

Rapport de stage

[TOC]

Contexte

RBI Instrumentation

RBI instrumentation est une TPE meylanaise spécialisée dans l'instrumentation. Elle ne compte aujourd'hui que 4 salariés :

- Aurélien Rosset, électronicien, directeur
- Jean Arnault, ingénieur mécanique et spécialiste en mécanique des fluides
- Hugo Vernier-Lambert, ingénieur mécatronique (mon maître de stage)
- Julien Lorent, câbleur.

L'équipe est épaulée par 4 prestataires réguliers pour la gestion, la conception électronique, le câblage électronique et le développement logiciel.

RBI est en activité depuis plus de 30 ans, sur trois principaux domaines.

1. **Les sondes optiques** pour l'étude d'écoulements diphasiques. C'est l'activité historique sur laquelle RBI a démarré.
2. **Les bancs de test**, notamment pour qualifier les équipements aéronautiques produisant l'oxygène de bord. Cette activité a démarré il y a une dizaine d'années avec l'arrivée de deux personnes issues d'une société spécialisée dans le domaine, et c'est la principale source de revenus de RBI aujourd'hui.
3. **Le câblage industriel**. C'est l'activité la plus récente.

RBI a été rachetée en 2023 par BIGATA, une société bordelaise spécialisée en équipements aéronautiques. Elle porte aujourd'hui officiellement le nom de SN-RBI pour « Société Nouvelle RBI ».

RBI réalise un chiffre d'affaire annuel d'environ 900 k€/an (chiffre 2017).

Technologies

Forte dépendance à National Instruments (NI) :

- pour les cartes multifonctions (MIO) et d'acquisition de données (DAQ) ;
- pour l'environnement de développement logiciel (LabVIEW).

Problèmes :

- technos propriétaires
- obsolescence :
 - les cartes MIO-DAQ ne sont maintenues que ~10 ans
 - les versions de LabVIEW ne sont maintenues que 4 ans
- de moins en moins adapté aux contraintes des clients de RBI (scientifiques et industriels)
- coût élevé

Objectifs du stage

= proposer une stack techno alternative et pérenne, pour compléter ou remplacer la stack NI.

On souhaite particulièrement explorer :

- les possibilités des micro-contrôleurs (MCU) pour remplacer les cartes NI ;
- les solutions logicielles liées à Python, très utilisé par les clients de RBI, pour remplacer LabVIEW.

Deux développements doivent permettre de valider la stack techno :

- une carte DAQ 16 bits / 1 kHz
- une carte DAQ 8 bits / 1 MHz

Gestion de projet

On travaille en mode Agile avec des objectifs incrémentaux et des cycles courts de développement. Le suivi est fait via Kanban dans l'espace CryptPad de l'équipe.

Le projet nécessite trois types de compétences :

1. **Le développement informatique** (MCU et PC). C'est le domaine sur lequel j'ai suffisamment d'expérience pour être totalement autonome.
2. **La connaissance de l'écosystème embarqué.** L'équipe a une petite culture Arduino, j'ai utilisé des STM32 à l'école, mais personne n'a d'expertise sur le sujet : les options proposées à RBI viennent de mes recherches sur Internet et de ma veille technologique, et sont à valider par l'équipe et leur prestataire informatique.
3. **La conception électronique.** Je n'ai qu'une formation théorique et aucune expérience en conception, mais c'est le domaine où RBI excelle : je peux compter sur l'équipe et le prestataire électronique pour m'aider à monter en compétence. C'est le sujet sur lequel j'ai le moins d'autonomie.

L'avancement du projet est jalonné par les démonstrations techniques et les revues de design des électroniciens. Chacune de ces étapes de validation est l'occasion d'ajuster les objectifs du projet.

Livrables attendus

- code source commenté (1) côté MCU et PC
- documents de conception électronique (1) : schémas, routages
- fiches de synthèse justifiant les solutions envisagées (2)

(1) Le code et les documents de conception sont la propriété de RBI, et ne sont pas inclus dans ce rapport. RBI m'autorise à en publier les extraits pertinents pour la rédaction du rapport.

(2) Avec l'accord de RBI, les fiches de synthèse ont été rédigées en anglais pour me permettre de les publier sur mon compte GitHub.

Stack technique proposée

Sciduino = SciPy + PySide + Arduino

Stack matérielle

Plus que de simples MCU, on cherche un écosystème de cartes de développement avec un bon rapport facilité/pérennité. On a exploré les solutions disponibles pour avoir une vue d'ensemble des puces (fiche MCU Chips), des cartes de développement (MCU Boards) et de leurs empreintes/pinouts (MCU Interfaces).

Le choix s'est vite restreint à trois options : Arduino, STM32, Raspberry Pi.

