

RAPPORT

Circuit Design

ETUDIANTS

Diogo Febre – Gregory Blatter

RESPONSABLE

Alexandra Anderson

Table des matières

Table des matières

1	Introduction	3
2	LDO.....	3
3	Peak Detector.....	5
4	Batteries	7
5	Slow sampling	14
6	Fast sampling	19
7	Processeur.....	25
8	Conclusion.....	31

1 Introduction

Ce projet vise à concevoir un système électronique complet capable de mesurer précisément le courant consommé par un dispositif externe (DUT - Device Under Test) sous différentes conditions. Le système utilise deux modes de fonctionnement complémentaires : un mode haute fréquence (fast sampling) pour la détection rapide des variations de courant et un mode basse fréquence (slow sampling) pour optimiser l'autonomie de la batterie. Le projet comprend des circuits tels que des régulateurs LDO, des détecteurs de pics, des systèmes de gestion des batteries, ainsi qu'un processeur pour la collecte et l'analyse des données.

2 LDO

Le régulateur LDO utilisé dans ce projet est le **ADM7170ACPZ-3.3**, un composant de précision conçu pour fournir une tension de sortie stable de 3,3 V avec une très faible chute de tension (dropout). Il est particulièrement adapté aux systèmes alimentés par batterie où la stabilité de la tension est essentielle pour garantir la fiabilité des circuits analogiques sensibles, notamment les amplificateurs opérationnels utilisés pour les mesures.

Caractéristiques principales du régulateur :

- **Tension d'entrée** : de 2,3 V à 6,5 V
- **Tension de sortie fixe** : 3,3 V
- **Dropout** : typiquement 45 mV @ 100 mA
- **Courant de sortie** : jusqu'à 500 mA
- **Bruit de sortie** : 5 μ V rms (10 Hz à 100 kHz), extrêmement faible, idéal pour l'alimentation de circuits analogiques
- **PSRR élevé** : 73 dB à 10 kHz, limitant l'influence des variations de l'alimentation sur les circuits en aval

Schéma de mise en œuvre

Le schéma de l'ADM7170 montre une configuration typique avec :

- **Entrée VIN** filtrée par un condensateur électrolytique (C11) de 4.7 μ F
- **Condensateur de démarrage progressif (C13)** connecté à la broche SS (Soft Start) pour éviter un appel de courant brutal au démarrage
- **Broche SENSE** connectée localement pour un retour de régulation optimal
- **Sortie VOUT** filtrée par un condensateur (C12) de 4.7 μ F
- **Diviseur résistif (R11, R12)** en option pour un retour de mesure ou de monitoring de la tension

Cette architecture garantit une tension de 3,3 V très stable, condition nécessaire à la précision des mesures dans les circuits slow et fast sampling. De plus, le régulateur contribue à la réduction du bruit global du système et participe à une meilleure autonomie énergétique.

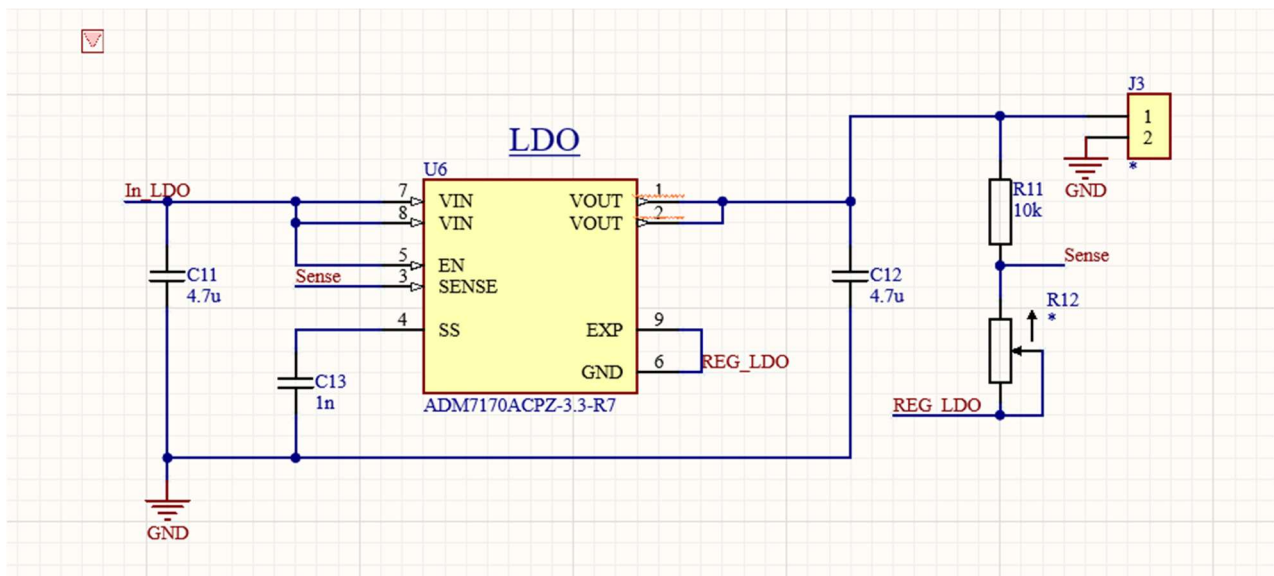


Figure 1 : Schéma LDO

3 Peak Detector

Le détecteur de pic est une composante essentielle du système de mesure dans le cadre du mode Fast Sampling. Il permet de capturer les valeurs maximales du courant consommé par le DUT sur une période donnée, ce qui est crucial pour caractériser les événements transitoires ou les impulsions de courant brèves mais importantes.

Principe de fonctionnement

Le circuit utilise un amplificateur opérationnel configuré en suiveur de pic avec une diode rapide, un condensateur de stockage, un transistor MOSFET de décharge, et un second amplificateur suiveur en sortie. Le fonctionnement se base sur les étapes suivantes :

1. **Entrée du signal (I_{meas})** : le courant mesuré est préalablement amplifié avant d'être injecté dans le détecteur de pic.
2. **Détection et mémorisation** :
 - L'ampli op U15A reçoit le signal via une résistance R33 et un condensateur C28 qui forment un filtre passe-bas pour limiter les bruits.
 - Une diode D1 permet la détection de la crête et charge le condensateur de maintien C27.
3. **Stabilisation et lecture** :
 - Un deuxième étage, avec l'ampli U15B, agit comme un suiveur pour fournir une sortie stable (CH4) sans charger le condensateur C27.
4. **Remise à zéro** :
 - Un MOSFET Q1 piloté par le signal GATen est utilisé pour vider le condensateur C27 et réinitialiser le détecteur, prêt à enregistrer un nouveau pic.

Objectif du montage

Le pic détecté peut ensuite être enregistré ou envoyé au microcontrôleur pour être stocké sur la carte SD. Ce mécanisme est utile pour détecter de façon non intrusive les événements fugaces dans la consommation du DUT.

Précision du montage

L'utilisation d'amplificateurs OPA2187 à faible dérive et très faible offset permet d'assurer une excellente précision. Le choix de diodes à faible seuil et de condensateurs à faible fuite garantit une bonne fidélité de la détection.

Ce montage a été caractérisé expérimentalement à l'aide d'un générateur Agilent 33220A et d'un analyseur Analog Discovery 2. Des tests ont permis de mesurer :

- la fidélité de détection en fonction de la largeur de l'impulsion
- l'erreur de détection en fonction de la tension

- la capacité du circuit à conserver le pic sans dérive visible sur plusieurs secondes

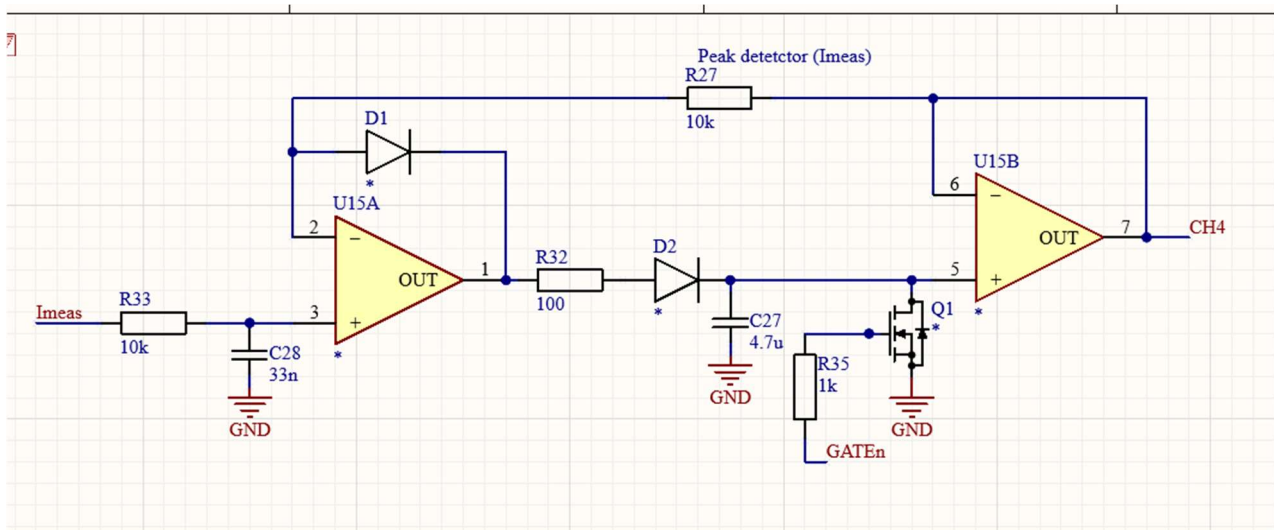


Figure 2 : Schéma Peak Detector

4 Batteries

Le système utilise plusieurs cellules de batteries Li-Ion pour alimenter les circuits de mesure. La stabilité, la longévité et la sécurité de ces batteries sont critiques, notamment en raison des consommations variables du DUT et des modes Fast/Sampling. C'est pourquoi des circuits de surveillance, de gestion et de protection ont été mis en œuvre.

