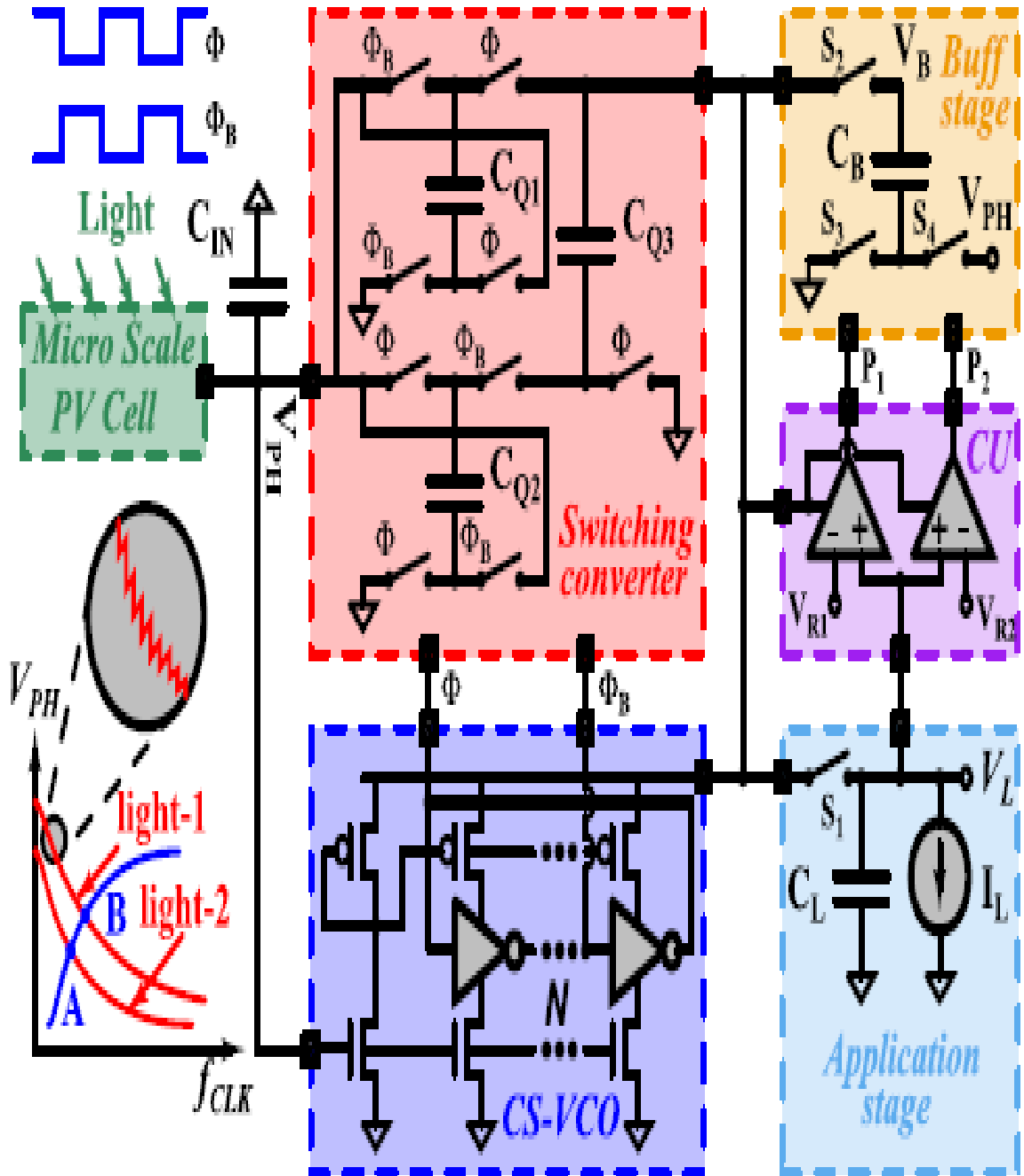


Figure 2.1. Architecture de gestion d'énergie proposée et les signaux de commande associés pour maintenir la régulation à la charge. V_{PH} représente la tension aux bornes de la cellule PV et f_{clk} représente la fréquence du convertisseur de commutation.

L'architecture de gestion de puissance proposée et les signaux de commande associés sont représentés sur la figure 2.1 Elle comprend un convertisseur élévateur à condensateur commuté pour amener la tension de sortie deux fois supérieure à la tension d'entrée, un oscillateur de contrôle de tension (CS-VCO) génère des fréquences de commutation pour le convertisseur élévateur, une unité de contrôle (CU) pour réguler la tension de charge, un étage tampon pour stocker l'excès d'énergie pour l'utilisation futures, et un étage de la charge . En raison de la forte densité de puissance et de la nature omniprésente de la lumière (sauf la nuit), une cellule PV a été choisie comme source d'énergie pour l'alimentation du nœud IOT. L'étage tampon a deux modes : l'un est le mode stockage et l'autre est le mode convertisseur (DC-DC).

Le mode de stockage sera activé dès qu'il y aura suffisamment d'énergie ambiante pour alimenter la charge et que le mode convertisseur sera activé une fois que l'énergie ambiante sera insuffisante pour alimenter la charge. Pendant le mode de stockage, il faudra stocker l'énergie excédentaire dans le condensateur tampon CB et pendant le mode convertisseur, il agira comme un circuit de pompe de charge linéaire, qui va pomper l'énergie stockée dans l'étape d'application.

Le CU comprend un générateur de référence associé à un circuit de démarrage, des comparateurs analogiques et quelques portes logiques pour générer les signaux de commande requis pour le système. Le générateur de référence génère deux tensions de référence VR1 et VR2, où VR1 est supérieur à VR2 de quelques dizaines de mV. Leur différence devrait être supérieure à la tension de décalage de l'amplificateur opérationnel, afin d'éviter un déclenchement injustifié du comparateur. En dehors de cela, un circuit de démarrage est nécessaire pour faire passer le système de l'état de veille à un état actif si la tension d'entrée est inférieure à la tension de seuil MOSFET. Il générera une tension auxiliaire supérieure à la tension de seuil MOSFET, qui activera éventuellement les commutateurs du convertisseur DC-DC1 et commencera à transférer les charges de la récolteuse vers le circuit de charge. Les travaux précédents rapportent des solutions pour les problèmes de démarrage [30], [31] et par conséquent, cette implémentation ne focalise pas les problèmes de démarrage mais suppose que le super condensateur CB est initialement chargé de faire passer le système de l'état de veille à un état actif.

Afin de maintenir la régulation à la charge, VL est comparée aux tensions de référence internes VR1 et VR2, pour générer des signaux de commande, P1 et P2, et des signaux de commutation associés, S1, S2, S3 et S4, comme représenté sur la figure 2.1. Initialement, VL est inférieur à VR1 et VR2, et les signaux de commande correspondants sont P1 = 1 et P2 = 1, et les signaux de commutation associés sont S1 = 1, S2 = 1, S3 = 0 et S4 = 1, qui activera éventuellement le tampon en tant que mode convertisseur et commencer à fournir des charges de l'étape tampon à l'étape de l'application pour répondre à la déficience de charge. Une fois la régulation de charge atteinte pendant le demi-cycle négatif de l'horloge et si l'énergie solaire est plus que suffisante pour alimenter la charge, les signaux de commande correspondants seront P1 = 0 et P2 = 0, et les signaux de commutation associés seront S1 = 0, S2 = 1, S3 = 1 et S4 = 0, ce qui finira par activer l'étage tampon comme mode de stockage pour recharger le super condensateur CB. Au contraire, pendant le demi-cycle positif, si l'énergie ambiante est insuffisante pour alimenter la charge, par exemple VL < VR2, les signaux de commande, P1 = 1 et P2 = 1, et les signaux de commutation associés, S1 = 1, S2 = 1, S3 = 0 et S4 = 1, activera l'étage tampon en mode convertisseur, afin de maintenir la régulation à la charge. Par conséquent, en raison de l'implication de la commutation complémentaire entre l'étage tampon et l'étage d'application, on pourrait s'attendre à une ondulation de quelques dizaines de mV avec l'alimentation régulée. L'amplitude de cette ondulation dépend de la tension de décalage de l'amplificateur opérationnel et du retard de la boucle de rétroaction. (voir la figure 2.13)

2.2.1 Cellules solaires

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible.

a Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont d'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron /trou dans le matériau semi-conducteur :
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Pour émuler la cellule photovoltaïque dans le moteur de simulation, un modèle équivalent électrique est utilisé comme source d'énergie d'entrée comme indiqué sur la figure 2.2. Pour trouver les paramètres du modèle de ce circuit équivalent, une expérience a été réalisée avec deux cellules PV connectées en série (Modèle 1-100, de Solar World Inc. [32]).

Pour émuler un tel éclairage lumineux, le photo courant ISC varie de 2,70 mA à 3,50 mA, ce qui correspond à 600lx à 1000lx, et les variations correspondantes de tension aux bornes des cellules PV, de tension de stockage d'énergie et de tension de charge.

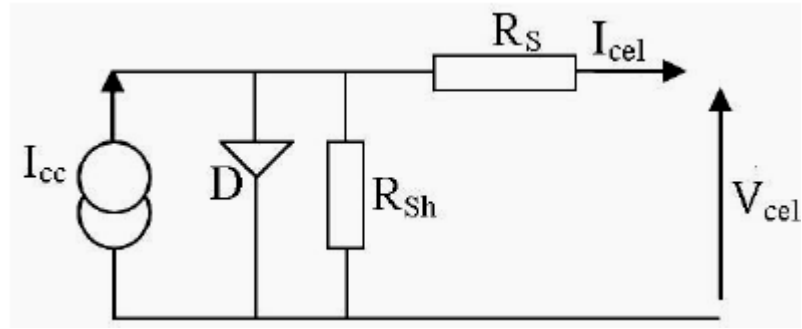


Figure 2.2. schema equivalent d'une cellule photovoltaïque.

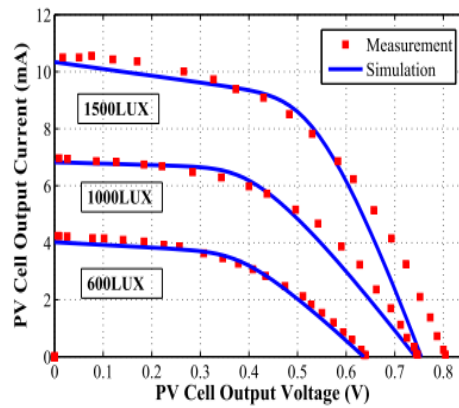


Figure 2.3. Variation du courant de sortie en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque pour trois conditions d'éclairage différentes.

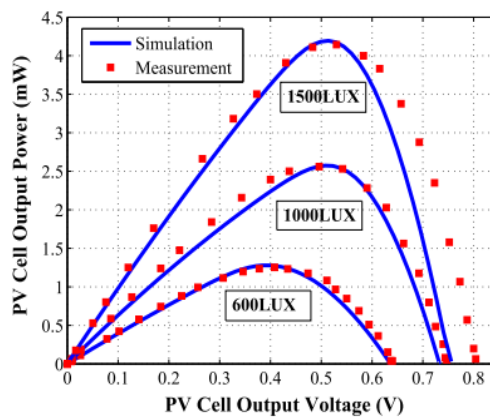


Figure 2.4. variation de puissance en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque pour trois conditions d'éclairage différentes.

2.2.2 L'oscillateur en anneau

Le nombre impair d'inverseurs dans le circuit représenté sur la figure 2.5 forme une boucle fermée avec rétroaction positive et est appelé un oscillateur en anneau. La fréquence d'oscillation est donnée par [33] :

$$F_{osc} = \frac{1}{n(T_{phl} + T_{plh})} \quad (2.1)$$

En supposant que les onduleurs sont identiques et n est le nombre (impair) d'inverseurs dans l'oscillateur en anneau. Comme l'oscillateur en anneau est auto-amorçant, il est souvent ajouté à une partie de test d'une plaquette pour indiquer la vitesse d'un processus particulier. La somme des retards haut-bas et bas-haut est utilisée pour calculer la période d'oscillation car chaque onduleur commute deux fois pendant une période d'oscillation unique.

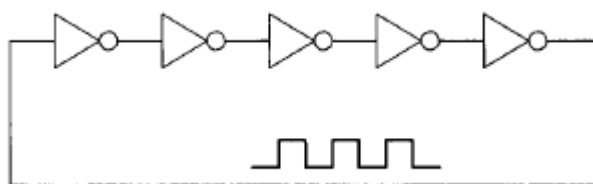


Figure 2.5. Oscillateur en anneau à cinq étages.

- La période des oscillations est égale à :

$$T_{osc} = 2.n . \tau . \quad (2.2)$$

Où N est le nombre d'étages dans l'anneau et τ est le délai de la cellule.

- Il existe principalement deux structures d'oscillateurs en anneau:

- La première consiste à cascader les inverseurs CMOS comme le montre la Figure 2-5. Dans ce cas, le nombre d'étages N doit être impair.

Le déphasage entre les signaux de sortie de chaque étage est égal à $\Phi = 2\pi N$.

Plus on a besoin de phases de sortie, plus on ajoute d'inverseurs. En augmentant le nombre d'étages, on diminue la fréquence maximale de l'oscillateur.