Arduino = le standard des hobbyistes

- avantages :
 - environnement logiciel simple, libre et complet : Arduino-IDE, Arduino-CLI...
 - agnostique : AVR, ARM Cortex-M, ESP32, RISC-V...
 - gestion saine de l'obsolescence (maintien de puces 8-bits, remplacement de ARMMbed par Zephyr...)
 - les empreintes Uno et Nano sont là pour durer
 - large choix de périphériques disponibles, souvent en open-hardware
 - compétences faciles à trouver (hobbyistes notamment)
 - très simple à prendre en main (IDE, HAL...)
- inconvénients :
 - l'IDE privilégie la portabilité et la facilité aux performances
 - image très « amateur »

STM32 = la référence industrielle

- avantages :
 - c'est la solution la plus utilisée actuellement en industrie
 - large choix de puces et de cartes de développement
 - l'IDE permet de viser de très bonnes performances
 - compatibilité *correcte* avec Arduino (stm32duino + empreintes Uno/Nano)
- inconvénients :
 - environnement logiciel lourd (fork d'Eclipse) et non-libre (mais des alternatives GCC sont possibles)
 - impose une architecture matérielle (ARM Cortex-M)
 - gestion moins claire de l'obsolescence (les documents STM32 se réfèrent toujours à ARM Mbed, dont la fin de vie est programmée pour juin 2026)
 - puces maintenues 10 ans, donc pas mieux que NI

Raspberry Pi Pico = l'alternative hi-speed/low-cost

- avantages :
 - environnement logiciel libre : MicroPython ou SDK C/C++
 - les puces sont top (rp2040, rp2350)
 - les cartes sont top (Pico, Pico2)
 - les PIO ouvrent des possibilités uniques
 - pas limité à ARM Cortex-M (le rp2350 propose du RISC-V)
 - puces maintenues 20 ans

- prix
- inconvénients :
 - l’empreinte Pico est peu utilisée hors Raspberry
 - choix limité de MCU

Arduino semble avoir le meilleur compromis facilité/pérennité, malgré son image hobbyiste. Il y a déjà eu des projets Arduino chez RBI et le passage à STM32 n’apporterait aucun avantage suffisamment net ; si on devait changer, ça serait plutôt pour Raspberry.

Développement sur *breadboard*

Les cartes NI sont faciles à connecter à des signaux extérieurs, via des borniers à vis le plus souvent.

Pour retrouver cette facilité on utilise des cartes des développement au format DIP et des *breadboards*. L’idée est de :

1. valider un schéma sur la *breadboard* ;
2. commencer le développement logiciel sans attendre que le PCB soit finalisé ;
3. transférer la carte contrôleur de la breadboard au PCB quand il est prêt.

RBI ne faisant pas de production en série, intégrer le MCU directement sur le PCB n’a pas d’intérêt. On préfère donc choisir une empreinte et un pinout aussi stable que possible — v. fiche MCU Interfaces.

L’empreinte Nano est une bonne passerelle :

- large choix de MCU, incluant le Raspberry Pi RP2040 qui bénéficie du support officiel Arduino ;
- bonne compatibilité avec STM32, grâce à stm32duino (maintenu par la communauté) et au format Nucleo32 (même empreinte/pinout mais attention, le connecteur USB est placé à l’opposé de la position Arduino) ;
- très répandue, on peut donc espérer une bonne longévité de ce format.

Référence	Contrôleur	Architecture	Horloge	E/S
Nano	ATmega 328	AVR	16 MHz	5 V
Nano Every	ATmega 4809	AVR	20 MHz	5 V
Nano 33 BLE	nRF52840	Cortex-M4	64 MHz	3.3 V
Nano Matter	MGM240S	Cortex-M33	78 MHz	3.3 V
Nano RP2040	RP2040	2× Cortex-M0+	125 MHz	3.3 V
Nano ESP32	ESP32-S3	2× Xtensa LX7	240 MHz	3.3 V

I²C pour l’extensibilité :

- standard ancien et solide, très largement diffusé ;
- connectable en daisy-chain, un même contrôleur I²C peut piloter plusieurs équipements ;

- beaucoup de cartelettes sont disponibles avec des connecteurs Qwiic, Stemma, Stemma QT qui sont compatibles (électriquement) entre eux — à privilégier à Grove (propriétaire) et Gravity (compatible mécaniquement mais pas électriquement, attention!).

À l'usage, on a trouvé que les périphériques I²C étaient plus pratiques que les *shields* Arduino, y compris pour le prototypage : pas de conflits d'usage de broche, pas de contraintes de forme.

SPI pour les fonctions critiques en performance : c'est notamment le choix qu'on a retenu pour les ADC mis en œuvre. C'est un standard très simple sur le principe mais assez laxé, donc moins simple à utiliser que I²C.

Stack logicielle

Aujourd'hui, RBI repose sur des produits de National Instrument (LabView, cartes multi-fonctions...) pour prototyper leurs produits, ce qui s'avère être dangereux : leurs produits sont très cher et peuvent ne plus être maintenu du jour au lendemain, sans plan de secours viable. Le projet Sciduino cherche à créer une « boîte à outils » simple, basé sur du logiciel libre pour se débarrasser de la dépendance à NI.

Afin de pouvoir facilement afficher à l'écran un signal mesuré d'un capteur avec le traitement nécessaire, Sciduino est basé une stack logicielle séparé en trois étages distincts :

1. le code Arduino qui pilote le micro contrôleur et effectue les mesures
2. un module python pour s'interfacer avec le micro-contrôleur
3. une interface graphique en QML qui affiche les informations reçu

L'objectif de cette stack logicielle est de limiter le couplage entre les différentes fonctions nécessaires (acquisition, pilotage, affichage), mais aussi de se limiter à des outils simple et libre.

Firmware Arduino

Le firmware tournant sur le micro-contrôleur est écrit en Arduino afin de pouvoir rapidement prototyper du code qui fasse abstraction du matériel sur lequel il va tourner.

Aujourd'hui, le code contient une API faisant abstraction de différents ADC communément utilisés dans la boutique, une structure de donnée pour représenter les entrées analogique / sorties numérique utilisés et une structure `Waveform` qui stocke une fenêtre sur le signal.