Objectifs de la gestion batterie

- Assurer la protection contre la sous-tension et la surtension
- Équilibrer les tensions des cellules
- Fournir une tension stable et mesurable au reste du système
- Activer/désactiver les batteries via des MOSFETs

Surveillance des tensions des cellules

Chaque cellule est connectée à un circuit de mesure différentiel à haute impédance, utilisant des diviseurs résistifs précis suivis d'amplificateurs opérationnels configurés en suiveurs ou en amplificateurs non-inverseurs. Ces circuits permettent de convertir la tension de chaque cellule (Vb1 à Vb4) en une sortie analogique proportionnelle (Vout1 à Vout4), qui peut être mesurée par le microcontrôleur.

Exemple :

- Le pont diviseur R45-R49 (ou R46-R50) ajuste la tension d'entrée pour qu'elle reste dans la plage admissible de l'ADC.
- L'ampli op (ex : U13A, U13B, U14A, etc.) fournit une sortie tamponnée vers VoutX.

Référence de tension (Vref)

Une référence de tension stable (générée via un autre diviseur résistif R55-R56 ou R69-R70) est injectée en entrée non-inverseuse de tous les comparateurs, garantissant que les mesures soient relatives à une base fixe et identique. Cela élimine les variations dues au bruit de masse ou aux fluctuations de l'alimentation.

Protection par MOSFETs

Un réseau de MOSFETs commandés par des signaux logiques (Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8) assure la commutation sécurisée de chaque ligne de batterie. Ce système permet de :

- Activer/désactiver individuellement les batteries
- Isoler les batteries défectueuses ou en sous-tension
- Empêcher les courants inverses en cas de panne

Chaque MOSFET est contrôlé via une résistance de grille (ex : R59, R62...) afin de limiter les pics de courant lors de la commutation.

Protection contre la surtension

Un circuit de protection simple basé sur une diode Zener (D5) et une résistance série (R72) est également présent pour dériver le courant en cas de surtension sur la ligne Vb2, empêchant ainsi toute détérioration du circuit de mesure.

L'ensemble de cette topologie de gestion batterie assure à la fois sécurité, fiabilité et précision de mesure. Elle permet également de prolonger la durée de vie des batteries, tout en protégeant le reste du circuit contre les défaillances électriques potentielles.