- La deuxième structure dite différentielle basée également sur le principe de mise en cascade de N cellules (N pair ou impair ici) de retard avec une inversion dans la boucle comme le montre le schéma de la Figure 2.6.

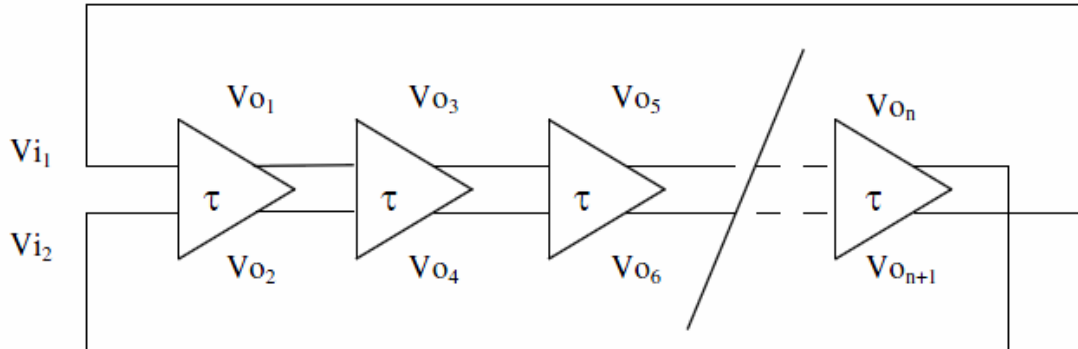


Figure 2.6. Structure de l'oscillateur en anneau différentiel

Ce type d'oscillateur est surtout utilisé dans des applications numériques en tant qu'horloge de cadencement ou pour des applications qui nécessitent beaucoup de phases.

Leur restriction d'utilisation est principalement due à des performances en bruit de phase très inférieures aux exigences des standards de communications sans fil. Cependant leur surface sur silicium est très faible.

Lorsque des onduleurs identiques sont utilisés, la capacité sur l'entrée / la sortie de l'onduleur est la somme de la capacité d'entrée d'un onduleur avec la capacité de sortie de l'onduleur.

$$C_{tot} = C_p + C_n + \frac{3}{2}(C_p + C_n) = \frac{5}{2}(C_p + C_n). \quad (2.3)$$

Où, encore une fois, $C_p = C_{ox} * W_p * L_p$ et $C_n = C_{ox} * W_n * L_n$. (2.4)

Le délai est ensuite calculé en utilisant :

$$T_{phl} + T_{plh} = 0.7 * (R_n + R_p) * C_{tot}. \quad (2.5)$$

a L'inverseur CMOS

L'inverseur CMOS est un élément de base pour la conception de circuits numériques. Comme le montre la figure 2.7, l'onduleur effectue l'opération logique de A à \bar{A} . Lorsque l'entrée de l'onduleur est connectée à la masse, la sortie est amenée à VDD par l'intermédiaire de l'appareil PMOS M2 (et M1 s'éteint). Lorsque la borne d'entrée est connectée à VDD, la sortie est reliée à la masse par l'intermédiaire de l'équipement NMOS M1 (et M2 s'éteint). L'onduleur CMOS a plusieurs caractéristiques importantes qui sont abordées dans ce chapitre : par exemple, sa tension de sortie passe du VDD à la masse contrairement à d'autres familles logiques qui n'atteignent jamais tout à fait les niveaux d'alimentation. En outre, la dissipation de puissance statique de l'inverseur CMOS est pratiquement nulle, l'onduleur peut être dimensionné pour fournir des capacités égales d'approvisionnement et de descente, et le seuil de commutation logique peut être réglé en changeant la taille du dispositif [34].

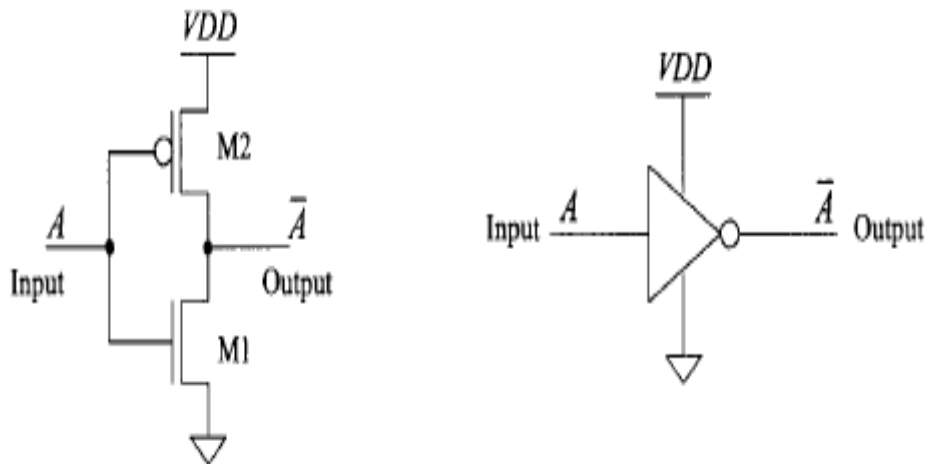


Figure 2.7. le schéma et le symbole logique d'un inverseur CMOS

b Caractéristiques de commutation

Le comportement de commutation de l'onduleur peut être généralisé en examinant les capacités parasites et les résistances associées à l'onduleur. Considérons l'onduleur représenté à la figure (2-8) avec son modèle numérique équivalent. Bien que le modèle soit montré avec les deux interrupteurs ouverts, dans la pratique l'un des commutateurs est fermé, gardant la sortie connectée à VDD ou à la masse. La capacité d'entrée effective de l'onduleur est :

$$C_{in} = \frac{3}{2}(C_n + C_p) = C_{inn} + C_{inp}. \quad (2.6)$$

Avec : $C_n = W_n * L_n * C_{ox}$ et $C_p = W_n * L_n * C_{ox}$. (2.7)

- La capacité de sortie effective de l'onduleur est simplement :

$$C_{out} = C_n + C_p = C_{outn} + C_{outp}. \quad (2.8)$$

-Les délais de propagation intrinsèque de l'onduleur sont :

$$T_{pLH} = 0.7 * R_{p2} * C_{out} \quad \text{ET} \quad T_{PHL} = 0.7 * R_{n1} * C_{out}. \quad (2.9)$$

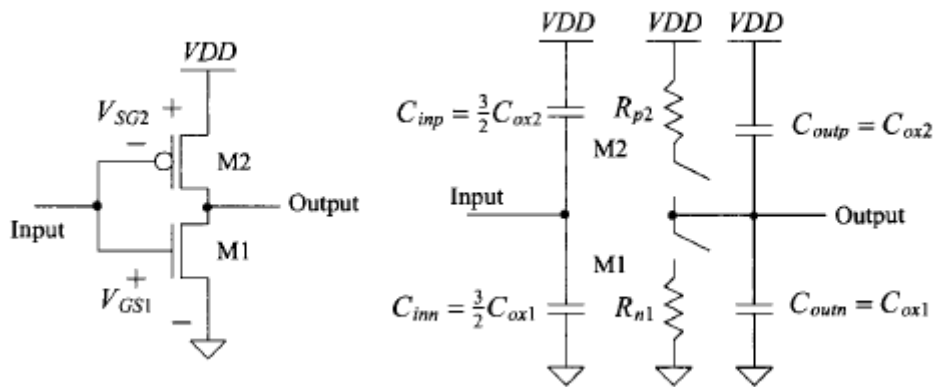


Figure 2.8. Caractéristiques de commutation de l'onduleur CMOS à l'aide de modèle numérique.

c Générateur d'horloge

Un réseau d'inverseurs de courant à cinq étages ($M = 5$) (CS-INV) et deux déphaseurs sont utilisés pour obtenir les fréquences d'horloge désirées pour le point de puissance maximum. Les tensions VL et VIN sont utilisées pour l'alimentation électrique et pour la commande de la fréquence d'oscillation, respectivement. Les (W/L) de PD1 et NB1 sont maintenus à $(0,36 / 0,18) \mu\text{m}$ et (W / L) de PO1 - POM et NO1 - NOM sont maintenus à $(1,80 / 0,18) \mu\text{m}$ et $(0,90 / 0,18) \mu\text{m}$, respectivement. Les (PM / L) de PMOS et de NMOS des CSINV (INV1-INV5) sont maintenus à $(0,90 / 0,18) \mu\text{m}$ et (W / L) de PP1 - PPM et NP1 - NPM sont maintenus à $(0,72 / 0,18) \mu\text{m}$ et $(0,36 / 0,18) \mu\text{m}$, respectivement, pour cette mise en œuvre. Un registre maître-esclave statique à charge d'horloge réduite est utilisé pour réaliser bascule [35]. Pour conduire des charges lourdes, une série d'inverseurs progressivement dimensionnés sont incorporés après la bascule et leurs tailles sont données dans la figure (2.9), où W représente la largeur des transistors de puissance combinés qui sont entraînés par le générateur d'horloge et représente chaque étage efforts. Une discussion détaillée des inverseurs de dimensionnement progressifs peut être trouvée dans [36] et [37]. La figure (2-10) montre la forme d'onde simulée du générateur d'horloge sans chevauchement sous une tension d'alimentation de 1,5 V et une tension de commande de 405 mV. La fréquence d'oscillation atteinte avec cette condition d'entrée est de 15 MHz, avec un coût de consommation d'énergie de 12,3 μW .

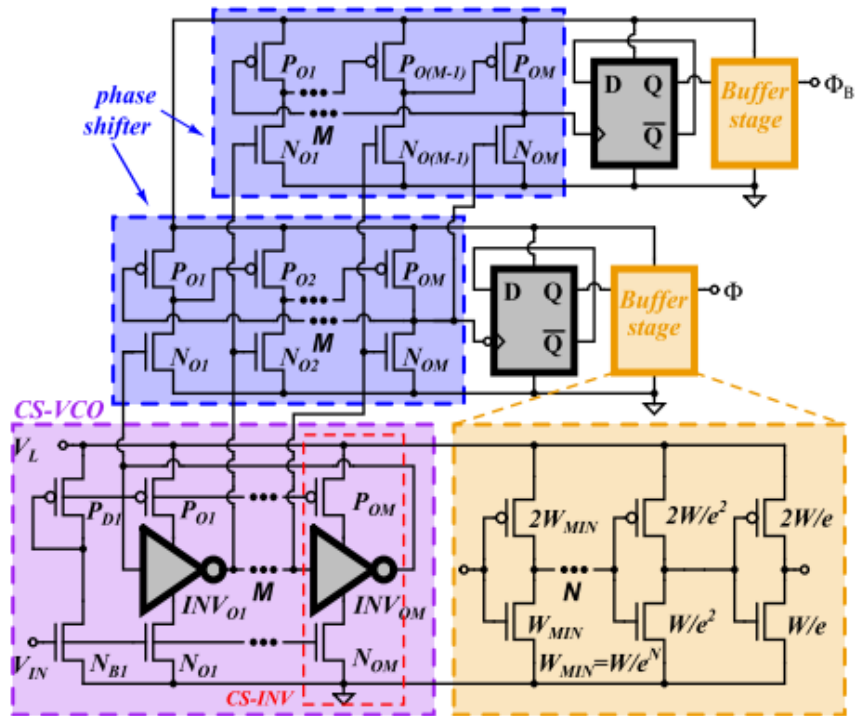


Figure 2.9. Circuit de générateur d'horloge sans chevauchement.

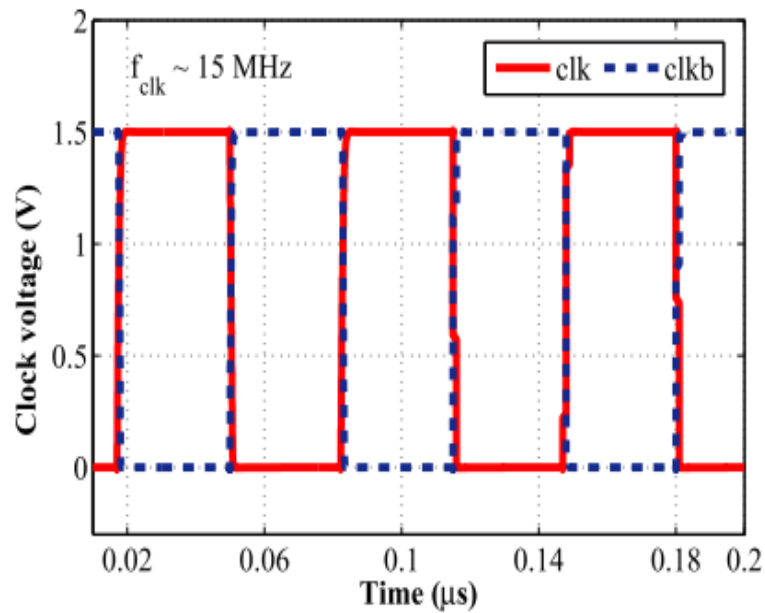


figure 2.10. Forme d'onde simulée de clkb sous une tension de commande de 450 mv et une tension d'alimentation de 1.5v.

2.2.3 capacité commutée

En 1972 David fried a montré que sous certaines conditions ;il y'a équivalence entre capacité commutée et une résistance figure (2-11) le principe d'une capacité commutée consiste a charger et decharger la capacité suivant un certain rythme ;ceci ayant pour effet de présenter un comportement analogue a celui d'une résistance.