La carte peut effectuer une mesure « one-shot », mesurer une fenêtre ou mesurer en continu sur toutes les voies activées et les stocker dans différentes waveforms avant de les envoyer à l'ordinateur.

Afin d'échanger des instructions et informations entre la carte et l'ordinateur, on utilise le protocole SCPI, car cela permet d'écrire des instructions à la main pour du debug, mais aussi ne pas dépendre d'un pilote spécifique dans l'application desktop. Cependant, la carte permet aussi de renvoyer les mesures et informations en binaire pour de meilleurs performances.

Pilote Python

Un module python est développé en parallèle pour pouvoir s'interfacer avec le micro-contrôleur. Il exporte un objet `Sciduino` qui récupère la configuration des entrées / sorties de la carte et

contient des méthode pour envoyer des instructions à la carte puis parser les réponses en des types natif à Python ou dans des tableaux Numpy (comme le contenu des Waveform envoyé par la carte).

Ce module est écrit en Python car bien que les performances soient très mauvaises, c'est un langage simple, interprété, cross platform et qui possède un écosystème très complet pour le calcul scientifique ou traitement de signal rapide (Numpy, Scipy, Pandas...).

Interface graphique QML

Pour l'interface graphique on utilise QML (un langage de description basé sur Qt et JS en backend / frontend respectivement), car il combine :

- un langage de description plutôt simple
- une grande librairie standard de composant simple à utiliser ou étendre
- des graphs optimisés par OpenGL
- des bindings vers C++ (via le framework Qt) ou Python (via la librairie Pyside6)

En plus du code QML nécessaire pour créer l'interface graphique, un second module Python définit les bindings nécessaires pour transmettre les commandes de l'interface au pilote de la carte, puis mettre en forme les réponses avant de les afficher dans l'interface.

[TODO: à réserver au chapitre suivant ?]

L'approche SCPI illustre bien la différence de démarche avec les produits NI: au lieu d'acquérir directement les données brutes via le PC, c'est le MCU qui est en charge de l'essentiel de l'acquisition *et du traitement*. Les données remontées au PC sont donc minimales, et le développement desktop se concentre sur la présentation des données.

L'application desktop est développée, mise au point et déboguée sur un PC, mais peut ensuite être exécutée sur un SBC type Raspberry Pi, contrairement à LabVIEW — et, grâce à Python, sans nécessiter de recompilation.

Mise en œuvre

=> utilisation d'Arduino comme périphériques DAQ, en utilisant les ADC intégrés ou des ADC externes

[TODO: donner des détails, notamment sur le bridge]

[TODO: intégrer des copies d'écran]

- LabVIEW est l'option la plus rapide pour prototyper
- Python/QML reste simple (cf. Qt Creator pour le design à la souris) et permet de livrer des apps mieux finies:
 - versionnement SVN ou Git possible (pas de diff avec LabVIEW)
 - qualité logicielle (lint, typage...): ruff, uv, mypy

- GUI bien séparée du reste du code
- installeur de taille raisonnable (PyInstaller)
- le client final peut modifier l'app sans dépendances logicielles
- l'approche SCPI facilite la portabilité du code LabVIEW ou Python, sans nécessiter de pilote spécifique.

Cadence d'échantillonnage

Pour un fonctionnement en mode *streamnig* (acquisition de données en direct sur le PC, en utilisant le MCU comme une carte NI), les premiers tests ont mis en évidence une limitation inattendue de la cadence d'échantillonnage: c'est souvent l'USB et non l'ADC qui bride les performances.

- La plupart des cartes MUC ont un contrôleur USB 1.1, limité au débit *full-speed* soit 12 Mbds théoriques — et au mieux 1 MB/s en pratique (Arduino Nano 2040), parfois seulement 600 kB/s.
- Certaines cartes comme l'Arduino Due ont un contrôleur USB 2.0 mais attention, toutes ne permettent pas le débit *hi-speed* de 480 Mbds; et même quand c'est le cas, ça reste un débit théorique (*signaling rate*): le débit réel de transfert de données est très inférieur, de l'ordre de 30 MB/s pour une clé USB, et quasiment 10 fois moins pour le seul contrôleur *hi-speed* qu'on ait pu tester (Arduino Due).
- D'autres cartes comme l'Arduino Giga, avec sa puce STM32H747, ont à la fois un contrôleur *full-speed* et un contrôleur *hi-speed*... mais c'est le premier qui est utilisé pour communiquer avec le PC, semble-t-il. Avec un débit nettement inférieur à celui du RP2040.

[TODO: partie *pyserial* à revoir]

Côté Python, les vitesses de transmission USB ont été évaluées en envoyant le texte dans le moniteur série d'arduino-cli. On évalue maintenant les perfs de différentes libs USB.

- **pyserial**: On constate un très gros écart de performance (100 kHz max) si on lit trop de données d'un coup avec *pyserial* (avec un *readline* trop long, par exemple). Allouer à l'avance un *bytearray* suffisamment long et écrire dedans ce qu'on recoit par des plus petits paquets élimine les réallocs et rend cet overhead négligeable.
- **pyusb**: Beaucoup trop compliqué à mettre en place. *Pyserial* est probablement suffisamment rapide pour la plupart des applications.

Arduino propose systématiquement 8 entrées analogiques sur ses contrôleurs, avec une cadence d'ADC typiquement entre 4 et 10 μ s (100 à 250 kHz). Pour envoyer un *stream* continu de 8 voies (800 kS/s à 2 000 kS/s), il faudrait un débit USB de 1.6 à 4 MB/s — et aucune carte Arduino ne semble permettre de transférer un tel flux de données.