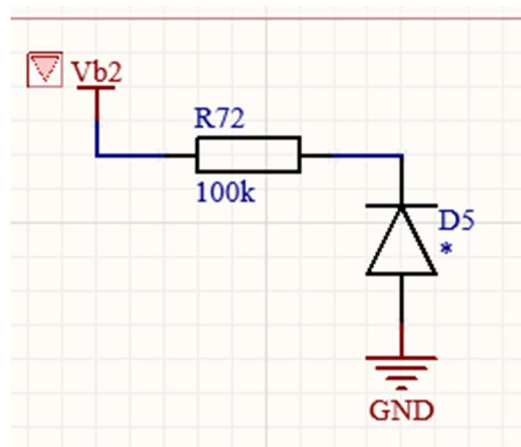


Figure 3 : Schéma

Circuit Design

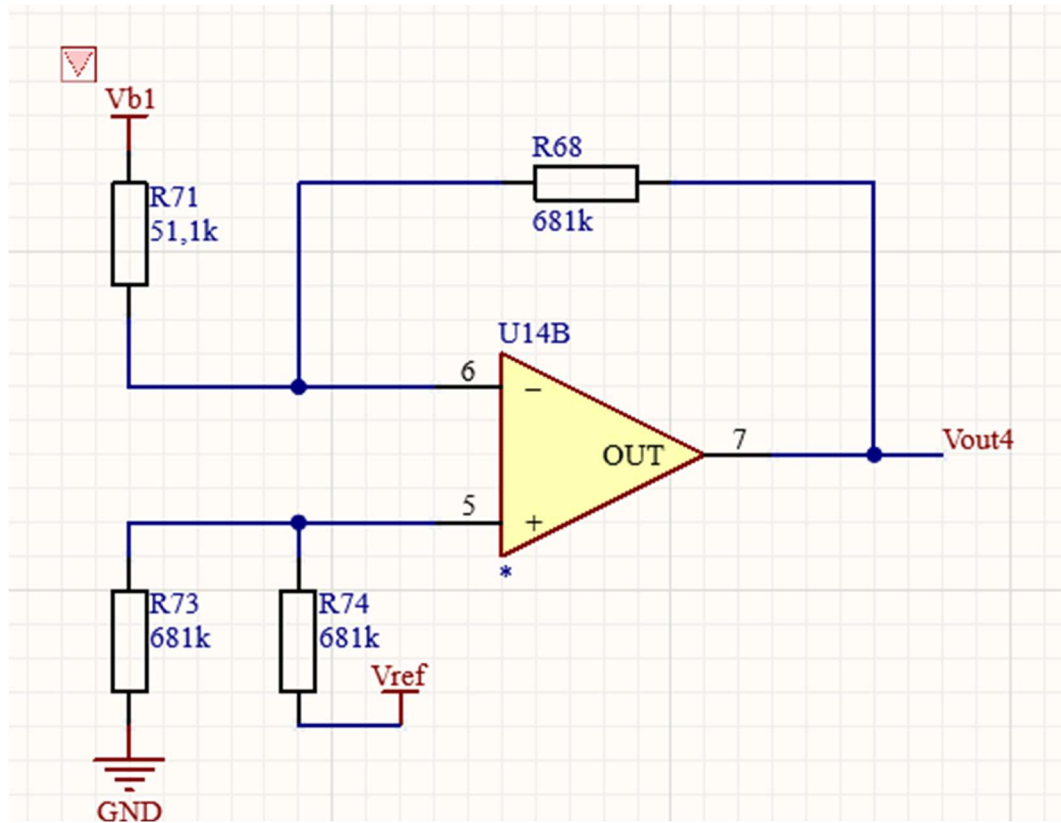


Figure 4 : Schéma

Circuit Design

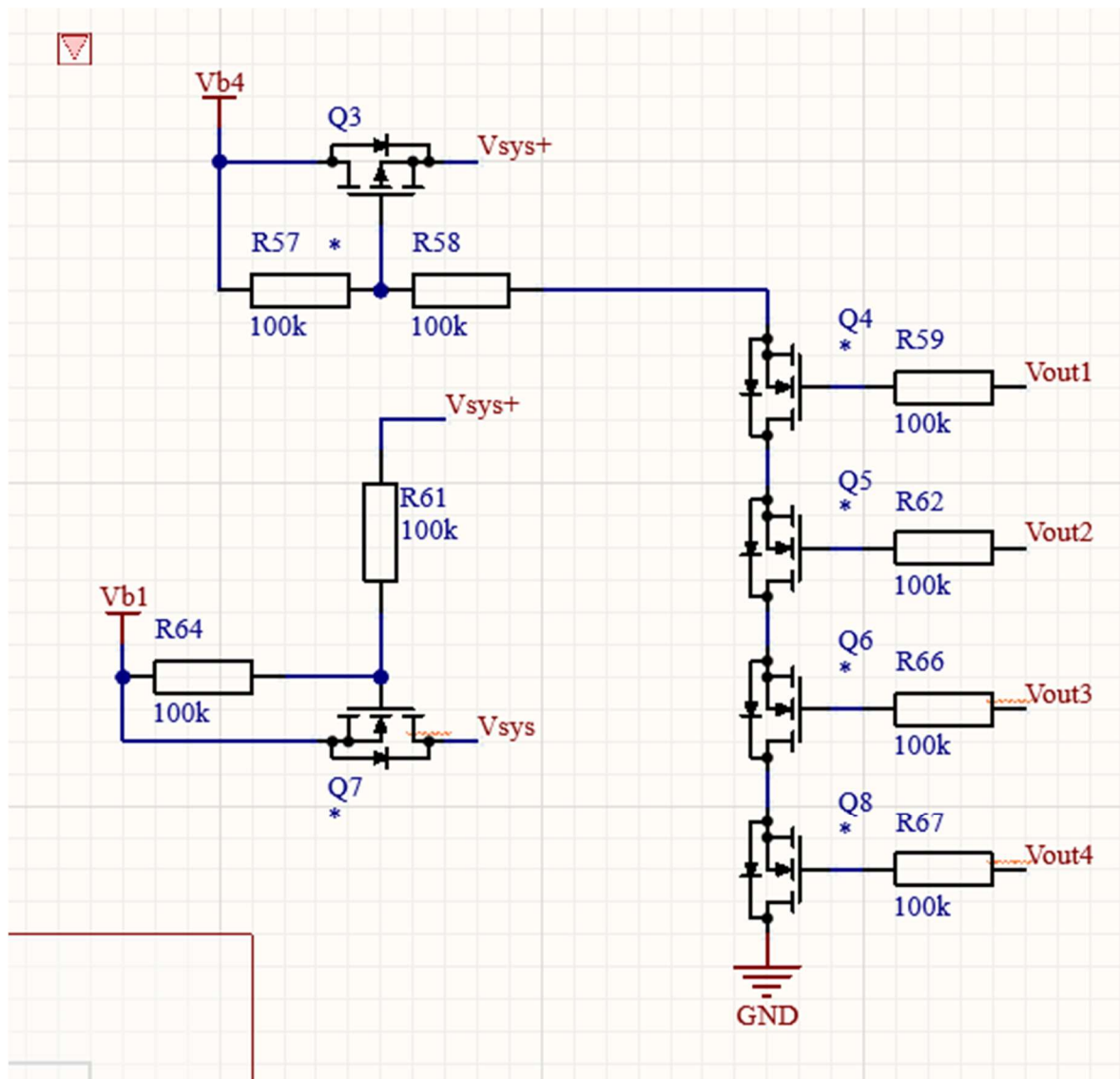


Figure 5 : Schéma

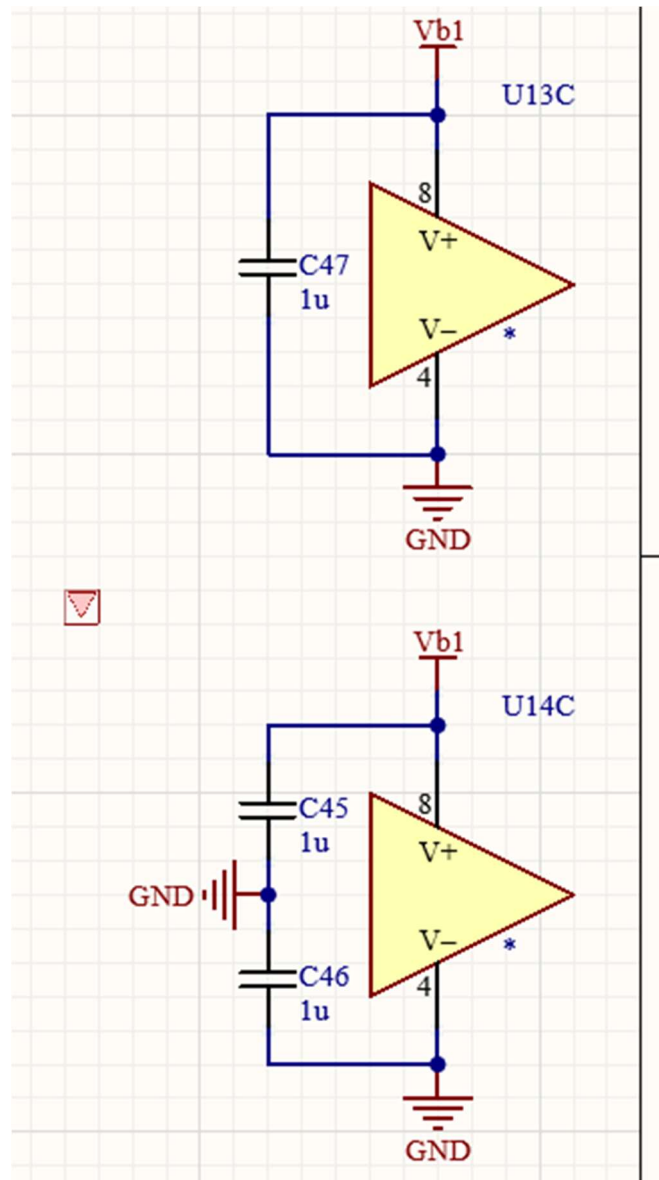


Figure 6 : Schéma

Circuit Design

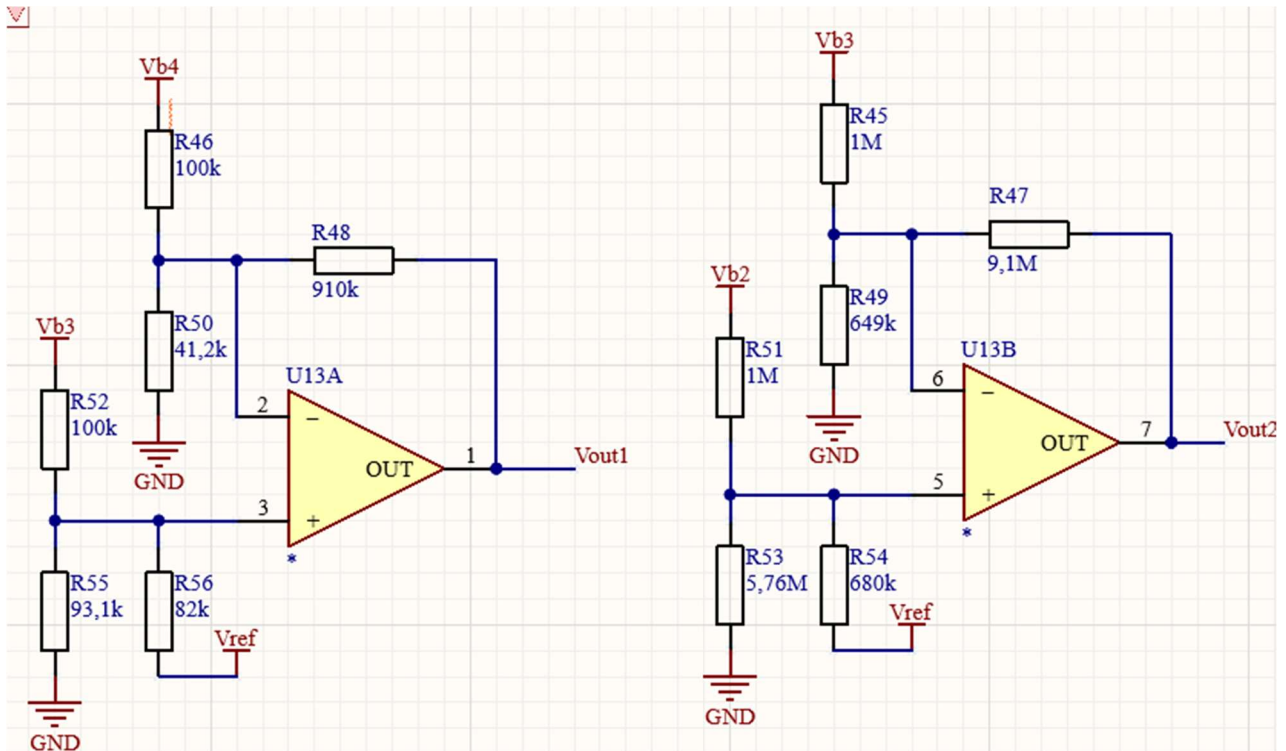


Figure 7 : Schéma

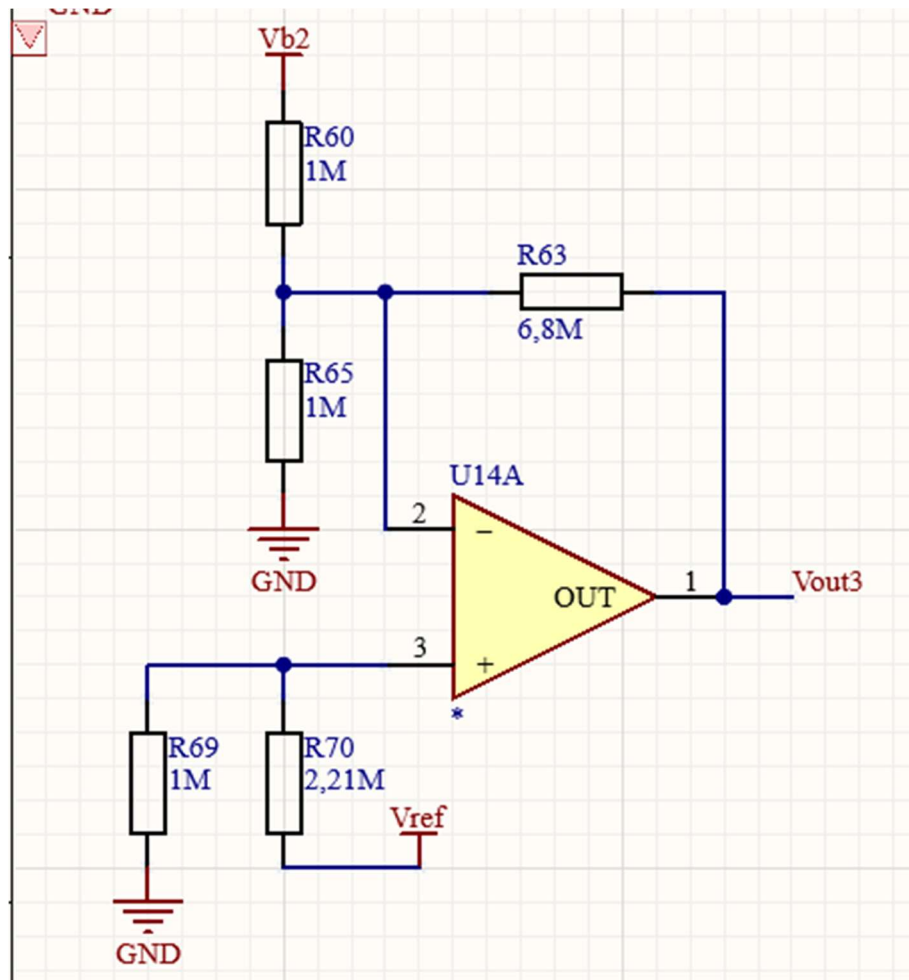


Figure 8 : Schéma

5 Slow sampling

Le mode Slow Sampling permet de suivre la consommation moyenne du DUT sur une longue période tout en limitant la consommation énergétique du système de mesure lui-même. Il est particulièrement utile lorsque les événements rapides sont rares ou lorsque l'autonomie de la batterie est une priorité.

Architecture du circuit

Le système slow sampling est divisé en plusieurs blocs permettant d'effectuer les mesures de courant et de tension avec un minimum d'énergie consommée :

1. Mesure du courant (I_{slow})

- L'entrée analogique correspondant au courant du DUT est amplifiée avec un **gain de 148,5**.
- Le signal est conditionné à travers un amplificateur opérationnel OPA2187 configuré en amplificateur différentiel ou non-inverseur selon la topologie du PCB.
- Un filtre passe-bas RC est ajouté en entrée pour supprimer les hautes fréquences parasites ($R \cdot C$ typique : $10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF}$).

2. Mesure de la tension (V_{slow})

- Un diviseur résistif permet d'adapter la tension de batterie à la plage de mesure admissible pour le microcontrôleur.