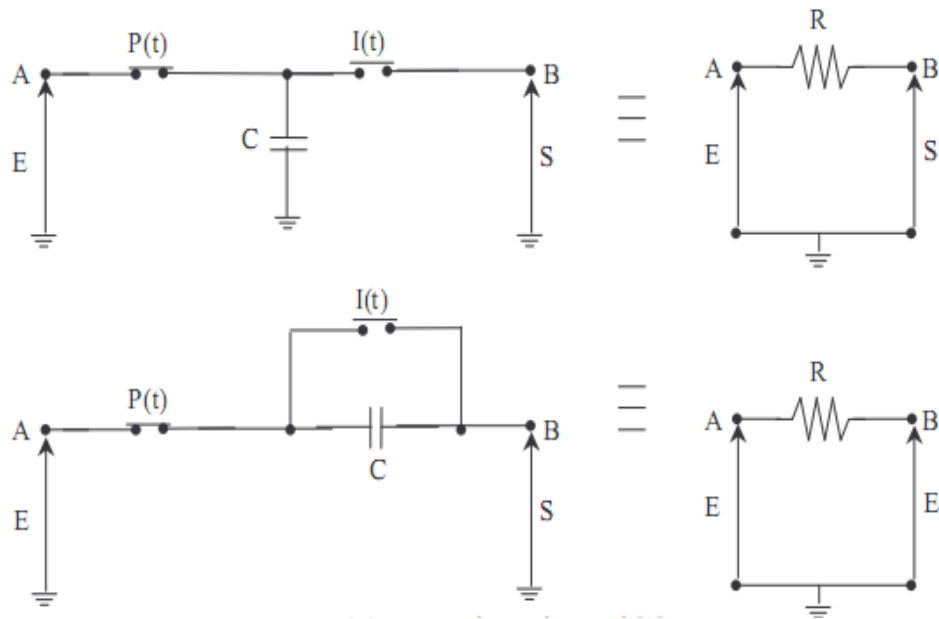


Figure 2.11. Equivalence de Fried.

Les signaux de commande des interrupteurs $P(t)$ et $I(t)$ (figure 2.12) ont une période et une durée respectivement égales à T_0 et τ .

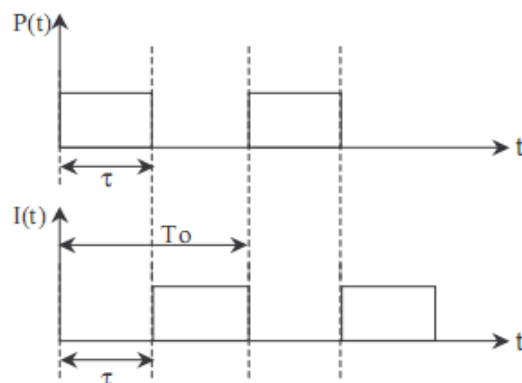


Figure 2.12. Signaux de commande des interrupteurs.

Les interrupteurs $P(t)$ et $I(t)$ sont commandés par deux horloges Φ_1 et Φ_2 . Ces deux interrupteurs sont complémentaires, c'est-à-dire lorsque l'interrupteur $P(t)$ est ouvert l'interrupteur $I(t)$ est fermé et lorsque l'interrupteur $I(t)$ est ouvert ; l'interrupteur $P(t)$ est fermé. On peut considérer que les tensions V_{in} et V_{out} sont constantes pendant une période d'horloge car ces tensions varient peu. La charge de la capacité pendant la phase d'activité de l'horloge Φ_1 est : $Q_1 = C \cdot V_{in}$ et la charge de la capacité pendant la phase d'activité de l'horloge Φ_2 est : $Q_2 = C \cdot V_{out}$. Pendant une période la charge correspond à $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ de l'entrée vers la sortie. Ce qui est équivalent à un courant moyen $I_{moy} = \Delta Q / \Delta T$. La résistance équivalente entre l'entrée et la sortie est donc :

$$R_{eq} = \frac{V_{in} - V_{out}}{I_{moy}} = \frac{\Delta T}{C_s} = \frac{1}{f_c C_s} \quad (2.10)$$

a Fonctionnement de capacité commutée

La figure 2.13 montre le schéma de circuit complet de l'architecture de gestion de puissance proposée. Une pompe de charge de topologie arborescente [38] est adoptée comme convertisseur de commutation pour une meilleure capacité de transfert de charge, par rapport à une topologie de pompe à charge linéaire. Pour réaliser des commutateurs de transfert de charge (CTS), on utilise des transistors n-MOS et p-MOS et des portes de transmission. Le placement des CTS respectifs est fait en fonction de leurs tensions aux bornes afin de réduire la résistance [39]. Les condensateurs de pompage sont réalisés par des condensateurs de porte MOS sur puce pour obtenir une surface de compact.

Pendant le demi-cycle positif de l'horloge ϕ , le condensateur C_2 sera chargé depuis la récolteuse et le condensateur C_1 sera déchargé vers le condensateur C_3 . Tandis que, dans le demi-cycle négatif de l'horloge, le condensateur C_1 est chargé par la récolteuse et les condensateurs C_2 et C_3 ainsi que V_{PH} déchargeront l'un ou l'autre des condensateurs C_L ou C_B , en fonction des signaux de commande VM_8 et VM_9 .

Pour générer ces signaux de contrôle, CP_1 compare V_{DIV} avec V_{REF1} et déclenche VM_8 ou VM_9 pendant le demi-cycle négatif de Ψ , Et leurs chronogrammes correspondants sont représentés sur la Figure 2.13 Selon le déclenchement du comparateur, le convertisseur de commutation connecte l'un ou l'autre tampon stade

ou étape d'application. Si V_{DIV} est inférieur à V_{REF1} pendant le demi-cycle négatif de ϕ , V_{M8} déclenchera le transistor M_8 et V_{M9} désactivera les deux transistors M_9 et M_{11} , afin de maintenir la régulation de charge. Une fois que l'énergie d'entrée satisfait aux exigences d'alimentation, c'est-à-dire, complémentaire entre l'étage d'application et l'étage tampon, $V_{DIV} > V_{REF1}$, M_8 sera éteint et M_9 , M_{11} sera activé pour stocker l'énergie en excès. Par conséquent, en raison de la commutation V_L est régulée et l'énergie excédentaire restante est stockée dans le condensateur de stockage C_B , pour des utilisations futures. Maintenant, si V_{DIV} est encore plus bas que V_{REF2} , cela signifie que l'énergie de balayage n'est pas suffisante pour répondre aux exigences de la charge, un signal de contrôle Ψ déclenchera le transistor M_{12} , qui permettra alors la décharge de C_B vers le C_L afin d'atténuer tout déséquilibre entre l'énergie d'entrée disponible et l'énergie de sortie

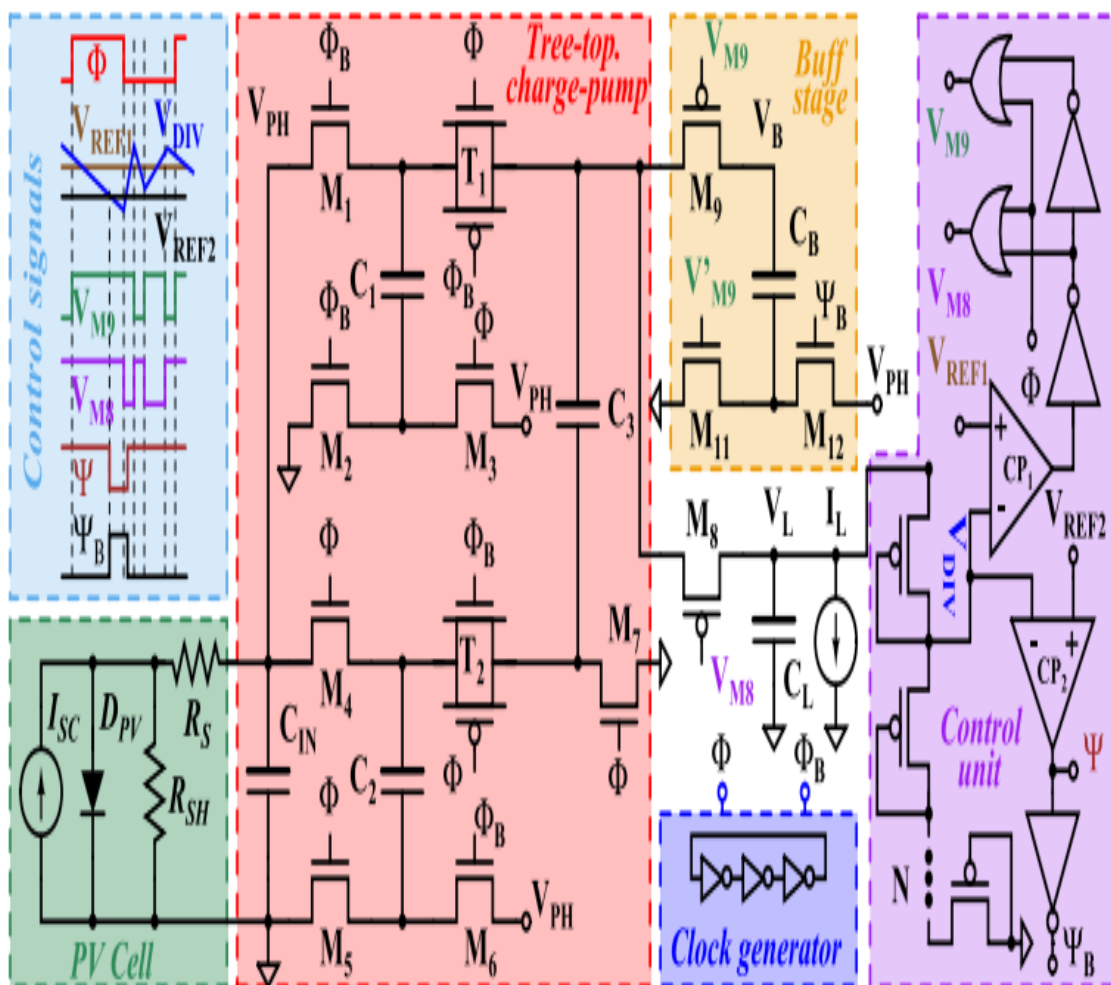


Figure 2.13. Schéma électrique de l'architecture de gestion de l'alimentation proposée.

2.2.4 Unité de contrôle

a Comparateur de tension

La fonction comparaison consiste à comparer une tension d'entrée V_E , variable au cours du temps, à une tension constante V_{ref} pour le comparateur à un seuil, ou à deux tensions constantes V_{ref1} et V_{ref2} pour le comparateur à deux seuils. Les tensions constantes V_{ref} , V_{ref1} , et V_{ref2} sont appelées tensions de seuil. Lorsque la tension V_E franchit une tension de seuil, la tension de sortie V_S du comparateur bascule d'une valeur V_{SAT1} à une valeur V_{SAT2} (ou inversement).

Il existe deux versions du comparateur de tension à simple seuil :

- Le comparateur non-inverseur.
- Le comparateur inverseur.

b Les portes logiques NOR

La porte NOR donne l'exact inverse de leur sortie d'une porte OU. Là encore, il en existe une version avec deux entrées. Le tableau et symboles qui suivent sont ceux d'une porte NOR à deux entrées.

Entrée 1	Entrée 2	Sortie
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Tableau 2.1. Les entrées et la sortie d'une porte NOR.

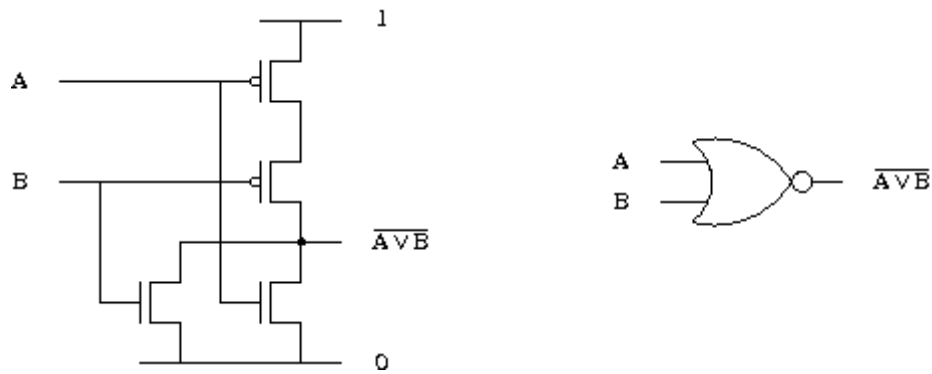


Figure 2.14. Schéma équivalent d'une porte logique NOR.

Par ailleurs, il est possible de recréer les portes ET, OU et NON en utilisant des montages composés uniquement des portes NOR. Comme quoi, la porte NAND n'est pas la seule à avoir ce privilège. On peut donc concevoir un circuit en n'utilisant que des portes NOR. Pour donner un exemple, sachez que les ordinateurs chargés du pilotage et des navigations des missions Apollo étaient intégralement conçus avec des portes NOR.

c principe de fonctionnement

Le circuit de référence à bande interdite classique limitant son fonctionnement en dessous de 1,25V, un circuit de référence de courant CMOS sous-seuil [40] a été choisi pour générer des tensions de référence, $V_{REF1} = 810 \text{ mV}$ et $V_{REF2} = 800 \text{ mV}$, pour cette implémentation. Le fonctionnement détaillé des circuits du générateur de référence et du comparateur peut être trouvé dans des travaux antérieurs [41].