	Due	Nano 2040	Giga R1 Wifi
MCU	Atmel SAM3X3E	RP2040	STM32H747XIH6
architecture	ARM Cortex-M3	2× ARM Cortex-M0+	ARM Cortex-M7 + M4
horloge	84 MHz	125 MHz	480 MHz + 240 MHz
mémoire flash	512 kB	16 MB	2 MB
mémoire SRAM	96 kB	264 kB	1024 kB
débit USB réel	2.8 MB/s	1.0 MB/s	0.67 MB/s
cadence USB max. (8 voies)	~170 kHz	~60 kHz	~40 kHz
cadence ADC	~230 kHz	~250 kHz	~110 kHz

STM32 propose des cartes Nucleo dédiées à l'acquisition rapide de données. Mais là encore, leur contrôleur USB full-speed les limite à 1 MB/s. On ne peut donc streamer qu'une seule voie à sa cadence d'échantillonnage maximale.

Board	Référence	MCU	ADC
[Nucleo-F303K8]	[MB1180]	[STM32F303K8T6]	2 × 0.20µs (~400 kHz)
[Nucleo-G431KB]	[MB1430]	[STM32G431KBT6]	2 × 0.25µs (~500 kHz)
[Nucleo-L412KB]	[MB1180]	[STM32L412KBU3]	2 × 0.20µs (~400 kHz)

[TODO: transposer ce tableau pour le rendre homogène avec celui des cartes Arduino]

Jusqu'où un MUC peut-il remplacer une carte NI-DAQ?

L'intérêt d'une carte MUC consiste à faire l'acquisition *et le traitement* des données *avant* d'en envoyer le résultat au PC. On peut quand même streamer des données en continu :

- pour les bancs de test pneumatiques de RBI, où on se contente de 1 kHz ;
- pour les applications audio, où l'USB full-speed permet de passer 8 voies 16 bits à 48 kHz ;
- mais pas pour les applications nécessitant un échantillonnage plus rapide.

Pour l'acquisition haute fréquence, les PicoScope et leur port USB3 sont de bonnes alternatives : beaucoup plus rapides que les cartes NI du moment, avec un bon SDK et des pilotes pour Windows, macOS, Linux. Il y a aussi le projet *open-hardware* ThunderScope, qui pousse les performances encore plus loin, en utilisant directement la RAM et le GPU du PC.

Utiliser un protocole réseau plutôt qu'USB ?

Une alternative serait d'utiliser un micro-contrôleur avec un port Ethernet 100 Mbds. STM32 en propose au format Nucleo144 (simili Uno) avec les h7s3l8 et n657x0-q. Il y a aussi le RP2040-ETH de Waveshare. On pourrait aussi, tout simplement, utiliser la connectivité WiFi du Giga R1, du Nano RP2040, ou d'un autre MUC orienté IoT. Mais cela sort du cadre fixé pour ce projet.

Quitte à utiliser un protocole réseau, un SBC comme le RPi Zero 2W serait plus approprié :

- bien meilleures performances (quad-core 64 bits 1 GHz, 512 MB de RAM)
- un vrai PC, avec serveur HTTP, port HDMI, stockage persistant (MicroSD)
- le GPIO Raspberry, pour les périphériques HAT
- low-cost (environ 15 €)

Carte BTO : 16 bits / 1 kHz

Objectif

L'objectif initial (figurant sur l'offre de stage) était de concevoir un shield DAQ pour Arduino Uno, basé sur un ADC 16 bits / 1 kHz / 8 voies et comportant une zone sur laquelle on peut souder des composants. Cette approche a finalement vite été rejetée, car le projet était trivial (il suffit d'utiliser un ADC communiquant en SPI ou I²C), et à l'usage, on a vu que le prototypage sur breadboard était bien plus pratique (beaucoup plus de place, pas besoin de souder...).

L'objectif révisé est de concevoir une carte au format Europe (100×160 mm) conçue autour d'une empreinte Nano pour résoudre l'obsolescence de la carte NI-6212 OEM, cruciale pour le banc de test OBOGS (BTO) de RBI.

Cette carte doit assurer les fonctions qu'on attendait de la NI-6212 : - numérisation au mV près de 8 voies analogiques ± 10 V, à 1 kHz ou mieux ; - gestion des bus d'adresse (8 bits) et de données (8 bits) spécifiques à BTO.

National Instruments ne propose aucune alternative suffisamment compacte pour le format Europe du rack électronique BTO. Par ailleurs, BTO est piloté par une application LabVIEW 2015, et l'utilisation d'une carte NI plus récente imposerait une mise à jour de LabVIEW — pour lequel NI a récemment revu la politique commerciale : prix (beaucoup) plus élevés, fin du support Linux, entre autres.

Cette carte BTO est l'occasion de réduire la dépendance de RBI à NI.

Choix du matériel

Arduino possède une gamme de cartes au format Nano comportant une dizaine de produits ; la plupart sont basés sur des architectures ARM, mais certains sont encore en AVR. Cette distinction est importante, car non seulement les cartes AVR n'ont pas la puissance de calcul des cartes ARM, mais leurs GPIOs fonctionnent à une tension de référence (ioref) différente : 5V pour AVR, 3.3V pour ARM.