- Le signal est ensuite amplifié avec un **gain de 71/100**, calibré de manière à produire une tension proportionnelle à V_{batt} mais adaptée à l'ADC.
- L'amplificateur utilisé ici est souvent un MCP6001, suffisant pour ce type de mesure peu dynamique et compatible avec l'alimentation 3.3 V du système.

3. Détection de pic (CH4)

- Un détecteur de crête est présent même dans le chemin slow pour permettre une détection d'événements plus marqués sans passer en mode fast sampling.
- Ce circuit est couplé à un **MOSFET de reset** commandé par le microcontrôleur pour effacer manuellement la mémoire du pic.

4. Filtrage de la valeur moyenne (Mean)

- Une cellule RC (ex : R36, C24) est utilisée pour produire une valeur moyenne de la consommation sur une période plus longue.
- Cette sortie est bufferisée via un ampli suiveur (OPA2187) et envoyée sur une broche analogique du microcontrôleur (ex : CH6).

Consommation réduite

Tous les composants utilisés pour le slow sampling sont à faible consommation :

- **OPA2187** : dérive nulle, consommation typique 100 μ A
- **MCP6001** : 100 μ A typiques avec rail-to-rail I/O

Le système peut fonctionner sur un échantillonnage de l'ordre de quelques Hz, suffisamment pour évaluer les tendances de consommation sans solliciter inutilement les ressources.

Avantages

- Faible consommation du circuit de mesure
- Données stables et peu bruitées grâce aux filtres passifs
- Utilisation idéale dans les phases de veille ou d'observation prolongée