Pendant le demi-cycle négatif de l'horloge, si la tension d'échantillonnage, V_{DIV} , est supérieure à la tension de référence, V_{REF1} , le signal de commande $VM9$ activera les transistors $M9$ et $M10$, et le signal de commande $VM8$ désactivera le transistor $M8$. D'autre part, si la tension V_{DIV} est inférieure à la tension de référence V_{REF1} , le signal de commande $VM8$ activera le transistor $M8$ et éteindra respectivement les transistors $M9$ et $M10$ pour maintenir la régulation. Cependant, si le circuit de référence tension limite le fonctionnement en dessous de 1,25 V, le circuit de référence de courant CMOS sous-seuil [40] a été choisi pour générer des tensions de référence, $V_{REF1} = 810 \text{ mV}$ et $V_{REF2} = 800 \text{ mV}$, pour cela la mise en œuvre.

Cependant, si la tension V_{DIV} est encore inférieure à la deuxième tension de référence V_{REF2} , alors le signal de commande allume les transistors M11 et M9 par le signal de commande PSI, Pour transférer les charges de CB vers CL. Par conséquent, un déclenchement approprié des signaux de commande est effectué pour fournir une meilleure régulation de la charge.

2.3 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était l'explication de l'architecture de gestion d'énergie proposée et les signaux de commande associés pour maintenir la régulation de la charge. Nous avons commencé de présenter l'architecture de système,tout en détaillant le principe général de l'architecture que nous avons retenu. Nous avons, ensuite, expliqué le principe de fonctionnement de chaque étage.

Chapitre 3 Résultats de simulation

3.1 Introduction

La consommation des systèmes et objets communicants sans fil est de plus en plus conséquente par rapport à la quantité échangée et à la portée souhaitée, ce qui réduit d'autant la durée de vie de la batterie. Pour rendre ces système et objets communicants plus autonomes en énergie et augmenter la durée de la batterie, les systèmes de récupération d'énergie solaire sont une alternative très intéressante

Dans ce chapitre on s'intéresse aux différents circuits de récupération d'énergie qui sont basés sur les transistors MOS et les capacités.

3.2 Système de conception avancé (ADS)

Advanced Design System est le premier logiciel d'automatisation de conception électronique au monde pour les applications RF, micro-ondes, numériques haute vitesse et électroniques de puissance. Dans une interface puissante et facile à utiliser, ADS est le pionnier des technologies les plus innovantes et commercialement performantes, telles que les X-paramètres * et les simulateurs EM 3D, utilisées par des entreprises leaders dans les domaines de la communication sans fil & réseau, aérospatial & défense, automobile et industries énergétiques. Pour le WiMAX™, le LTE, les liaisons de données multi-gigabits par seconde, le radar, le satellite et les alimentations à découpage, ADS fournit une conception et une vérification complètes basées sur des normes avec des bibliothèques sans fil et d'autres applications spécifiques. Co-simulation dans une plateforme intégrée.

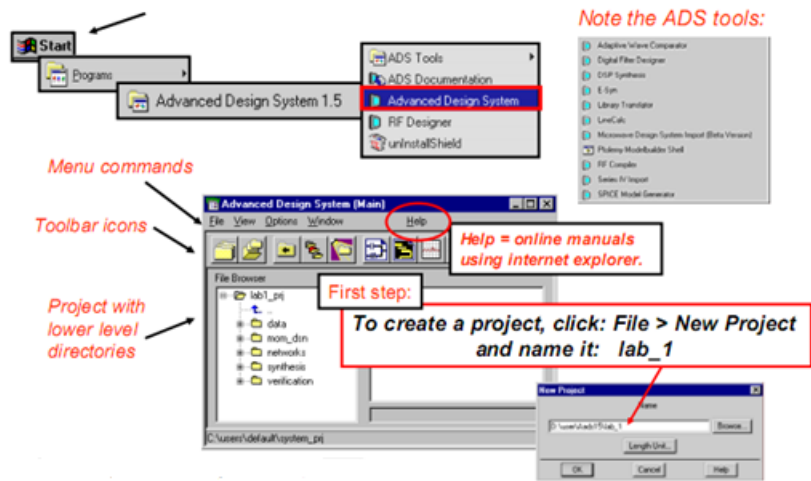


Figure 3.1. page d'ouverture de l'ADS.

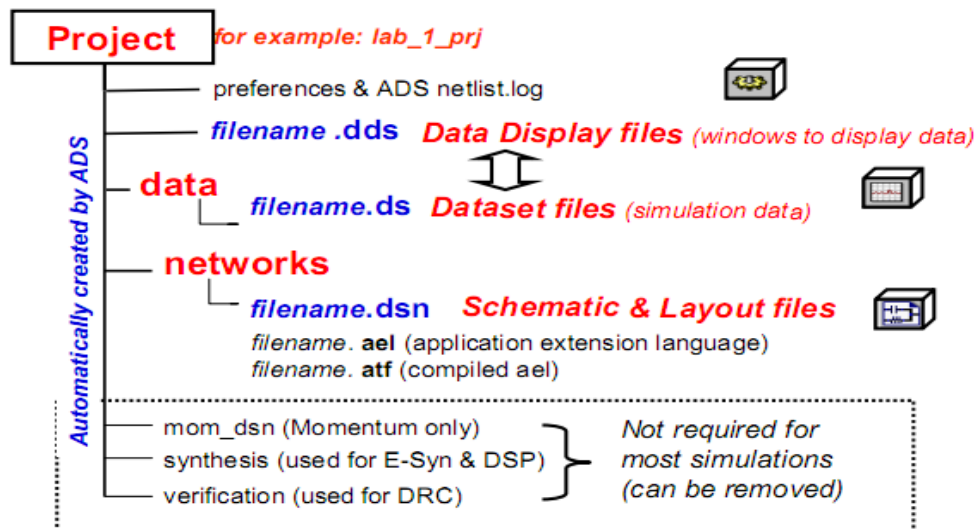


Figure 3.2. créations d'un nouveau projet sur ADS.

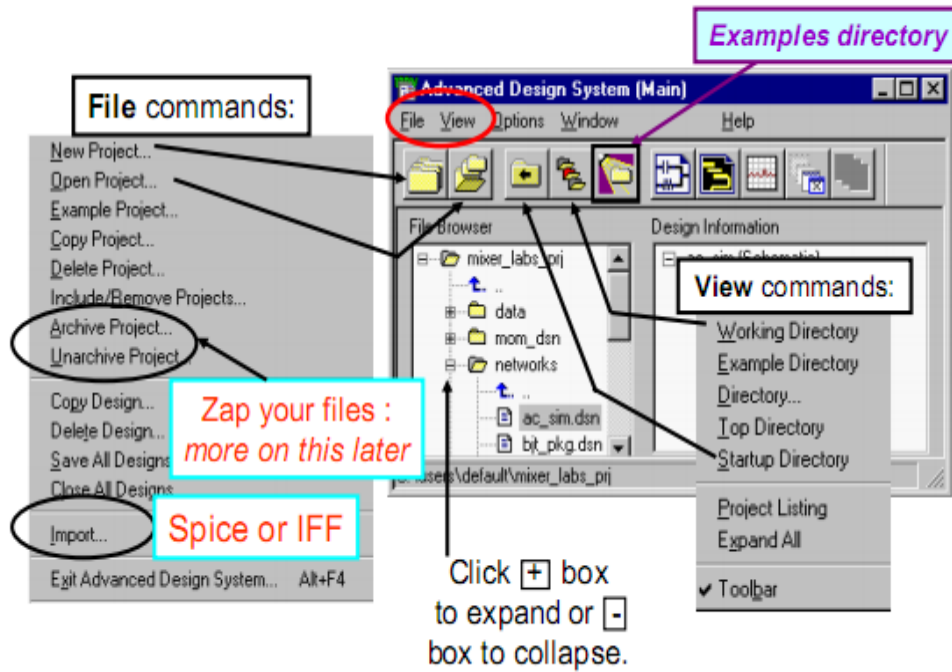


Figure 3.3. page d'accueil de l'ADS.

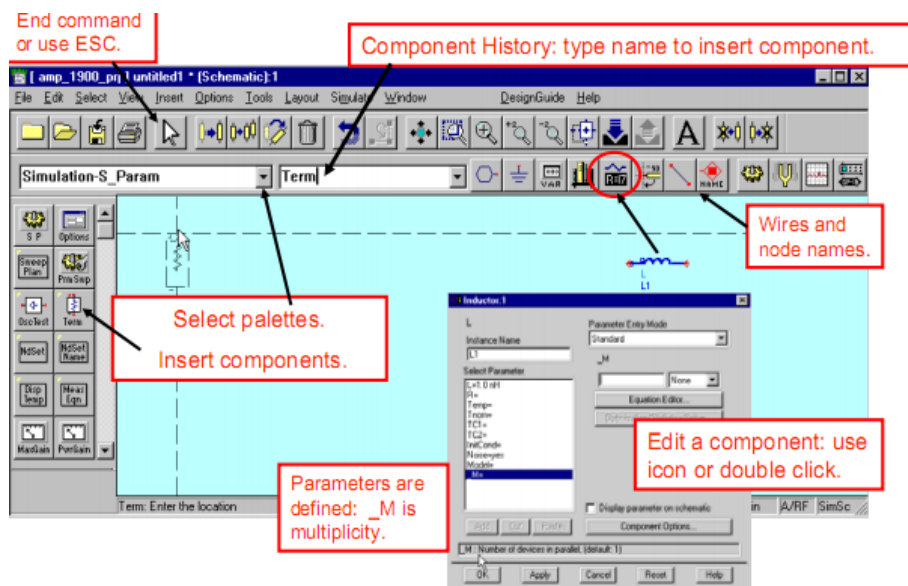


Figure 3.4. l'extraction d'un composant sur l'ADS

Cet inverseur est composé des transistors P et NMOS sous une tension d'entrée égale à 1.8 v. En remarque que la simulation de l'inverseur montre que la tension de sortie correspond à la tension estimée au départ ce qui implique que cet inverseur réalise la fonction exigé dans notre montage.

3.3.2 Comparateur idéal

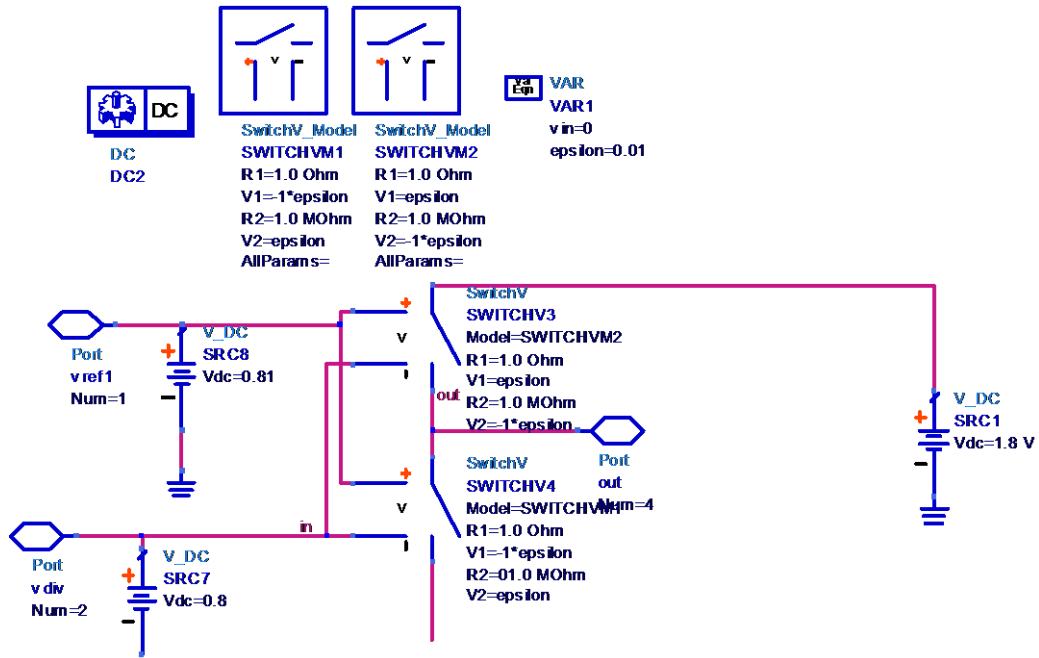


Figure 3.7. Schéma d'un comparateur idéal.