Nous avons choisi le Nano RP2040 pour sa puissance de calcul (et pour découvrir les capacités du RP2040), mais nous avons aussi approvisionné un Nano Every (AVR) pour s'assurer que la carte BTO fonctionne avec les MCU que RBI a l'habitude d'utiliser.

En ce qui concerne l'ADC, nous avons initialement choisi d'utiliser un MAX1300. C'est un ADC SPI / 16bits / 100kHz / 8 voies. L'équipe a l'habitude des MAX, et sur le papier, le MAX1300 remplit largement les besoins de la carte BTO. Cependant, nous avons vite repéré de nombreux problèmes en pratique :

- le signal mesuré comportait beaucoup de bruit, rendant la résolution de 16 bits inutile ;
- le protocole SPI est un standard très laxé, et la façon dont il a été implémenté nous limite : notamment, il est incapable d'envoyer et recevoir des informations en même temps, divisant par deux la fréquence d'acquisition.

On a donc choisi de le remplacer par un LTC1859 : un autre ADC ayant les mêmes specs que le MAX1300, mais ne comportant aucun des problèmes cités précédemment, en plus d'être bien plus simple à piloter et pouvant théoriquement atteindre une fréquence d'acquisition de 250 kHz.

Ces fréquences d'acquisition de 50, 100 voire 250 kHz semblent démesurées, mais c'est ce qui nous permet de garantir une parité de fonctionnement avec la carte NI-6212 actuellement utilisée : s'il fallait implémenter un test à 10 kHz sur l'AVR ou effectuer des traitements plus complexes (par exemple, une transformée de Fourier avec un ARM), le matériel ne nous limitera pas.

Enfin, bien que les deux ADC utilisés possèdent une tension de référence interne, celle-ci n'est pas assez précise pour l'objectif du mV sur ± 10 V. On a donc utilisé un composant externe dédié – un LT6654AIS6-2.5 – pour obtenir une tension de référence à $2.5\text{ V} \pm 0.05\%$.

(Pour l'anecdote, le MAX1300 *avec* la v_{ref} externe avait un signal plus bruité que le LTC1859 *sans...*)

Conception KiCad

RBI privilégie les logiciels libres quand c'est possible, et utilise KiCad pour la conception électronique. N'ayant pas été formé au design électronique durant mes études, il a fallu apprendre sur le tas. Mon maître de stage m'a formé et m'a assisté, tant sur la carte BTO que sur un *pet project* sur lequel je travaille sur mon temps libre, dans un cadre associatif. Grâce à lui je suis désormais autonome avec KiCad.

Le schéma de principe de l'ancienne carte a été conçu dans un autre logiciel il y a quelques années. Il a d'abord fallu que je retranscrive ce dont j'avais besoin dans KiCad (conneteurs, buffers, protection décharges électro-statique...).

Le rack électronique du banc fonctionne en 5V, les AVR aussi, mais pas les ARM. On veut donc pouvoir amplifier le signal des cartes ARM tout en gardant le signal 5V des cartes AVR – le tout, sans nécessiter de configuration manuelle, qui est source d'erreurs parfois difficiles à diagnostiquer.

Pour cela, on utilise un « level-shifter », un montage à transistor qui reçoit un signal numérique et une référence de tension en entrée, et fixe le niveau de tension en sortie à un niveau fixe. Les

Arduino Nano ne fournissant pas de pin ioref par défaut, on utilise un GPIO en sortie numérique pour recréer la fonction.

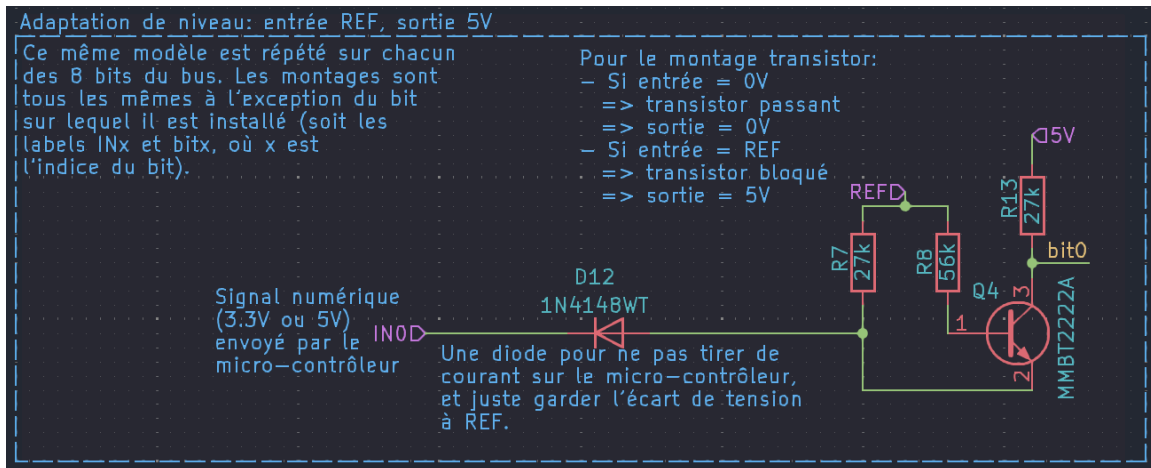


Figure 1: Schéma électronique d'un level-shifter

Les GPIOs ne pouvant pas tirer autant de courant qu'une vraie ioref, il a fallu ajuster les valeurs de résistance pour rester dans les limites des cartes les plus contraignantes (< 7 mA). La tension de 0.7 V en sortie (causée par la diode) pour 0 V en entrée n'est pas un problème, car on utilise un buffer 8 bits pour dissocier électriquement la carte Arduino du reste du banc.