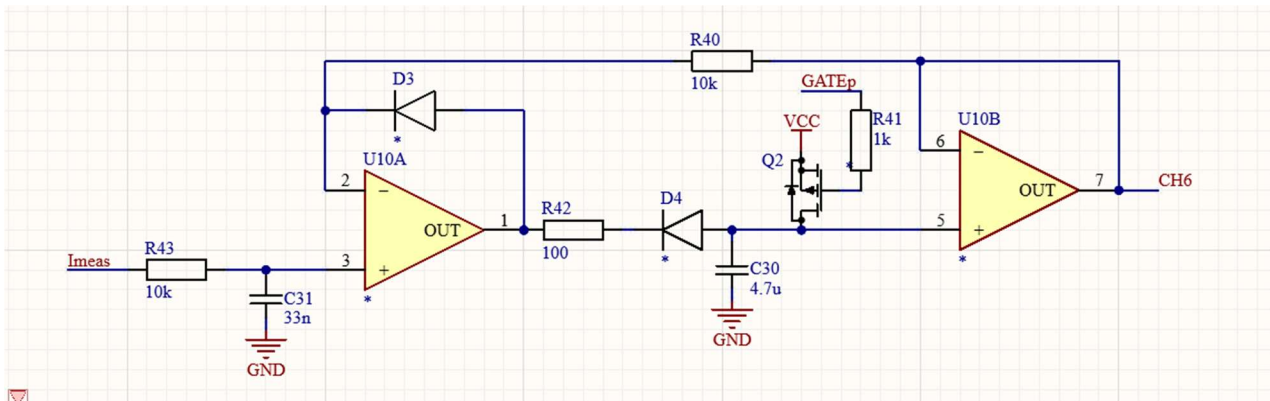


Figure 9 : Schéma

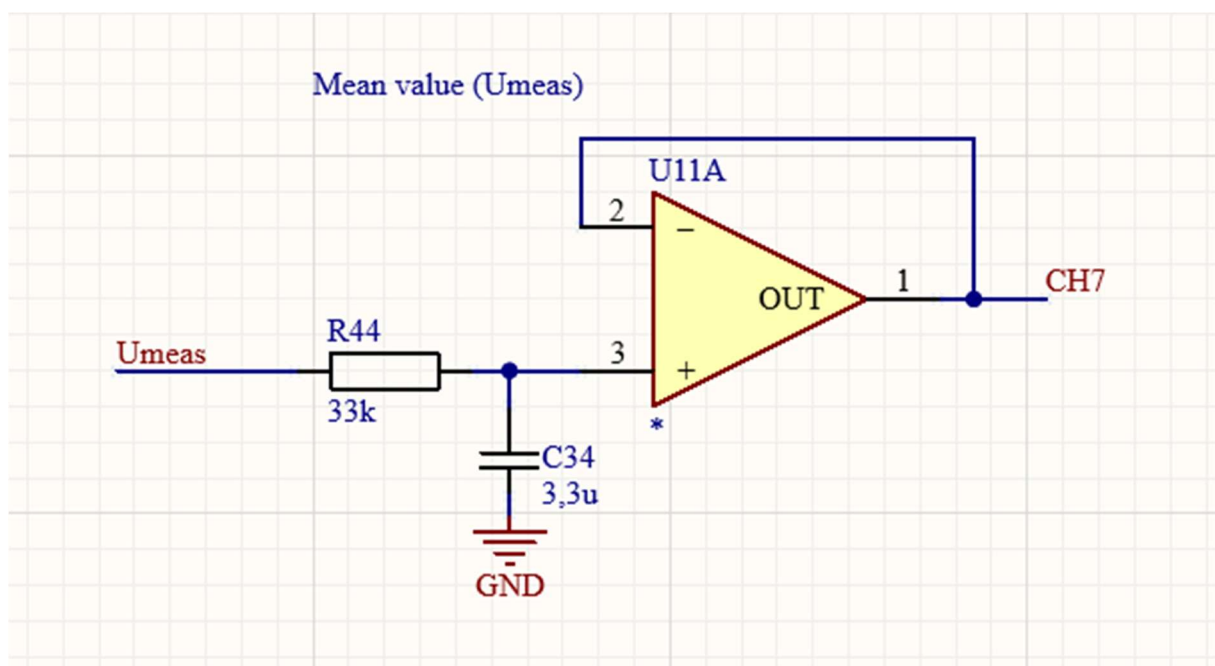


Figure 10 : Schéma Umeans

Circuit Design

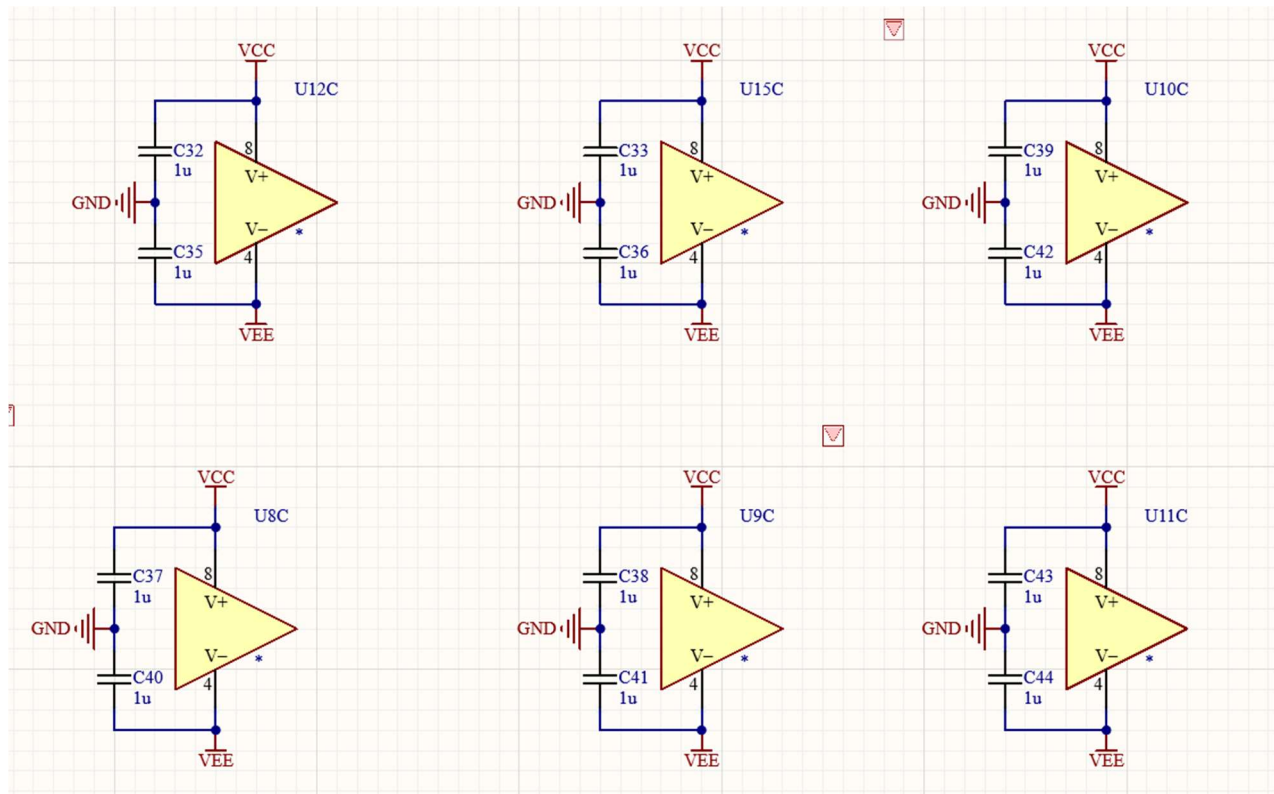


Figure 11 : Schéma

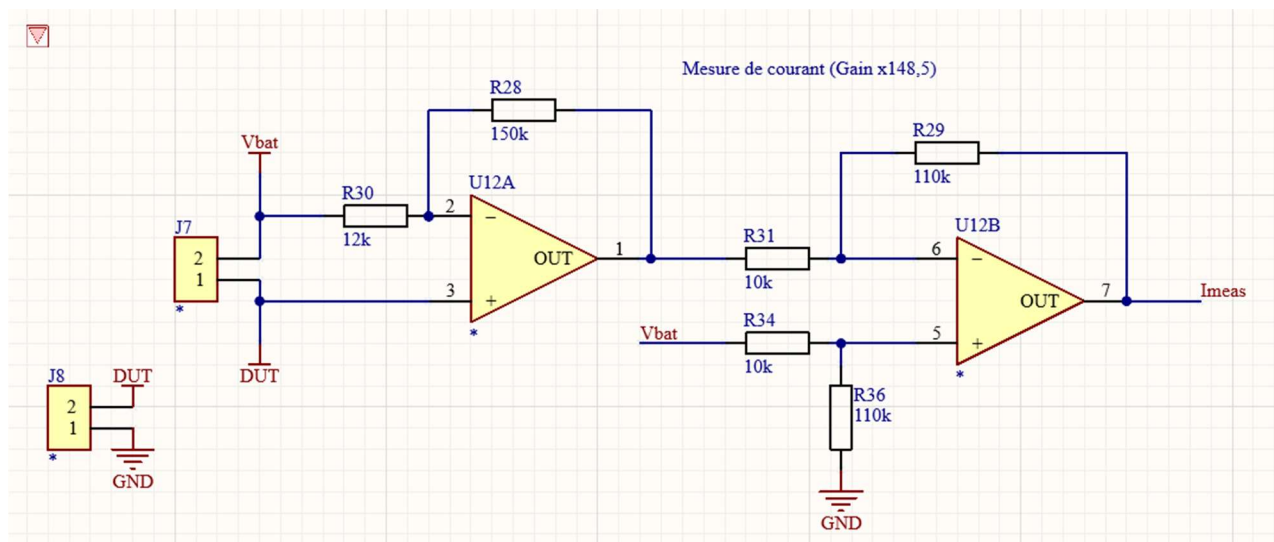


Figure 12 : Schéma mesure de courant avec gain x148.5

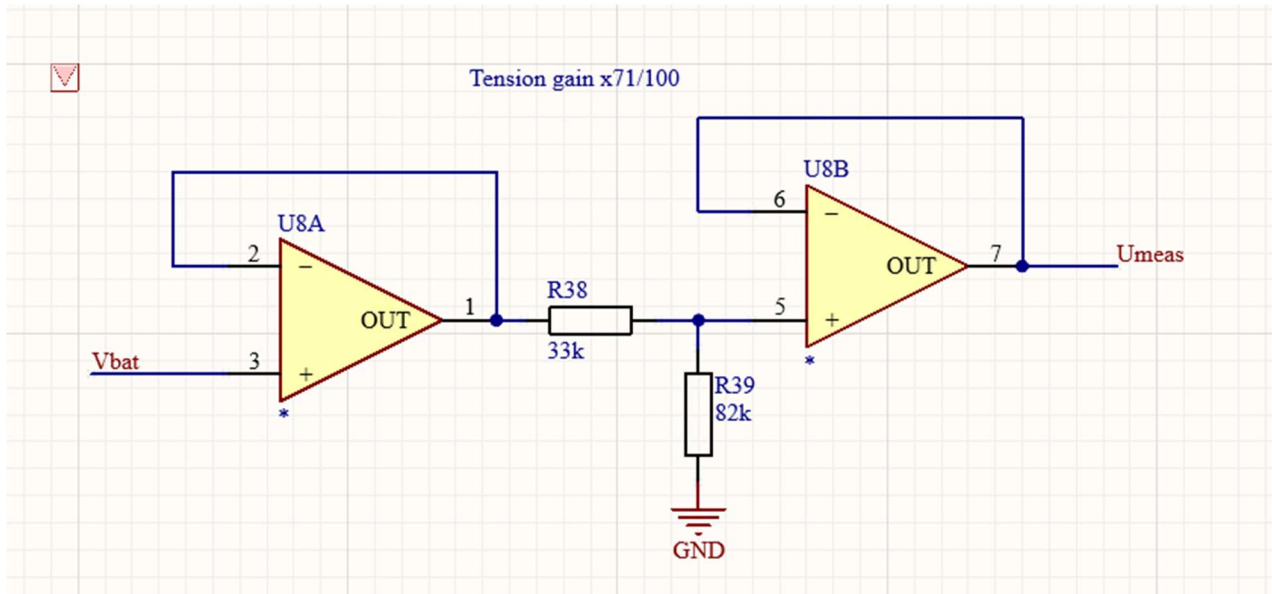


Figure 13 : Schéma tension avec gain 71/100

6 Fast sampling

Le mode Fast Sampling est dédié à la capture rapide des variations brusques de courant ou de tension du DUT. Ce mode permet une résolution temporelle élevée, essentielle pour observer des phénomènes dynamiques tels que des impulsions brèves, des appels de courant ou des transitoires lors de l'activation de certaines charges.

Objectifs

- Observer les détails fins du comportement électrique du DUT
- Capturer des pics de courant trop rapides pour être vus en slow sampling
- Alimenter des algorithmes de détection ou de trigger sur événements

Organisation du circuit

Le circuit fast sampling est composé de plusieurs canaux d'amplification et de filtrage destinés à mesurer avec différents gains pour s'adapter aux divers niveaux de courant attendus.

1. Mesure de courant - voie I_{meas}

Trois voies avec gains distincts sont utilisées pour offrir une grande dynamique de mesure :

- **Voie 1 (Gain x3)** : amplificateur non-inverseur (OPA2187) avec $R_{fb}/R_{in} = 2/1$
- **Voie 2 (Gain x1)** : suiveur pour les courants plus élevés ou lorsqu'aucun gain n'est nécessaire
- **Voie 3 (Gain x100)** : amplificateur haute sensibilité pour les faibles courants, utile pour les DUT basse consommation

Chaque sortie est connectée à une broche analogique différente du microcontrôleur (CH1, CH2, CH3) pour analyse.