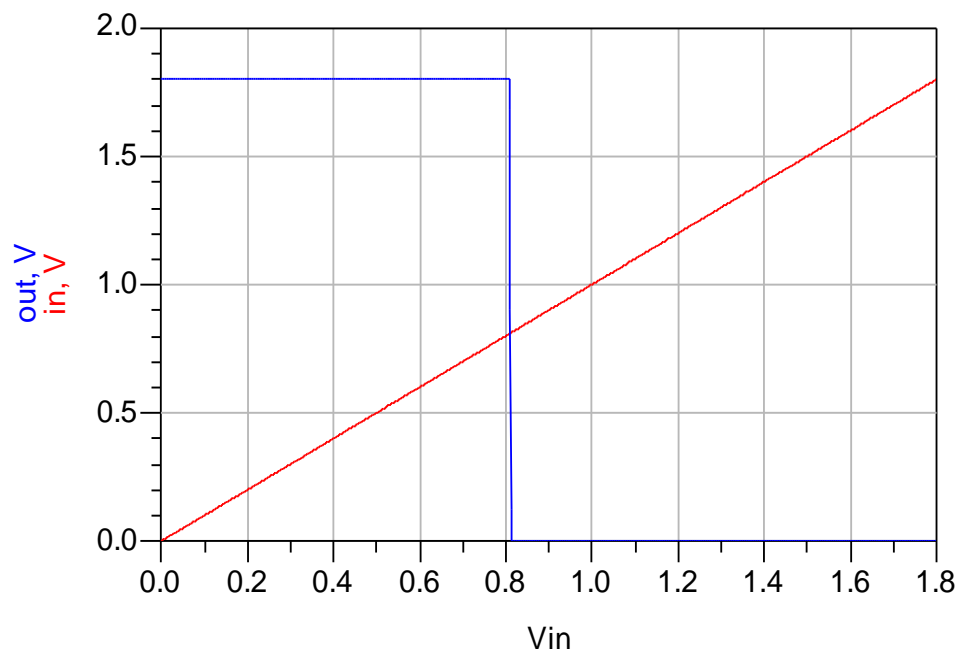


Figure 3.8. Caractéristique d'un comparateur de tension.

La figure 3.8 montre la caractéristique d'un modèle de comparateur donné dans la figure 3.7, V_{IN} représente la tension comparée à la tension de référence de 0.81v. quand v_{in} est inférieur à la tension de référence la tension de sortie de comparateur est égale à VDD. la sortie devient égale a 0v quand la tension de référence est supérieur a 0.81

3.3.3 Oscillateur en anneau

L'oscillateur en anneau conçu en technologie CMOS 0.18 μm .

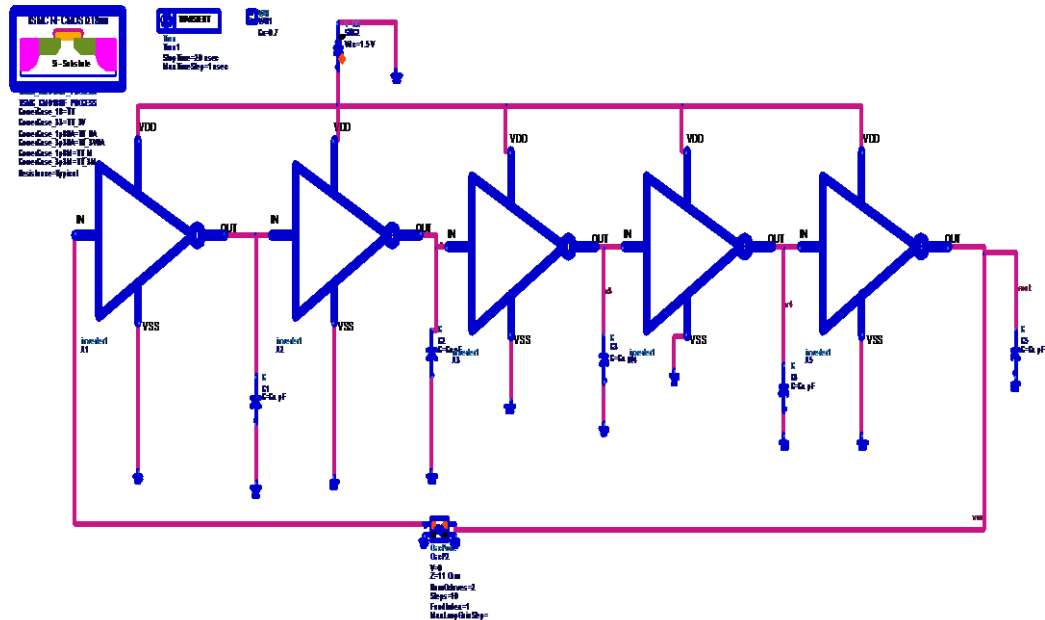


Figure 3.9. schéma d'un oscillateur en anneau.

Cet oscillateur est composé de 5 étages d'inverseurs où chaque étage est chargé par une capacité pour maîtriser le période du cycle généré. D'après la figure ci-dessous, on observe un signal périodique qui est déclenché après une période de temps transitoire de 10 ns. L'amplitude du signal généré est de 1.5 V conformément à la tension d'alimentation appliquée à cet oscillateur en anneau. La fréquence du signal généré est de 30 MHz mais elle peut être modulée en fonction du besoin et le fonctionnement exigé par l'architecture du système entier.

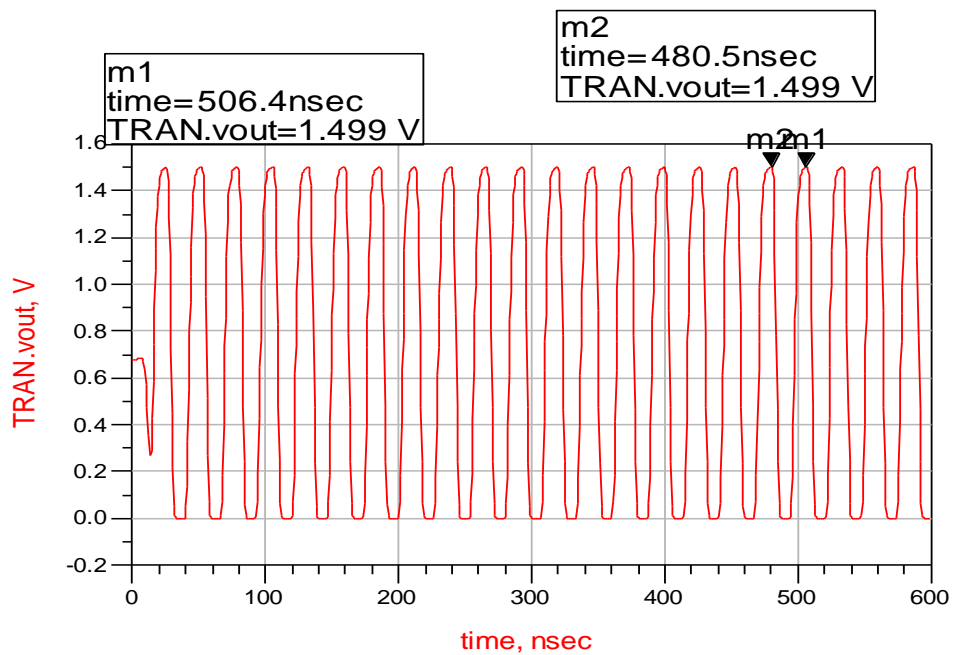


Figure 3.10. Tension d'oscillation.

Pour illustrer les différents signaux de notre oscillateur, nous avons choisi les deux sorties déphasées d'un déphasage de π . Nous constatons que la technologie CMOS exploitée dans notre conception répond largement aux exigences de notre cahier de charge ou la fréquence du signal doit varier entre 1MHz et 15 MHz et adapté selon le temps de charge-décharge de notre réseau de capacités commutés.

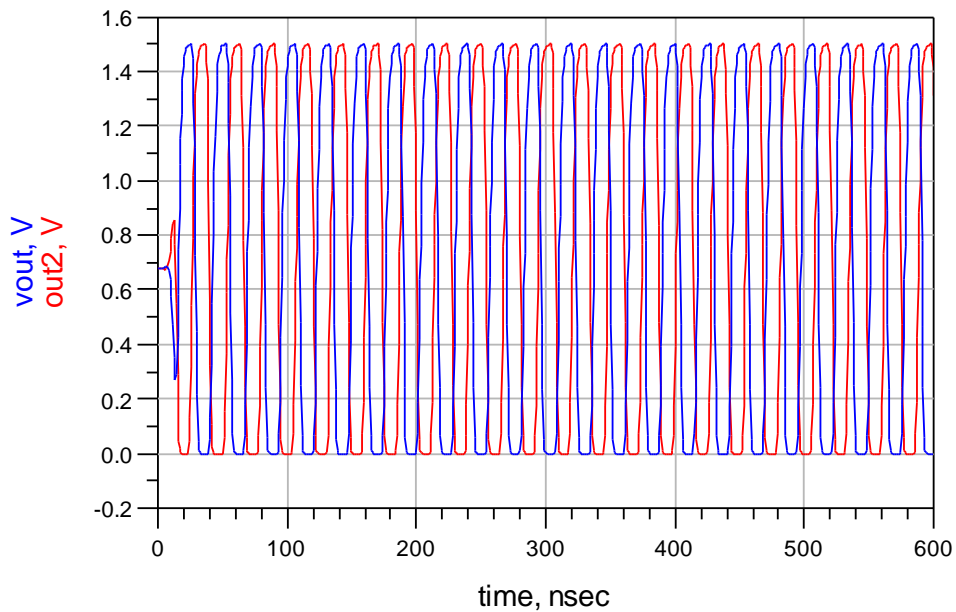


Figure 3.11. les deux tension de sortie Phi et Phib

a Oscillateur avec horloge de control

Cet oscillateur en anneau ne peut être fonctionnel tout le temps afin d'éviter toute consommation inutile de l'énergie récupérée. A cet effet, nous pouvons rajouter un circuit de commande et de déclenchement de notre oscillateur sous forme de transistors N et PMOS. Ces transistors peuvent être en état de conduction sous certaines conditions à savoir la tension minimale ou le seuil utilisé par la technologie CMOS 0.18 μ m qui est de 450mV. Toute tension supérieure à cette dernière pourrait déclencher notre oscillateur. Pour notre cas, la tension générée par notre récupérateur d'énergie solaire est d'environ de 0.6 V qui la tension chargée dans la capacité d'entrée C_{in} . Le transistor PMOS est également déclenché par une tension de commande $|V_{gsp}| > 0.45$ V. La technique utilisé à cet effet est similaire à celle de miroir du courant où la tension de drain du transistor NMOS est reportée au niveau de la grille du transistor PMOS afin d'avoir la tension exigée pour la conduction de ce dernier.

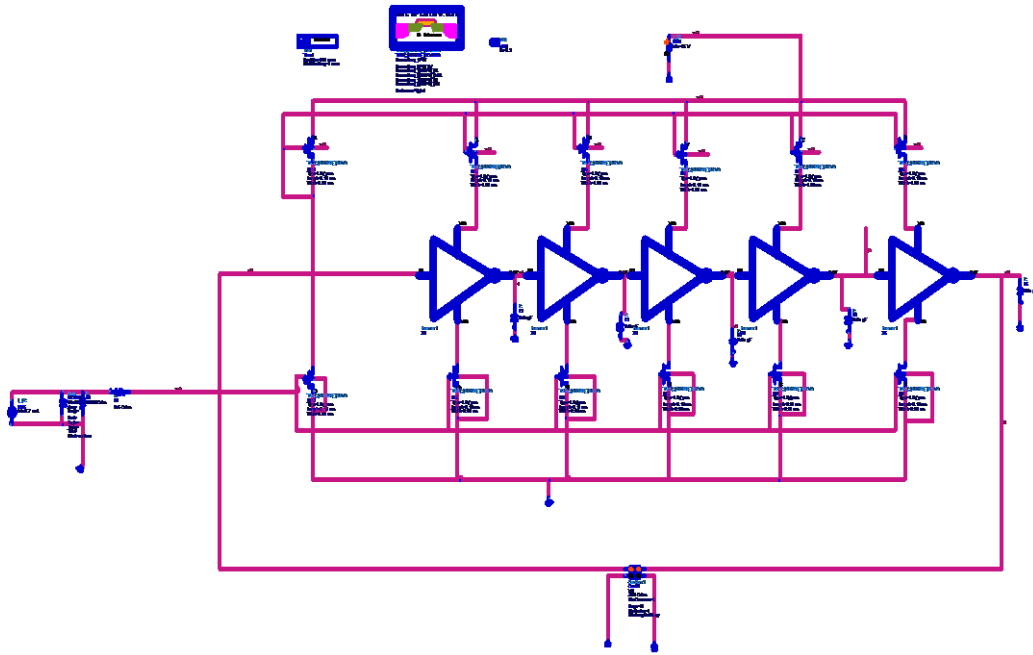


Figure 3.12. Schéma d'un oscillateur avec horloge de control.

Effectivement, notre montage a bien fonctionné dès l'application de la tension exigée où nous pouvons observer que les deux signaux déphasé PHI et PH1b sont générés. Cependant, les deux signaux ne sont pas totalement en opposition de phase vu l'existence de certaines capacité parasites qui sont engendrées par les transistors N et PMOS rajoutés pour le déclenchement de l'oscillateur. Bien évidemment, pour réguler ces deux signaux, il existe dans la littérature d'autres techniques qui permettent d'effectuer cette opération. Mais dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la faisabilité de cette architecture. D'ailleurs, la fréquence obtenue a baissé à cause des capacités parasites rajoutées. Mais elle est d'une valeur proche de 15 MHz.