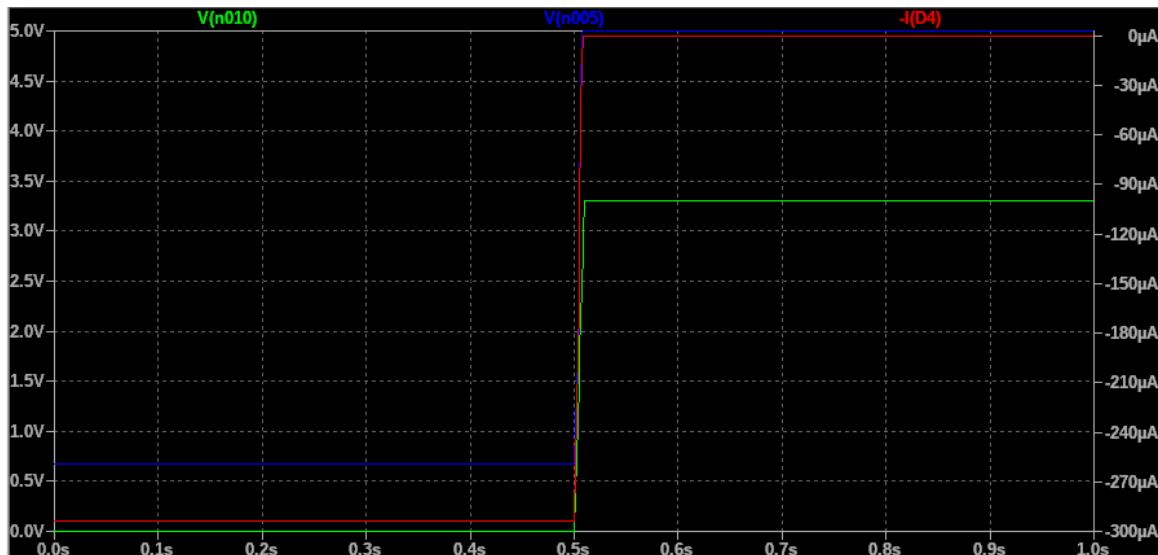


Figure 2: Simulation LTSPICE d'un level-shifter

Concernant l'ADC, la résolution de 16 bits n'a d'intérêt métrologique que si on prend soin à éviter toute perturbation électrique ou électro-magnétique sur le circuit. C'est pourquoi nous avons dû mettre en œuvre de nombreux systèmes pour mitiger cela le plus possible.

Chaque voie de l'ADC passe d'abord dans un étage de traitement de signal, afin de filtrer les bruits parasites et protéger l'ADC des décharges électro-statiques. Chaque voie est envoyée sur

une paire signal / commun ; ces communs sont tous sur des pistes différentes, mais sont au même potentiel en amont, donc on les relie ensemble avant de les connecter à la patte COM de l'ADC et au GND. Ce système date d'une ancienne révision du banc de test OBOGS, qu'on doit garder en place pour des questions de compatibilité ascendante.

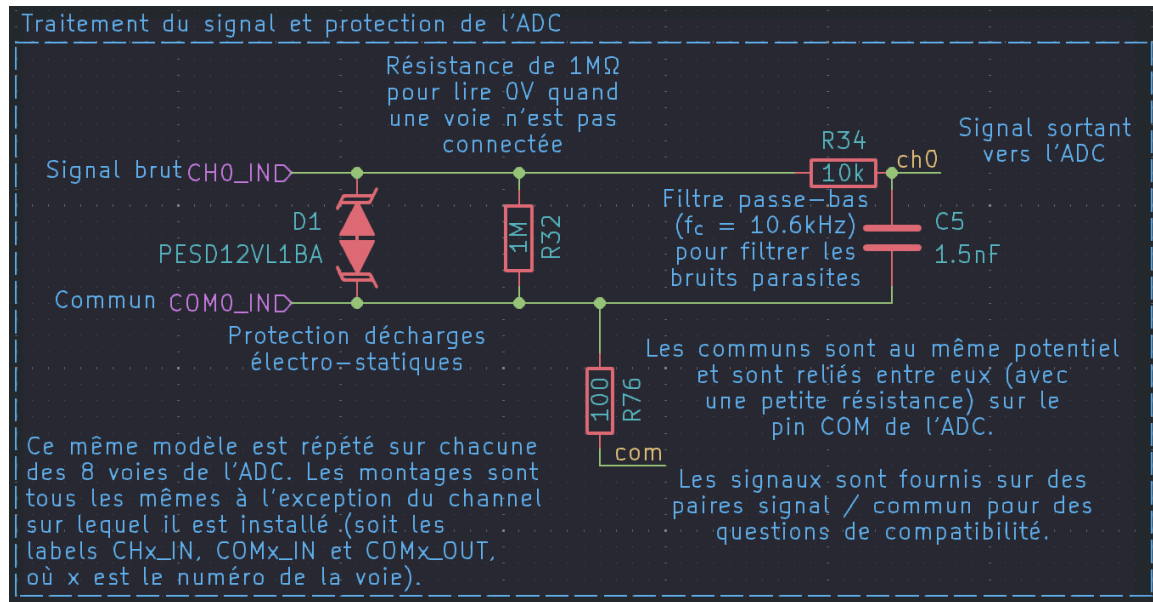


Figure 3: Schéma de l'étage de traitement de signal

Les micro-contrôleurs sont des composants très complexes, dont le fonctionnement interne peut générer un léger bruit susceptible de se répercuter sur le reste du circuit, notamment sur le plan de masse. Ce bruit pouvant perturber les mesures de l'ADC, on a cherché à séparer l'ADC du « monde numérique » le plus possible. Cela a été réalisé via deux techniques :

1. on utilise un régulateur de tension externe – un L78L05-SOT89 – pour fournir une tension stable aux alimentations analogiques de l'ADC ;
2. on sépare la carte en deux plans de masse distincts, un pour le ground numérique (DGND), l'autre pour le ground analogique (GND). Ces deux plans de masse sont reliés via une résistance de 0Ω et quelques capacités, afin de les garder au même potentiel tout en absorbant leurs perturbations.