2. Régulateur de référence dédié

Une alimentation indépendante, basée sur le LDO ADM7170 (décrit précédemment), fournit une tension stable pour alimenter les circuits analogiques du fast sampling. Cela garantit que les mesures ne soient pas perturbées par des variations de l'alimentation principale.

3. Mesure du courant du régulateur

Une voie dédiée permet de mesurer le courant consommé par le LDO lui-même. Cette mesure est utile pour estimer l'impact énergétique du fast sampling dans les bilans de consommation.

- Un shunt basse valeur est placé en série avec la sortie du LDO
- L'amplification se fait via un OPA2187 à gain élevé (ex : x100), suivi d'un buffer
- La sortie est connectée à une voie ADC du microcontrôleur (ex : CH5)

4. Voies de filtrage rapide et acquisition directe

- Les signaux analogiques sont envoyés vers les ADCs avec un minimum de filtrage actif, pour préserver la bande passante
- Les valeurs sont traitées soit en temps réel (avec DMA + trigger ADC), soit stockées sur la carte SD pour une analyse postérieure

Synchronisation et déclenchement

Un système de trigger logiciel ou matériel (ex : seuil sur CH1) peut forcer un enregistrement rapide sur tous les canaux fast sampling. Cela permet de ne capturer que les événements pertinents, économisant mémoire et énergie.

Résumé des avantages

- Grande précision grâce aux amplificateurs OPA2187
- Mesures différentielles multi-gain pour haute dynamique
- Faible bruit grâce à l'alimentation régulée dédiée
- Acquisition rapide et flexible via les ADCs du STM32

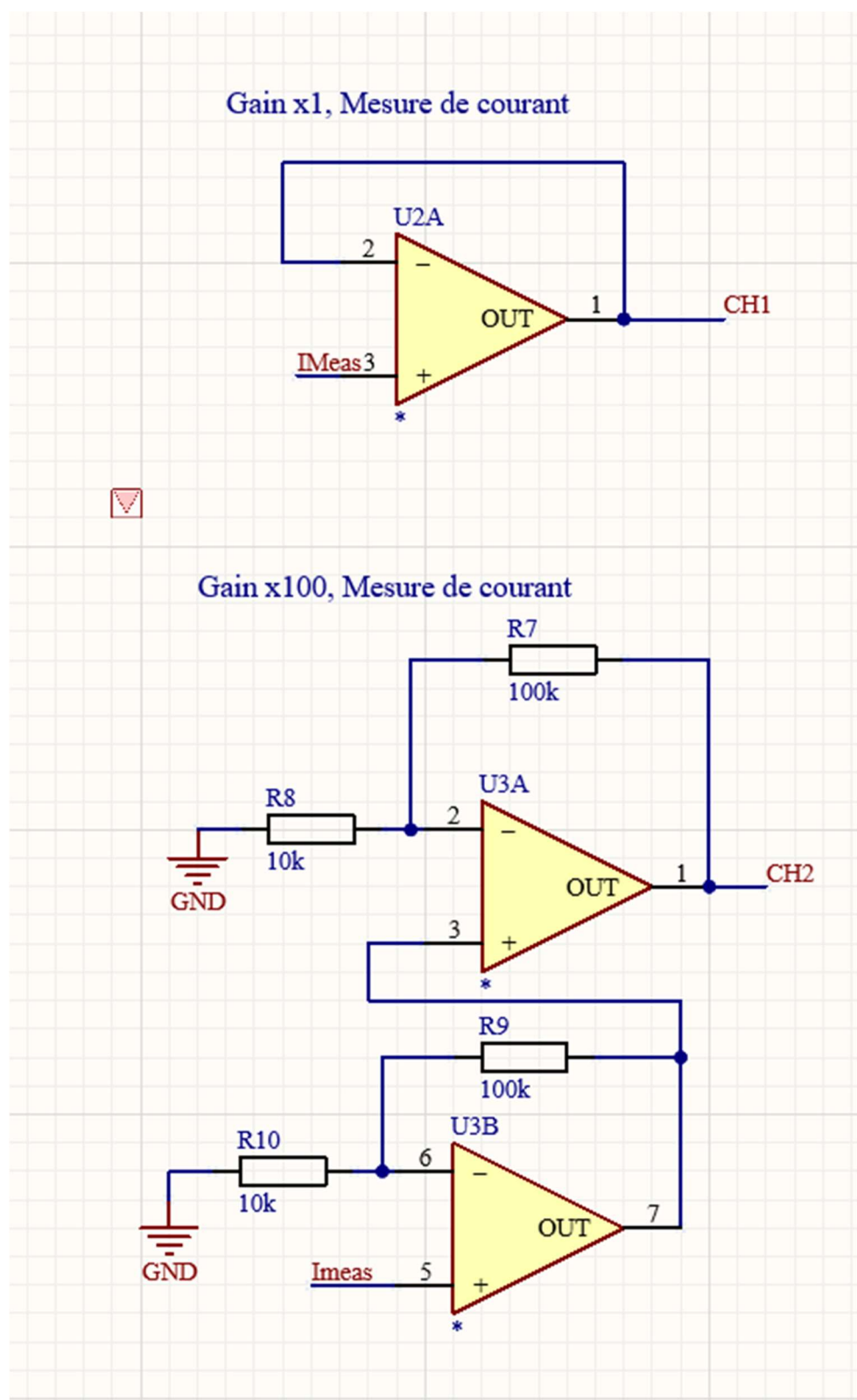


Figure 14 : Schéma mesures de courant



Circuit Design

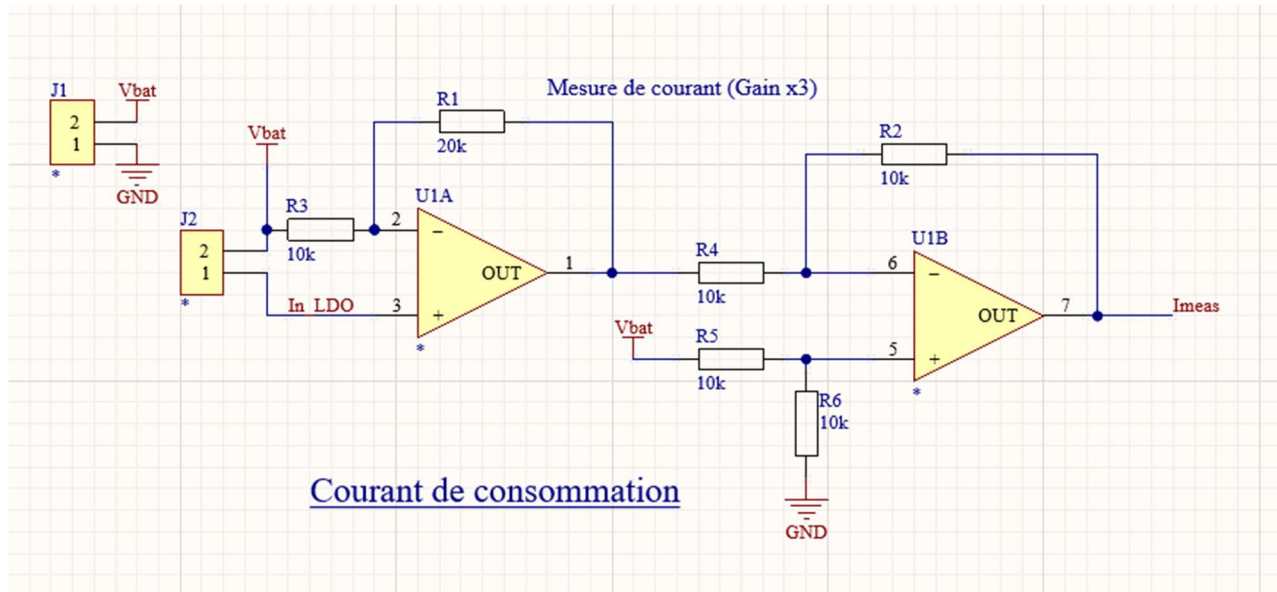


Figure 17 : Schéma mesure de courant avec gain x3

7 Processeur

Le cœur du système est assuré par le microcontrôleur **STM32U595RJ**, un composant ultra basse consommation de la famille STM32U5 de STMicroelectronics. Il est basé sur un cœur Arm® Cortex®-M33 cadencé jusqu'à 160 MHz, avec un FPU (Floating Point Unit) et la technologie TrustZone® pour la sécurité. Ce choix garantit une excellente efficacité énergétique tout en offrant de hautes performances de traitement.