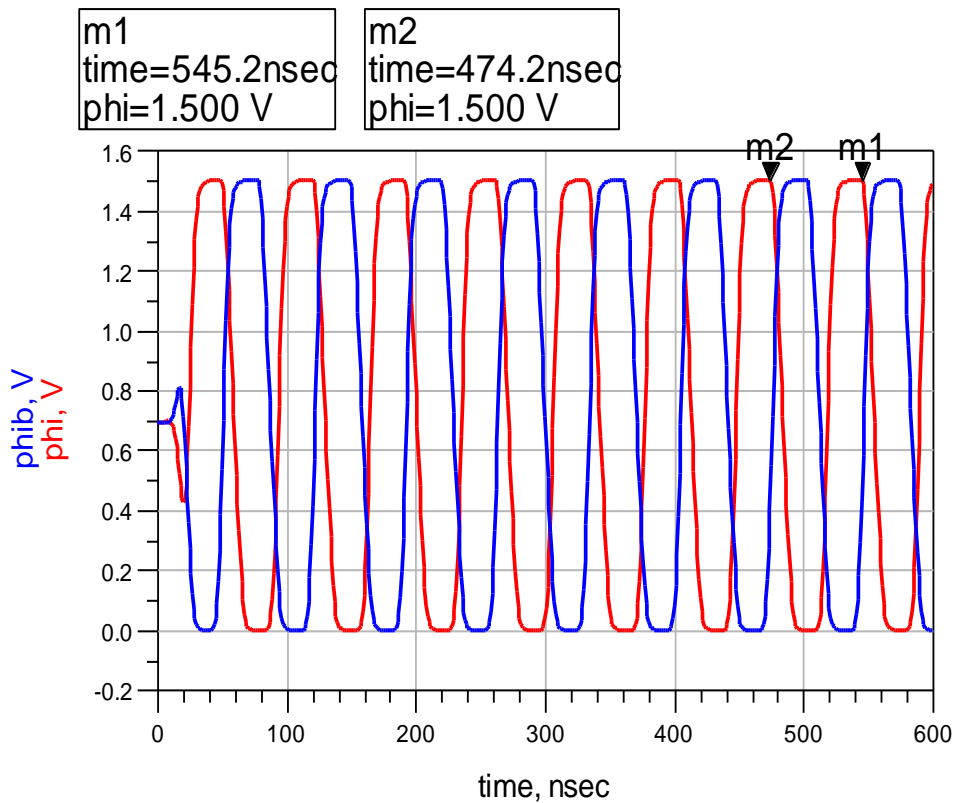


Figure 3.13. Les deux tension Phi et Phib en opposition de phase.

Pour le montage ci-après, nous avons essayé de rassembler tous les étages de notre système à savoir : le circuit récupérateur, le circuit à base de capacité commuté, l'oscillateur, la charge et le circuit d'unité de contrôle. Pour bien procéder à la simulation de ce montage, nous avons exploité un oscillateur idéal générant des signaux carrés en opposition de phase et des commutateurs idéaux au niveau du circuit à capacités commutés. Le but est de simuler le comportement de notre circuit à capacité commuté sans aucune altération apportée par l'oscillateur et/ou les commutateurs.

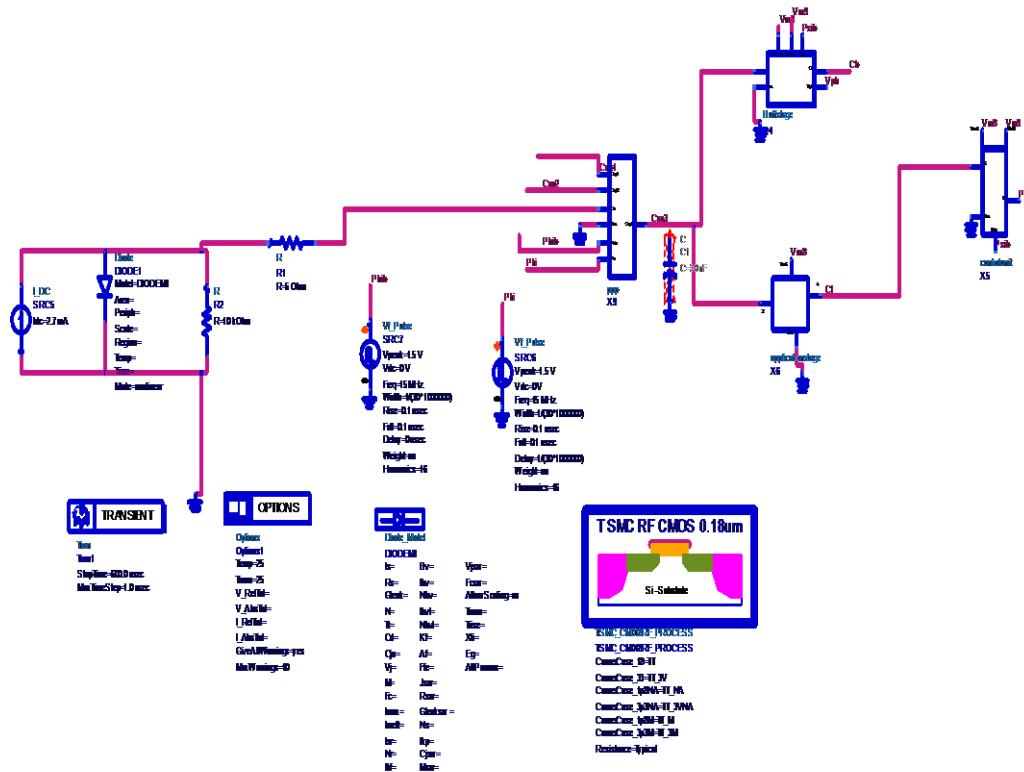


Figure 3.14. Circuit de récupération d'énergie.

La figure 3.15 Présente les prélevés au niveau des différentes capacités du circuit à capacités commutés. Il est clair que la commutation au niveau des capacités s'illustre par le signal carré reporté sur les courbes de charge des capacités concernées. On constate également qu'après un certain temps transitoire les capacités se chargent autour d'une tension moyenne.

La figure 3.16 est un agrandissement de la figure 3.15 où on observe que la tension moyenne résultante au niveau de la capacité $Cp3$ atteint une valeur de 1.5 V. Bien évidemment, d'autres circuits peuvent être rajoutés pour stabiliser la tension autour d'une tension continue mais ceci ne fait pas l'objet de ce travail.

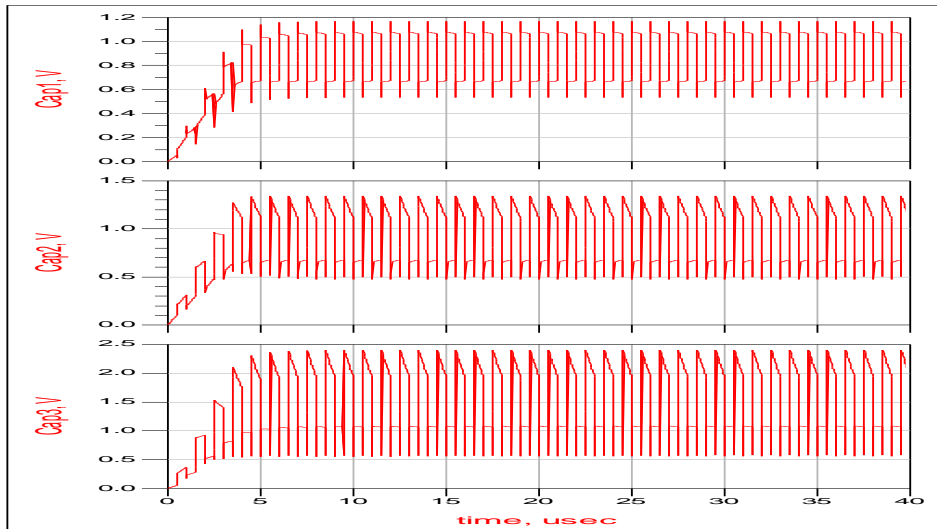


Figure 3.15. Simulation temporel montrent la charge des capacité C1,C2 et C3.

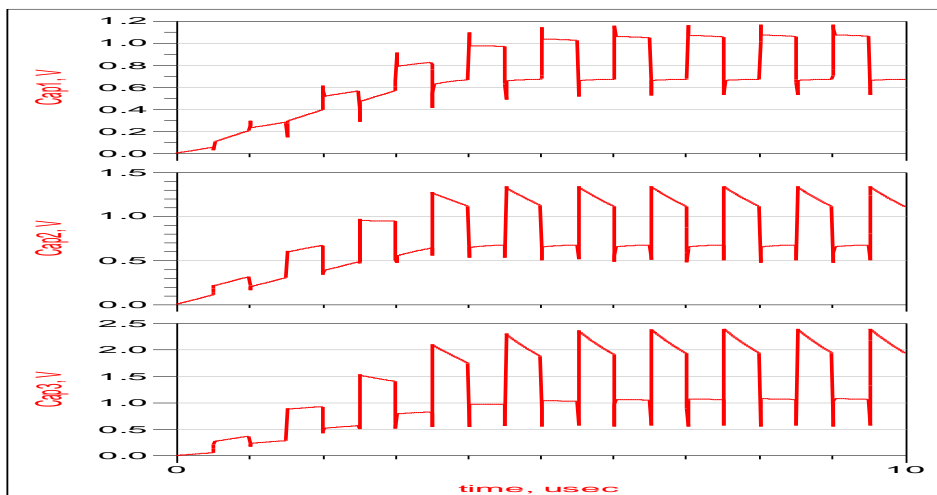


Figure 3.16. Zoom de simulation temporel montrent la charge des capacité C1,C2 et C3.

Pour plus de détails, et depuis la figure 3.16, nous pouvons dire que durant la demi-période du signal PHI (lorsque le signal généré du PHI est à l'état haut), la capacité C_{in} et la capacité $Cap2$ se chargent en même temps du récupérateur (V_{ph}) sachant que la capacité $Cap1$ n'est pas encore chargé mais sa quantité de charge initiale est déchargée au niveau de la capacité $Cap3$. Par contre durant la demi période du signal $PHIb$ (lorsque le signal généré du $PHIb$ est à l'état haut), la capacité C_{in} et la capacité $Cap1$ se chargent en même temps du récupérateur (V_{ph}) sachant que les deux capacités $Cap2$ et $Cap3$ chargées auparavant et connecté en série à V_{ph} vont se décharger soit au niveau de la capacité C_b soit dans la capacité CL en fonction de la tension de commande provenant de l'unité de contrôle.

Cependant, en dépassant la phase transitoire, les capacités sont complètement chargées et le cycle transitoire ne peut se reproduire que si une charge consomme l'énergie stocké

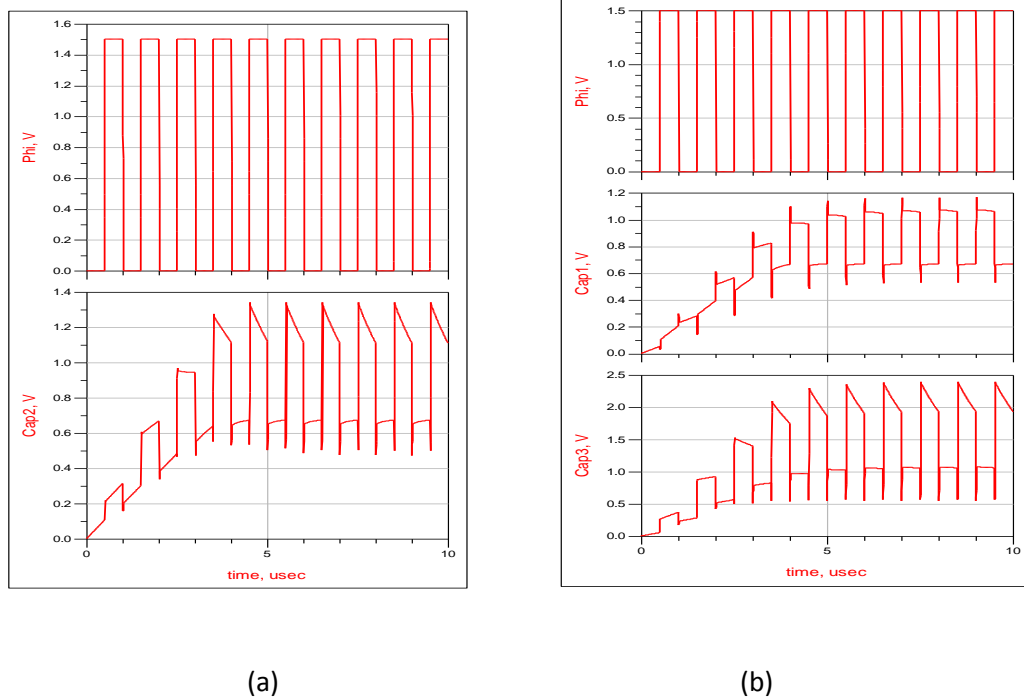


Figure 3.17. (a) Accord du temps de charge la capacité C2 avec le niveau haut de la tension Phi. **(b)** Accord du temps de charge la capacité C1 et C3 avec le niveau haut de la tension Phi.