La qualité du routage peut aussi influencer les performances de la carte. Les pistes de cuivre ayant une très légère résistance, on a cherché à raccourcir les pistes le plus possible avant d'entrer sur l'ADC. À l'inverse, les pistes qui traversent la carte pour fournir de l'alimentation aux différents composants pouvant faire circuler beaucoup de courant, on les a élargies pour éviter qu'elles ne chauffent. Les plans de masse sont aussi traversés par des vias à intervalle régulier afin d'éviter des éventuels effets capacitifs sur la carte.

Fabrication et validation

La validation de la carte est normalement triviale. Plusieurs personnes ont vérifié mon schéma et routage, et les différentes fonctions électroniques ont été testées individuellement sur des bread-

boards. Toutes les erreurs possibles ont donc été commises pendant la phase de prototypage, et les montages fonctionnels ont été retranscrits dans KiCad.

Nous fabriquons la carte chez JLCPCB. Ils proposent un service d'assemblage des cartes qu'ils produisent, mais pour la plupart de leurs projets, RBI ne fait que des petites séries et trouve plus économique de les assembler en interne.

Pour cela, il a fallu prendre en compte quelques contraintes, comme utiliser des footprints de composants adaptés à la soudure en surface à la main. J'ai dû aussi faire attention à laisser de l'espace entre les composants et limiter le nombre de composants sur la face arrière afin de faciliter le travail de la câbleuse. Cela implique que le PCB n'est pas aussi compact qu'il ne pourrait l'être, mais nous faisons une carte au format Europe, donc nous avons largement la place nécessaire.

J'ai dû aussi générer la documentation nécessaire pour assembler la carte, en exportant un plan de montage propre et un « bill of materials » (BOM) pour décrire quels composants sont nécessaires pour le bon fonctionnement de la carte et où les acheter.

Carte Dionysos : 8 bits / 1 MHz

Objectif

Objectif initial : créer un shield type oscilloscope. Problème :

- aucune carte Arduino n'offre un débit USB suffisant
- aucune carte STM32 n'a à la fois un ADC suffisamment rapide et un USB hi-speed

Objectif révisé : prototyper une solution Pico + ADC externe (SPI) pour résoudre un projet concret : remplacer la chaîne d'acquisition de mesures de Dionysos, l'application RBI de mesure d'écoulement diphasiques, actuellement basée sur des PicoScope.

Les signaux analogiques des sondes optiques ressemblent à des signaux TTL : - le niveau bas correspond au milieu liquide (la pointe de la sonde optique est dans l'eau) - le niveau haut correspond au milieu gazeux (la pointe de la sonde optique est dans l'air) - le passage d'une bulle sur une sonde correspond donc à un créneau dont on veut connaître : - la date par rapport au début de l'acquisition - la durée (qui permet d'évaluer la taille de la bulle) - les temps de montée et de descente (qui pourraient permettre d'évaluer la vitesse)

On cherche à qualifier ces signaux avec une résolution de 50 ns, donc une acquisition à 20 MHz.

On sort du cadre de Sciduino : aucun MCU ne peut transférer un signal à cette cadence-là. Il faudrait un contrôleur USB3, probablement associé à un FPGA.

L'idée ici est d'utiliser un MCU pour transformer le signal analogique à 20 MHz en une suite d'événements (date, durée, temps de montée/descente), avant de la transférer au PC. Une limite à 10 000 événements par seconde est raisonnable, et correspond déjà à des écoulements extrêmes.

La stack Python/QML/SciPy reste pertinente pour assurer la visualisation des résultats de mesure côté PC.

Choix du matériel

- ADC : LTCxxxx, interface SPI
- MCU : Raspberry Pi Pico 2 (rp2350)

On est à la limite de ce qu'on peut faire avec un MCU. Même avec un contrôleur cadencé à 600 MHz, ça ne laisse que 30 cycles par échantillon pour l'acquisition SPI, le traitement et le transfert des données.

Le rp2350 n'est pas le contrôleur le plus rapide du moment (150 MHz pour chacun des deux cœurs Cortex-M33, overclockable), mais on compte sur ses PIO pour assurer le pilotage de l'ADC sans solliciter les cœurs du MCU.

Les PIO se programment en assembleur, on peut donc viser une acquisition de l'ADC calée au cycle d'horloge près. Les MCU de Raspberry sont actuellement les seuls du marché à proposer des PIO.

Environnement de développement

- Arduino IDE/CLI ? possible (il y a un support officiel rp2040) mais pas optimisé en perf
- API C de Raspberry ?
- Rust Embedded ?

Les performances étant critiques, on cherche à avoir le moins d'abstraction possible pour exploiter le MCU au mieux de ses capacités.