Rôle dans le système

Le processeur a plusieurs fonctions :

- Collecte des données analogiques issues des circuits slow et fast sampling
- Gestion des déclenchements (triggers) pour les acquisitions rapides
- Stockage des mesures sur carte SD
- Communication via USB-C avec un PC ou une interface de debug
- Supervision des états d'alimentation et contrôle des MOSFETs

Ressources matérielles utilisées

- **ADC** : 14 bits, jusqu'à 2.5 Msps. Utilisé pour toutes les voies analogiques (CH1 à CH7)
- **DMA** : permet de transférer les données ADC vers la RAM ou la SD sans impliquer le CPU, réduisant la consommation
- **Timers** : utilisés pour cadencer les acquisitions slow sampling ou pour générer les délais de remise à zéro du peak detector
- **UART et USB FS** : pour communication série et liaison avec un PC via connecteur USB-C

Interfaces intégrées

1. Interface USB-C

- Assure la communication série pour l'envoi des données et le debug
- Alimente le système ou recharge la batterie via VBUS
- Connectée à la fonction USB Full-Speed intégrée du STM32

2. Carte SD

- Interface SPI ou SDMMC utilisée pour l'enregistrement des mesures en local
- Permet le fonctionnement autonome du système sans PC
- Prise en charge du système de fichiers FAT grâce à la bibliothèque FatFS

3. Connecteur STLink

- Connecté aux lignes SWDIO et SWCLK pour la programmation et le debug
- Permet l'analyse temps réel et la mise à jour du firmware

Gestion de la consommation

Le STM32U595 dispose de modes basse consommation avancés (Stop 2, Stop 3, Standby) permettant de minimiser l'impact énergétique pendant les phases d'inactivité ou de veille. Il peut aussi réveiller automatiquement les périphériques autonomes comme l'ADC ou le DMA.

Sécurité et fiabilité

Grâce à TrustZone®, le microcontrôleur peut compartimenter les tâches sensibles (écriture mémoire, calibration, mise à jour) du reste de l'application. Ceci assure une meilleure robustesse et sécurité logicielle.

Résumé

Le STM32U595RJ constitue une plateforme fiable, économe et puissante pour piloter l'ensemble des circuits du système de mesure. Il centralise la collecte, l'analyse et l'archivage des données tout en assurant une faible consommation et une intégration simplifiée avec les outils logiciels STM32CubeIDE et STM32CubeMX.