Les deux figures ci-dessus illustrent également les tensions prélevées au niveau de Cb et CL où la tension atteint sa valeur moyenne maximale avec quelques cycles de PHI. Cependant, la tension observée autour de la capacité de charge CL prend bcp de temps pour qu'elle atteigne une valeur maximale qui reste loin de la tension observée au niveau du Cb vu qu'elle alimente l'unité de controlé.

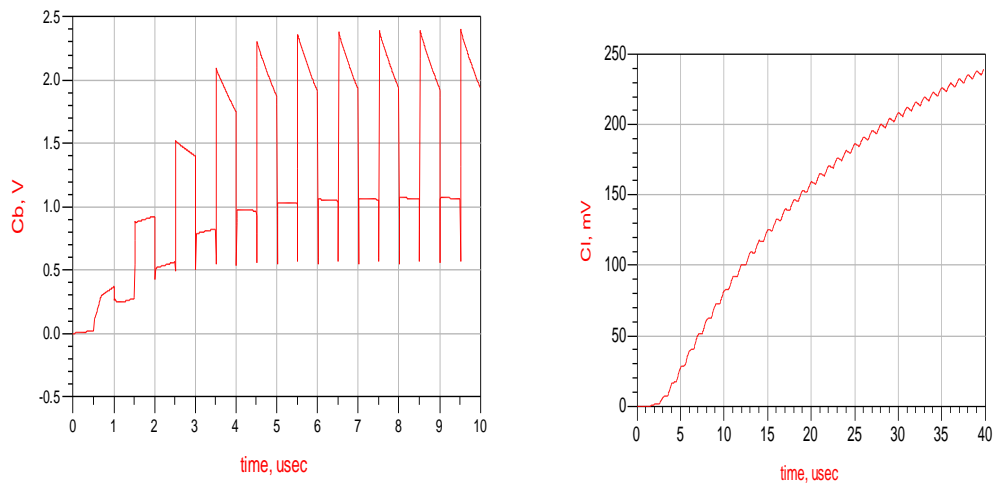


Figure 3.18. Les tensions prélevé aux niveaux des capacités Cb et Cl.

3.4 Effet des commutateurs réels sur le circuit à capacités commutés

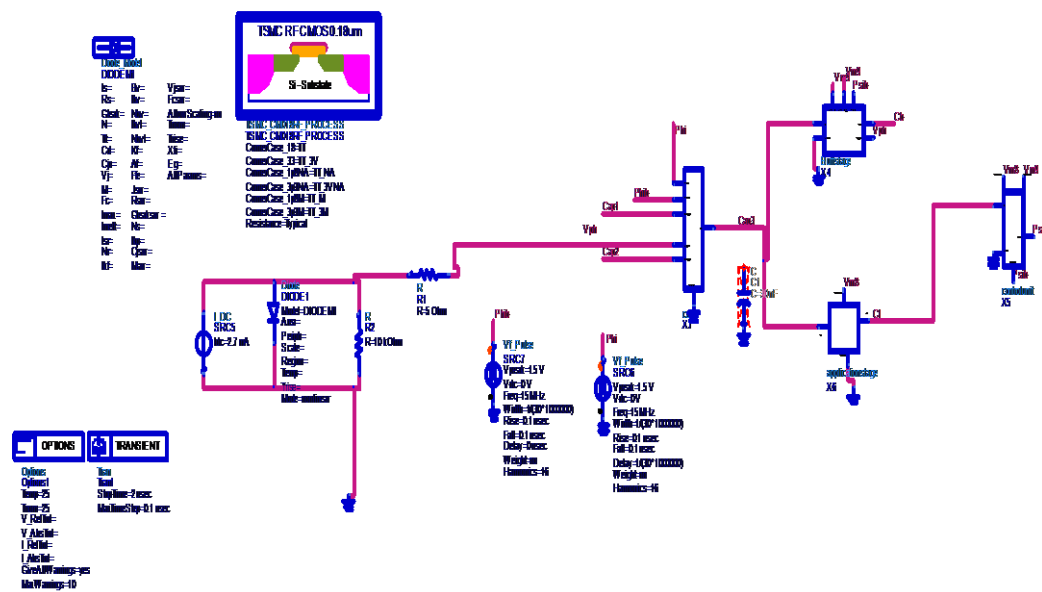


Figure 3.19. Montage avec un circuit à capacités commutées utilisant des commutateurs réels.

La figure ci-dessous illustre le même montage avec un circuit à capacités commutées utilisant des commutateurs réels. Ces commutateurs sont à base de transistors NMOS et PMOS ayant une largeur faible de $0.36\ \mu\text{m}$. Afin de voir l'effet de ces transistors sur notre montage et le circuit de capacités commutés, nous avons procédé à la simulation dans les mêmes conditions précédentes, c à d, un Oscillateur idéal.

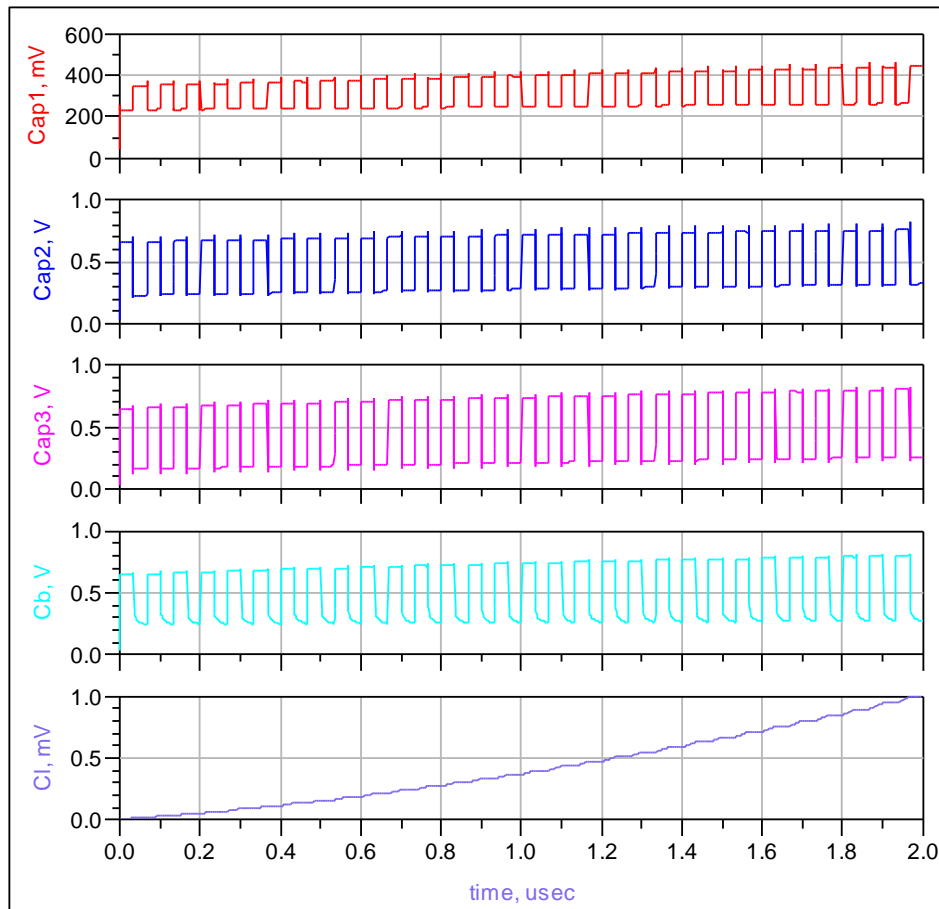


Figure 3.20. Illustration des différentes tensions aux niveaux des capacités

A l'observation de la figure précédente, des différentes tensions au niveau des capacités ont énormément baissé par rapport à celles prélevées lors de l'utilisation des commutateurs idéaux. Ceci revient principalement des éléments intrinsèques des transistors et notamment la résistance r_{ds} des transistors. Afin de résoudre ce problème, nous avons procédé à la simulation paramétrique en variant la largeur des transistors commutateurs pour $W=36\ \mu\text{m}$ et $W=144\ \mu\text{m}$. Après la simulation avec les nouvelles largeurs, nous avons observé une

amélioration des tensions prélevées aux différentes capacités comme le montre la figure ci-dessus :

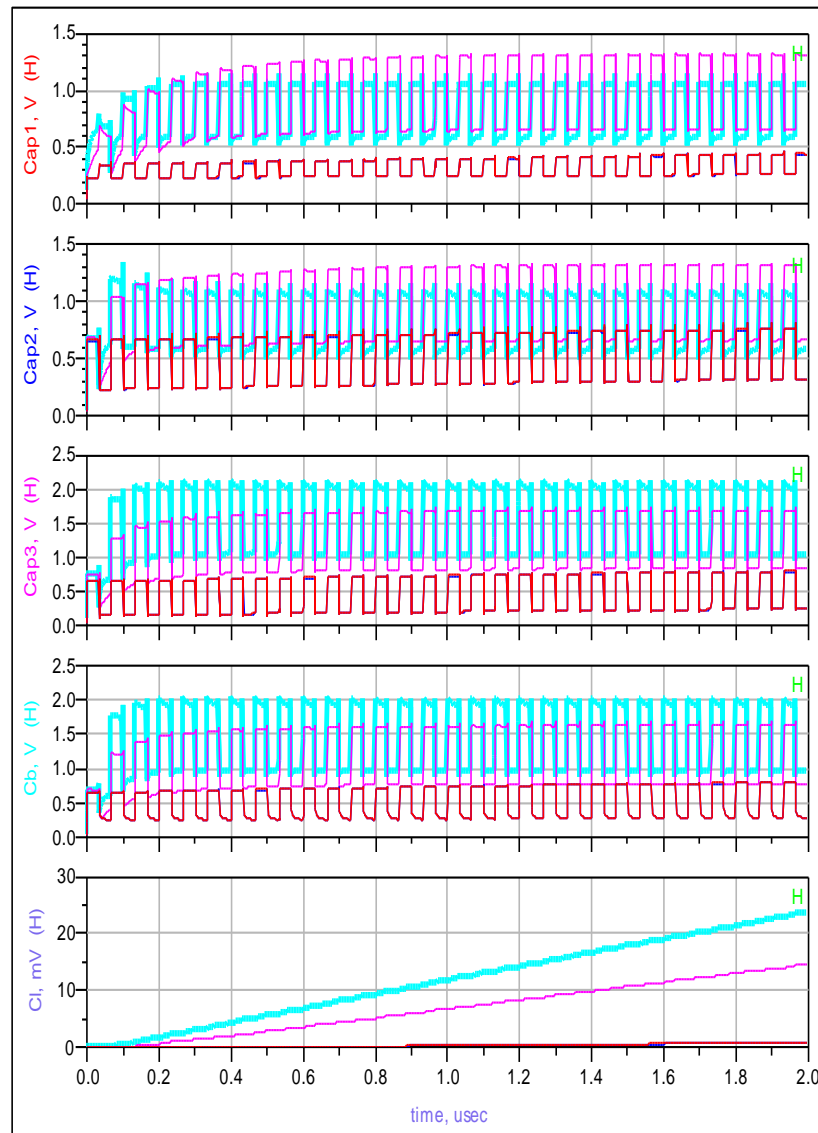


Figure3.21. Illustration des déférentes tensions aux niveaux des capacités en variant la largeur des transistors

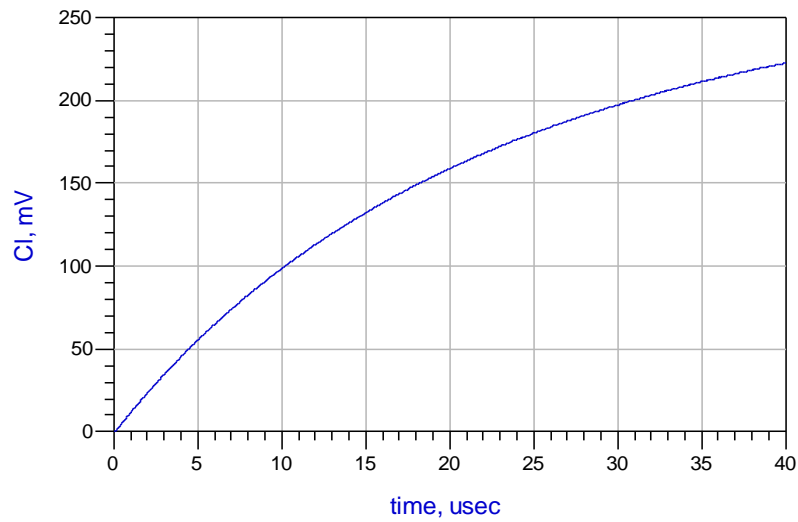


Figure 3.22. charge de la capacité C_L en fonction du temps.

3.5 Effet de l'oscillateur réel sur le système

Lorsqu'on remplace l'oscillateur idéal par le réel qui a été conçu précédemment, la simulation des différentes tensions en fonction du temps montre que notre système est toujours fonctionnel. Les tensions prélevées au niveau des capacités atteignent des tensions maximales attendues. Cependant, l'effet des éléments parasites sur le signal généré par l'oscillateur apparait au niveau de la capacité C_L qui ne se charge pas à une tension importante comme dans le cas d'un oscillateur.