L'API C serait le choix le plus évident, mais l'approche Rust Embedded semble pertinente : - une bibliothèque Rust standard, décrivant les traits à implémenter ; - une bibliothèque par classe de MCU, décrivant l'implémentation de ces traits — il y en a une pour STM32 et une pour Raspberry, entre autres.

Pour RBI, Rust Embedded pourrait donc être une solution complémentaire à Sciduino pour les projets critiques en performances, tout en conservant une couche d'abstraction « gratuite » pour ne pas être dépendant d'une architecture matérielle.

Mise en œuvre

TODO

Perspectives

TODO

Conclusion

Sciduino Nano

Le combo Sciduino + empreinte Nano répond bien aux besoins RBI tout en garantissant une maintenabilité à long terme :

- Arduino IDE/CLI est facile à utiliser et suffisamment performant ;
- le format Nano permet un large choix de MCU : AVR, ARM (dont STM32 et Raspberry), Xtensa, RISC-V...

- Python/QML (Pyside) est une alternative sérieuse à LabVIEW, compatible avec des outils moderne de gestion de code (versionnement, analyse statique), et ouvre la possibilité de fonctionner sur un SBC type Raspberry Pi;
- l'interface USB+SCPI est une bonne abstraction pour simplifier le développement côté PC.

L'approche Nano facilite à la fois le développement (breadboard) et la conception électronique (PCB). RBI ne produisant rien en série, passer le MCU directement sur le PCB n'a pas grand intérêt : un socket Nano suffit.

Rust Embedded

Une voie encore en développement mais prometteuse : - embedded-hal fournit une excellente abstraction matérielle ; - RTIC gère très bien la concurrence (mais pas encore le multi-cœurs) ; - les puces ARM et RISC-V sont supportées ; - les performances sont équivalentes aux API natives ; - l'écosystème Rust est bien plus avancé que celui de C/C++.

Rust est un langage élitiste, et Rust Embedded est nettement plus complexe à prendre en main qu'Arduino ; mais pour des applications critiques, c'est une alternative plus saine que C.

ARM Cortex-M

C'est l'architecture MCU de référence, qui couvre tous les besoins actuels de RBI. Les puces AVR suffisent pour beaucoup d'applications mais n'offrent aucun avantage évident, y compris pour la consommation ou le prix.

Les MCU de Raspberry Pi, rp2040 et rp2350, basés sur des double-cœurs Cortex M0+ et M33 respectivement, sortent du lot avec un ratio performances/coût *très* compétitif.

Il y a beaucoup de développements autour de RISC-V (Arduino et Raspberry Pi participent à la gouvernance, entre autres), et cette architecture pourrait s'avérer très intéressante pour des besoins spécifiques à l'avenir ; mais il n'y a pas encore de cas d'usage évident pour RBI.

Raspberry Pi RP2040

Le RP2040 aurait convenu à *tous* les projets RBI des 10 dernières années. Il fonctionne très bien avec l'IDE Arduino et permet d'utiliser des environnements alternatifs :

- MicroPython, pour faciliter le développement des bancs de test RBI ;
- Rust Embedded, pour développer des applications critiques en performance.

Comme Arduino IDE, ces environnements sont compatibles avec un assez large choix de MCU, et fournissent un niveau d'abstraction logicielle apprécié pour la pérennité des développements.

Les PIO (E/S programmables) ouvrent des possibilités nouvelles :

- pour les applications classiques, en permettant d'implémenter des ports série supplémentaires ;
- pour les applications critiques, en assurant des communications bas niveau rapides (SPI vers DMA, notamment) ;

... et ce, sans le moindre coût de calcul pour les deux cœurs Cortex-M0+.

L’empreinte Raspberry Pi Pico est restée la même entre les deux versions de la carte, et vu sa popularité, elle pourrait devenir un standard solide ; mais *pour l’instant*, on lui préfère l’empreinte Nano et le support Arduino natif.

STM32

On n’a pas eu de cas où une carte Nucleo aurait permis de dépasser les limitations du RP2040. L’écosystème STM32 est cohérent et compatible avec la stack Sciduino, mais il correspond moins bien aux besoins actuels de RBI que les alternatives Arduino ou Raspberry Pi.

Si la situation évoluait, par ex. avec la sortie d’une carte Nucleo32 à hautes performances, les projets RBI basés sur un slot Nano pourraient facilement être mis à jour pour en profiter — sans retoucher le PCB.

Résilience

[TODO]

Remerciements

Merci à toute l’équipe RBI pour l’incroyable environnement de travail dont j’ai pu profiter. Je voudrais remercier plus particulièrement :

- Hugo Vernier-Lambert pour sa disponibilité de tous les instants et son expertise KiCad, sans lesquelles rien n’aurait été possible ;
- Guy Zanardi alias «le Chef», ancien cadre RBI et actuellement prestataire, pour m’avoir transmis les notions fondamentales de design électronique qui me faisaient cruellement défaut — et, plus fondamentalement, pour m’avoir fait aimer cette discipline ;
- Aurélien Rosset pour sa confiance.

J’ai plus appris en 4 mois de stage que pendant tout mon cycle ingénieur : de la théorie à la pratique il y a un monde, et l’équipe m’a bien aidé à monter en compétence. Moi qui doutais de mon orientation, je suis désormais certain d’avoir choisi la bonne voie en visant la double compétence informatique et électronique.

J’espère trouver un employeur où l’ambiance est aussi saine et où les projets sont aussi intéressants. Immense merci à RBI !