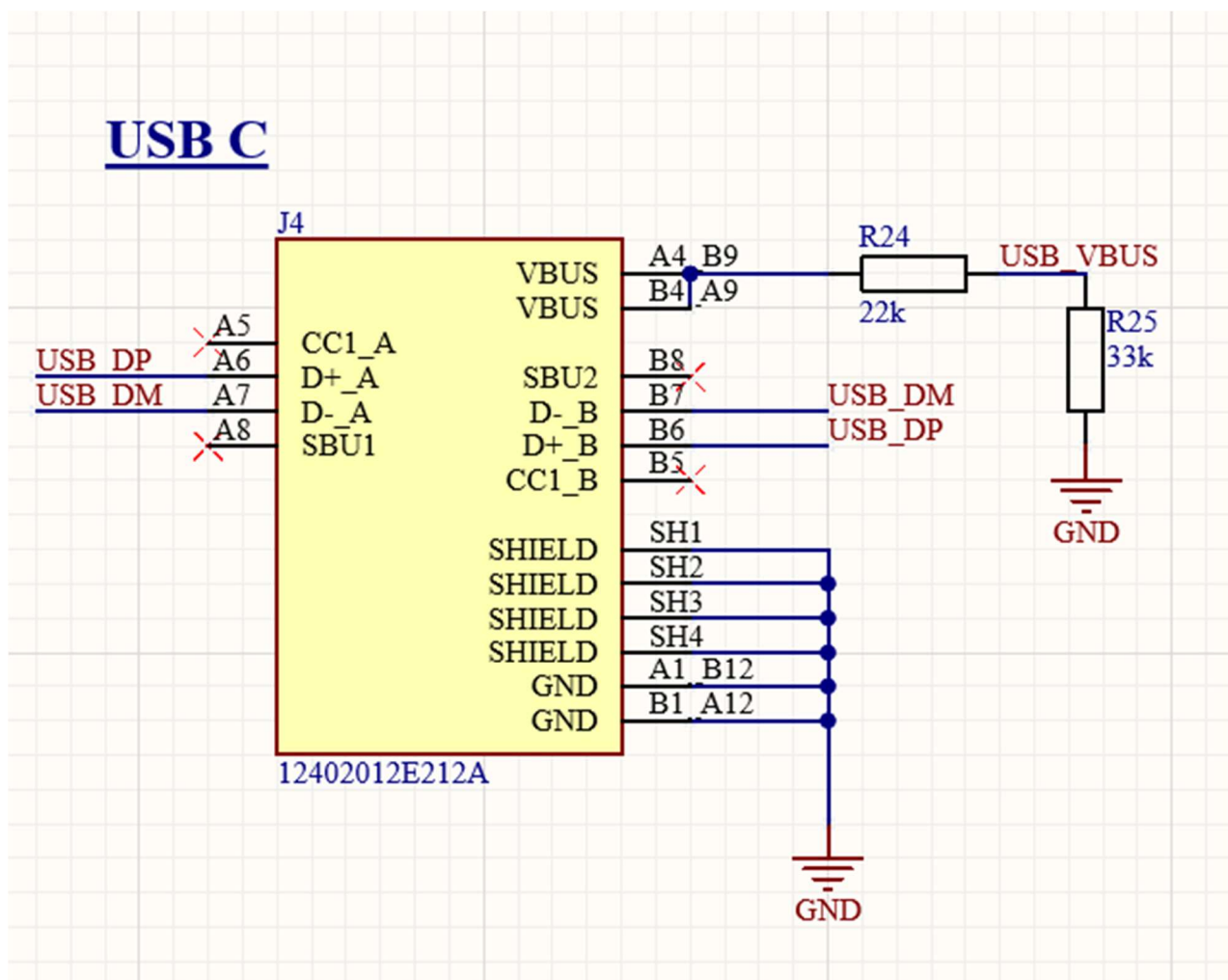


Figure 18 : Schéma USB C

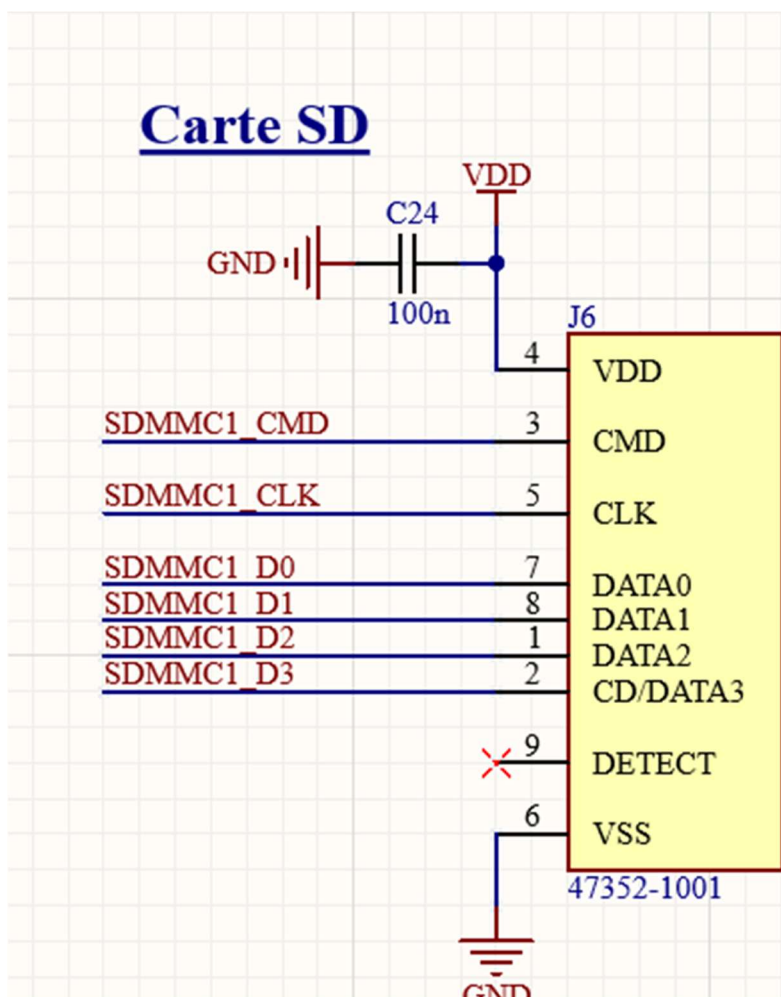


Figure 19 : Schéma carte SD

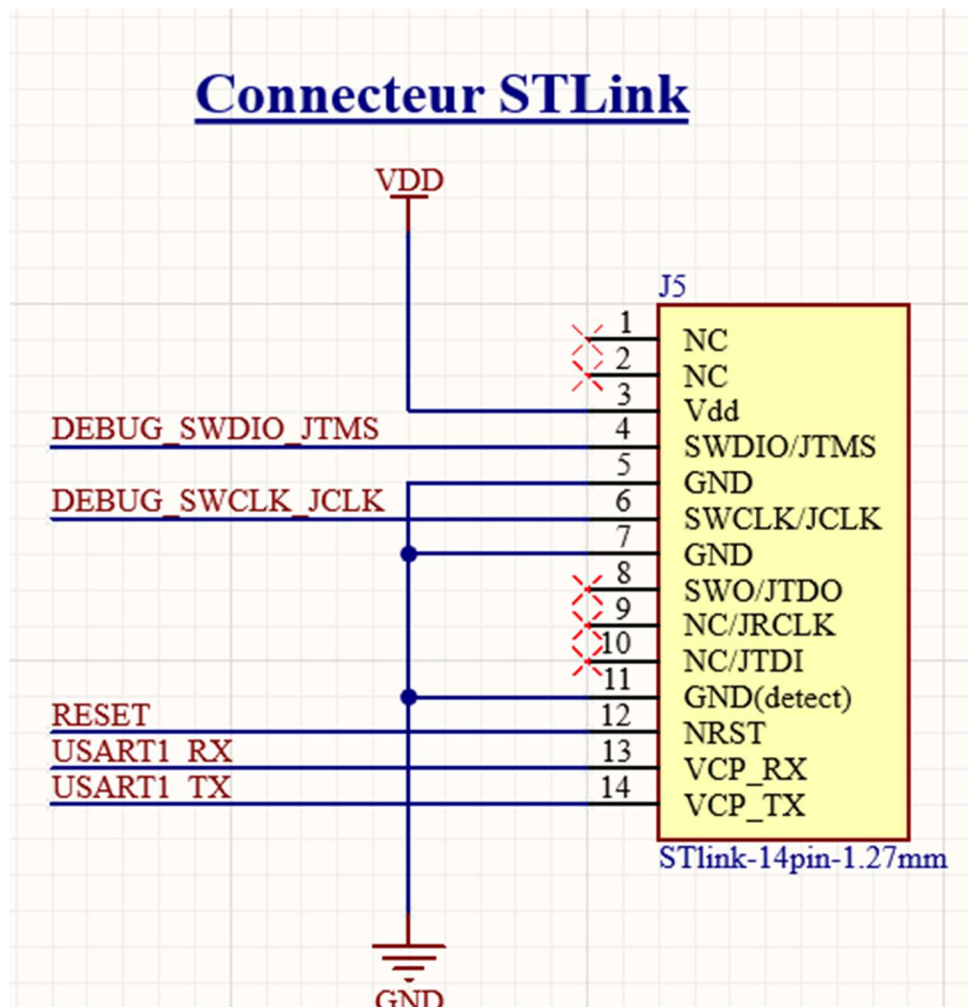


Figure 20 : Schéma connecteur STLINK

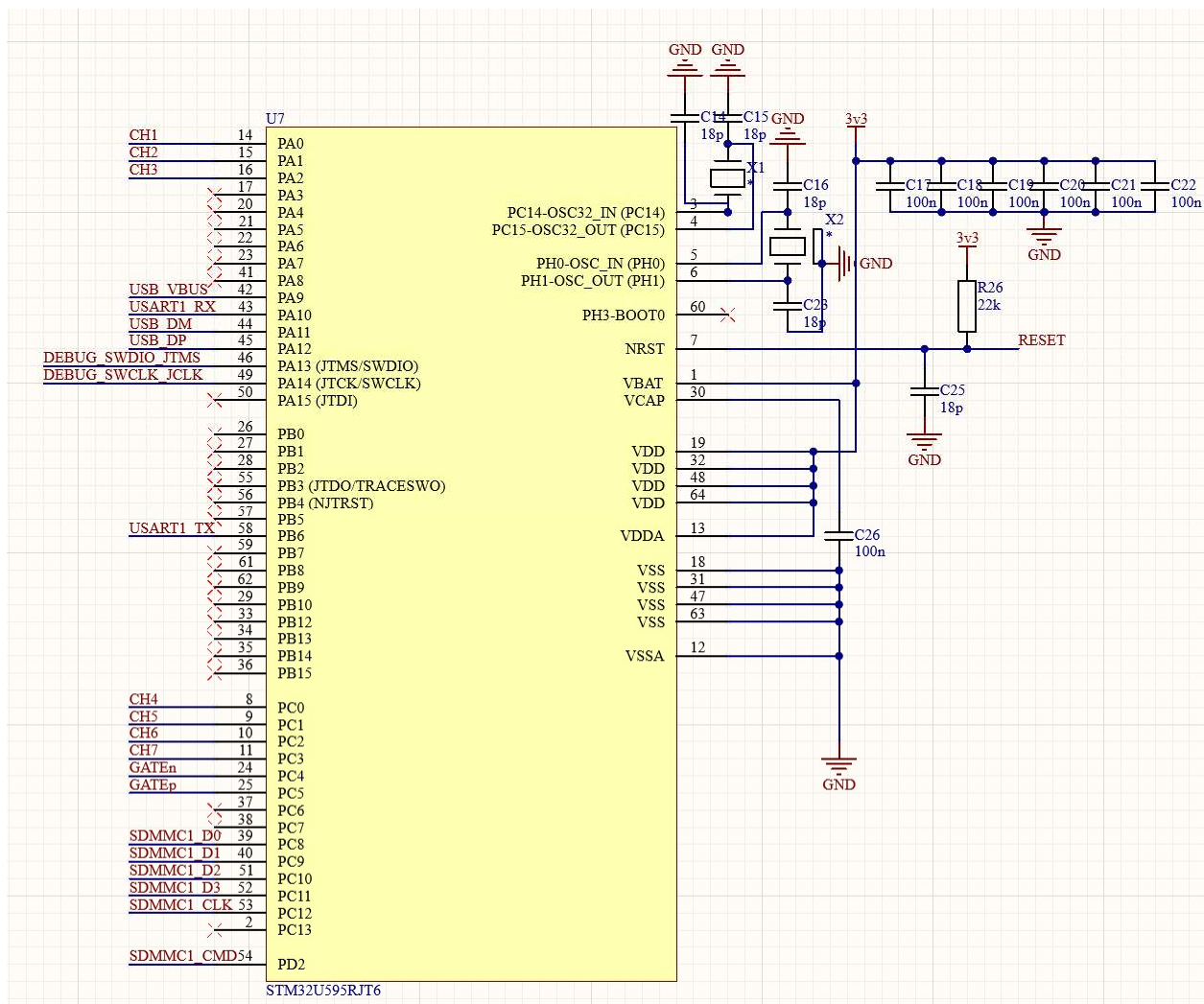


Figure 21 : Schéma processeur

8 Conclusion

Le projet a permis la conception et la réalisation d'un système électronique autonome et précis pour la mesure de courant sur un dispositif externe (DUT), avec une attention particulière portée à la gestion énergétique, la précision des mesures et la robustesse du système. En s'appuyant sur une architecture modulaire, chaque bloc fonctionnel du projet a été développé de manière à répondre à des exigences spécifiques tout en assurant une cohérence globale dans le fonctionnement du système.

Synthèse des contributions techniques

- **LDO ADM7170** : a offert une alimentation extrêmement stable et silencieuse, indispensable pour garantir la fiabilité des mesures analogiques.
- **Peak detector** : a permis la capture efficace des événements transitoires, grâce à une architecture soignée et des composants de précision comme l'OPA2187.
- **Batterie et protection** : le système de gestion multi-batterie a assuré une protection avancée des cellules tout en permettant un fonctionnement en conditions variables.
- **Slow sampling** : a contribué à la réduction de la consommation énergétique en permettant la mesure de longue durée, avec un excellent rapport stabilité/consommation.
- **Fast sampling** : a rendu possible l'analyse détaillée de la consommation du DUT en temps réel, même pour des signaux très rapides.
- **STM32U595RJ** : au cœur du système, le microcontrôleur a démontré sa polyvalence, sa performance et sa faible consommation, tout en permettant une interaction flexible avec l'utilisateur via USB ou carte SD.

Performances atteintes

Le système a été testé dans des conditions variées, montrant :

- Une autonomie prolongée en slow mode
- Une précision de mesure compatible avec les exigences industrielles

Circuit Design

- Une flexibilité d'exploitation grâce à l'enregistrement sur SD et l'interface USB
- Une excellente stabilité thermique et électrique du point de mesure

Perspectives

Ce projet peut servir de base pour le développement de systèmes embarqués de monitoring plus complexes. Les extensions envisageables comprennent :

- L'intégration d'un module sans fil (Bluetooth Low Energy ou LoRa)
- L'optimisation logicielle des algorithmes de détection et de compression des données
- La miniaturisation du PCB pour une intégration directe dans des boîtiers industriels

Conclusion générale

Ce système complet conjugue fiabilité, faible consommation, précision de mesure et capacité d'analyse, répondant aux exigences modernes de test et caractérisation de dispositifs électroniques. Il illustre une mise en œuvre aboutie de principes fondamentaux en électronique analogique, traitement embarqué, et gestion de l'énergie.

Lieu, date : Sion, le 16.06.2025

Signatures :