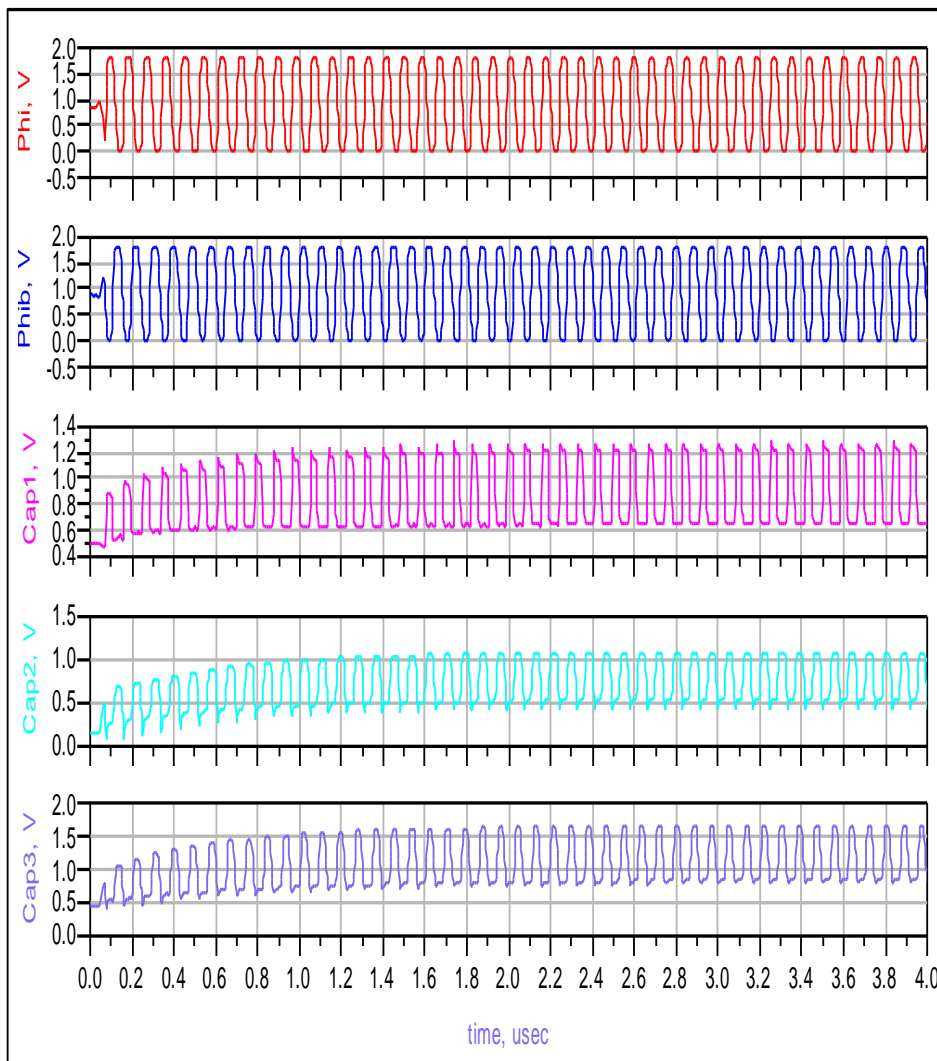


Figure 3.23. La simulation des différentes tensions en fonction du temps aux niveaux de l'oscillateur réel.

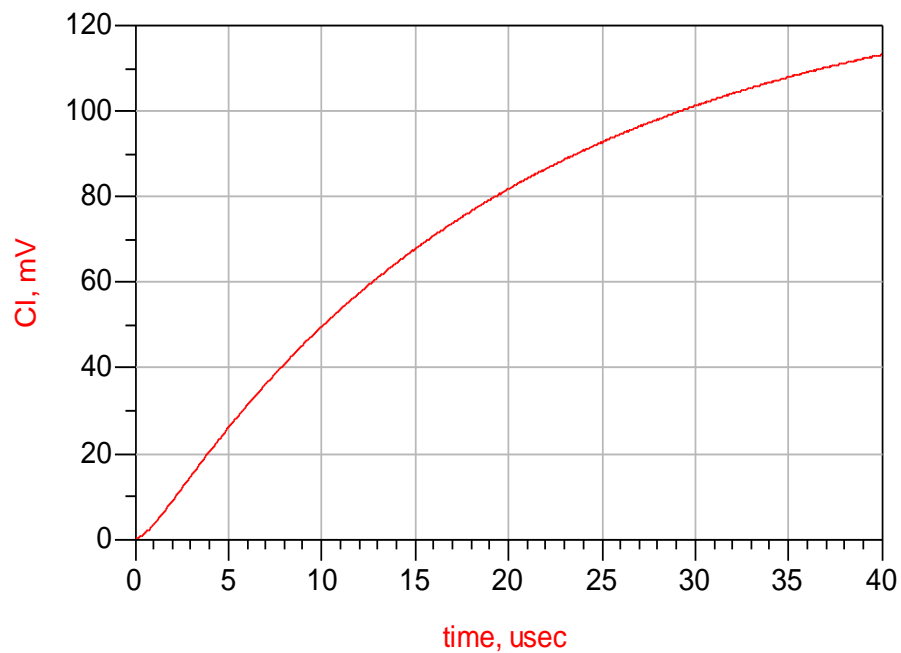


Figure 3.24. La charge de la capacité $C1$ en fonction du temps dans le cas d'un oscillateur réel.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le circuit DC-DC pour la récupération de l'énergie photovoltaïque avec la technologie CMOS 0.18 μm . Ainsi, une comparaison de système a base de composants idéaux et réels. Nous avons choisi les transistors et les capacités les plus appropriés pour la conception de système autour 15MHZ.

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire rentre dans le cadre de la conception des circuits de récupération d'énergie pour les systèmes mobiles. Notre choix s'est orienté à une source photovoltaïque pour ses avantages écologiques. La circuiterie adoptée dans le cadre de ce mémoire recombine une panoplie de circuits analogiques. Les résultats de ce travail ont été déjà discutés et validés par des simulations dans le cas idéal et réel de certains circuits. Malgré le facteur temps, nous avons essayé d'implémenter les différents circuits et les simuler. Par ailleurs, en plus de l'exploitation de la technologie CMOS durant ce stage pour accomplir ce travail, les étapes de conception de notre circuit nous a également permis d'apprendre les techniques de simulation sur un logiciel dédié à la conception de circuits intégrés.

Bibliographie

- [1] « INFRASTRUCTURE MONDIALE DE L'INFORMATION, PROTOCOLE INTERNET ET RÉSEAUX DE PROCHAINE GÉNÉRATION ».SECTEUR DE LA NORMALISATION DES TÉLÉCOMMUNICATIONS DE L'UIT 2012.
- [2] Dave Evans « L'Internet des objets Comment l'évolution actuelle d'Internet transforme-t-elle le monde ? » Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG) 2011.
- [3] Véronique Kuhn « Capture opportuniste d'énergie micro-onde pour l'autonomie des objets communicants ». Thèse de Doctorat Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, l'Université européenne de Bretagne 2015.
- [4] C.M.F.Carvalho, N.F.S.V.Parlino, CMOS indoor Light harvesting system for wireless sensing applications, Chapter 2, [http:// www.springer.com](http://www.springer.com) .
- [5] Marc Belleville ,« Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems », (CEA-LETI, France), 2009.
- [6] A. Harb, « Energy harvesting: State-of-the-art », Renew. Energy, vol. 36, no 10, p.2641-2654, 2011.
- [7] W. Wang, N. Wang, A. Vinco, R. Siddique, M. Hayes, B. O'Flynn, et C. O'Mathuna, « Supercapacitor and Thin Film Battery Hybrid Energy Storage for Energy Harvesting Applications », J. Phys. Conf. Ser., vol. 476, no 1, p. 012105, déc. 2013.
- [8] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices". Proceedings of the IEEE, vol. 96, no 9, p. 1457-1486, 2008.

- [9] E. Blokhina, D. Galayko, P. Basset et al, "Steady-state oscillations in resonant electrostatic vibration energy harvesters". IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 60, no 4, p. 875-884, 2013.
- [10] B. J. Bowers et D. P. Arnold, "Spherical, rolling magnet generators for passive energy harvesting from human motion". Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 19, no 9, p.094008, 2009
- [11] H. Sun, Y.-X. Guo, M. He et Z. Zhong, "A Dual-Band Rectenna Using Broadband Yagi Antenna Array for Ambient RF Power Harvesting". Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 12, p. 918-921, 2013.
- [12] U. Olgun, C. –C. Chien et J. L. Volakis, "Design of an efficient ambient WiFi energy harvesting system". IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 6, no 11, p. 1200-1206, 2012.
- [13] G. Park, T. Rosing, M. D. Todd, C. R. Farrar et W. Hodgkiss, "Energy harvesting for structural health monitoring sensor networks". Journal of Infrastructure Systems, vol. 14, no 1, pp. 64-79, 2008.
- [14] G. Indumathi et K. Karthika, "Rectenna design for RF energy harvesting in wireless sensor networks". In Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2015 IEEE International Conference on, pp. 1-4, 2015
- [15] H. Lakhal, M. Dhieb, H. Ghariani et M. Lahiani, "Design of a high performance rectenna for wireless powering 2.45 GHz RFIDs". In 2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pp. 138-145), 2015
- [16] A. Okba, S. Charlot, P.F. Calmon, A. Takacs ET H. Aubert, "Multiband rectenna for microwave applications". In 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 1-4, 2016

- [17] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, J. Zhang, S. Yuan ET P. Carter, "A high-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no 8, p. 3486-3495, 2015
- [18] M. Lossec, B. Multon, H. Ben Ahmed, et C. Goupil, « Thermoelectric generator placed on the human body: system modeling and energy conversion improvements », Eur. Phys. J. Appl. Phys., vol. 52, no 1, p. 11103, sept. 2010.
- [19] Z. Dashevsky, D. Kaftori, et D. Rabinovich, « High efficiency thermoelectric unit within an autonomous solar energy converter », in XVII International Conference on Thermoelectrics, 1998. Proceedings ICT 98, 1998, p. 531-534.
- [20] L. Mateu, C. Codrea, N. Lucas, M. Pollak, et P. Spies, « Energy harvesting for wireless communication systems using thermogenerators », in Proceeding of the XXI Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), Barcelona,Spain, 2006.
- [21] V. Leonov et R. J. M. Vullers, « Wearable Thermoelectric Generators for BodyPowered Devices», J. Electron. Mater., vol. 38, no 7, p. 1491-1498, janv.
- [22] <http://www.thermoelectrique.com/generateur-thermoelectrique-perpetua-power-puck-pourcapteur-sans-fil>
- [23] S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, and A. Taroni, "Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 1, pp. 99-107, 2009
- [24] Y. K. Ramadass and A. P. Chandrakasan, "A battery-less thermoelectric energy harvesting interface circuit with 35 mV startup voltage," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 46, 2011.
- [25] <http://www.solarworld.fr/fr/energie-solaire/pourquoi-lenergie-solaire/>

[26] Stephen Beeby, "Energy Harvesting for Autonomous Systems", Neil White Editors

[27]<http://cellule-photovoltaique.e-monsite.com/pages/l-utilisation-de-l-energiephotovoltaique.Htm>

[28] Véronique Kuhn « Capture opportuniste d'énergie micro-onde pour l'autonomie des objets communicants ». Thèse de Doctorat Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, l'Université européenne de Bretagne 2015.

[29] Adrien Badel « Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale de l'Université de Savoie

[30] H. Peng, N. Tang, Y. Yang, and D. Heo, "CMOS startup charge pump with body bias and backward control for energy harvesting step-up converters," IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, vol. 61, no. 6, pp. 1618–1628, Jun. 2014.

[31] S. Mondal and R. P. Paily, "An efficient on chip power management architecture for solar energy harvesting systems," in Proc. 29th Int. Conf. VLSI Design, Jan. 2016, pp. 224–229.

[32] Solar Made Inc. Mini-Panel 0.5 V, 100 mA 1-100, accessed on Jun. 4. 2017. [Online]. Available: <http://www.solarmade.com>

[33] R. JACOB Baker - CMOS Circuit Design Layout and Simulation, 3ed ed - Wiley – 2010

[34] R. JACOB Baker - CMOS Circuit Design Layout and Simulation, 3ed ed - Wiley – 2010.

[35] M. R. Jan, C. Anantha, and N. Borivoje, Digital Integrated Circuits—A Design Perspective. Prentice Hall, 2003.

[36] N. Weste and D. Harris, CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 2010.

- [37] S. Mondal and R. Paily, "An efficient on-chip switched-capacitor-based power converter for a microscale energy transducer," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 63, no. 3, pp. 254–258, Mar. 2016.
- [38] C. Lu, S. P. Park, V. Raghunathan, and K. Roy, "Efficient power conversion for ultra low voltage micro scale energy transducers," in *Proc. Eur. Conf. Design, Autom. Test (DATE)*, 2010, pp. 1602–1607.
- [39] W. M. C. Sansen, *Analog Design Essentials*, vol. 859. Springer, 2007.
- [40] S. Mandal, S. Arfin, and R. Sarpeshkar, "Fast startup CMOS current references," in *Proc. ISCAS*, May 2006, p. 4.
- [41] S. Mondal and R. P. Paily, "An efficient on-chip energy processing circuit for micro-scale energy harvesting systems," in *Proc. 19th Int. Symp. VLSI Design Test (VDATE)*, Jun. 2015, pp. 1–5.