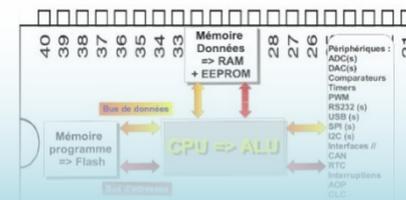


Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

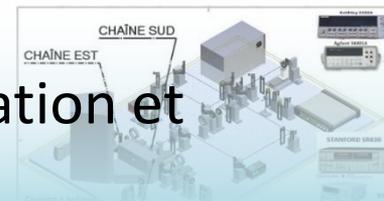
<https://occitanie.electroniciens.cnrs.fr/>

<https://www.electroniciens.cnrs.fr/>

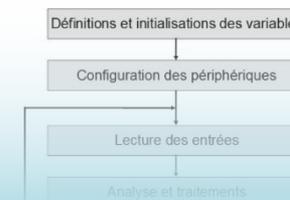
I. Introduction générale



II. Exemples d'applications pour l'instrumentation et dimensionnement



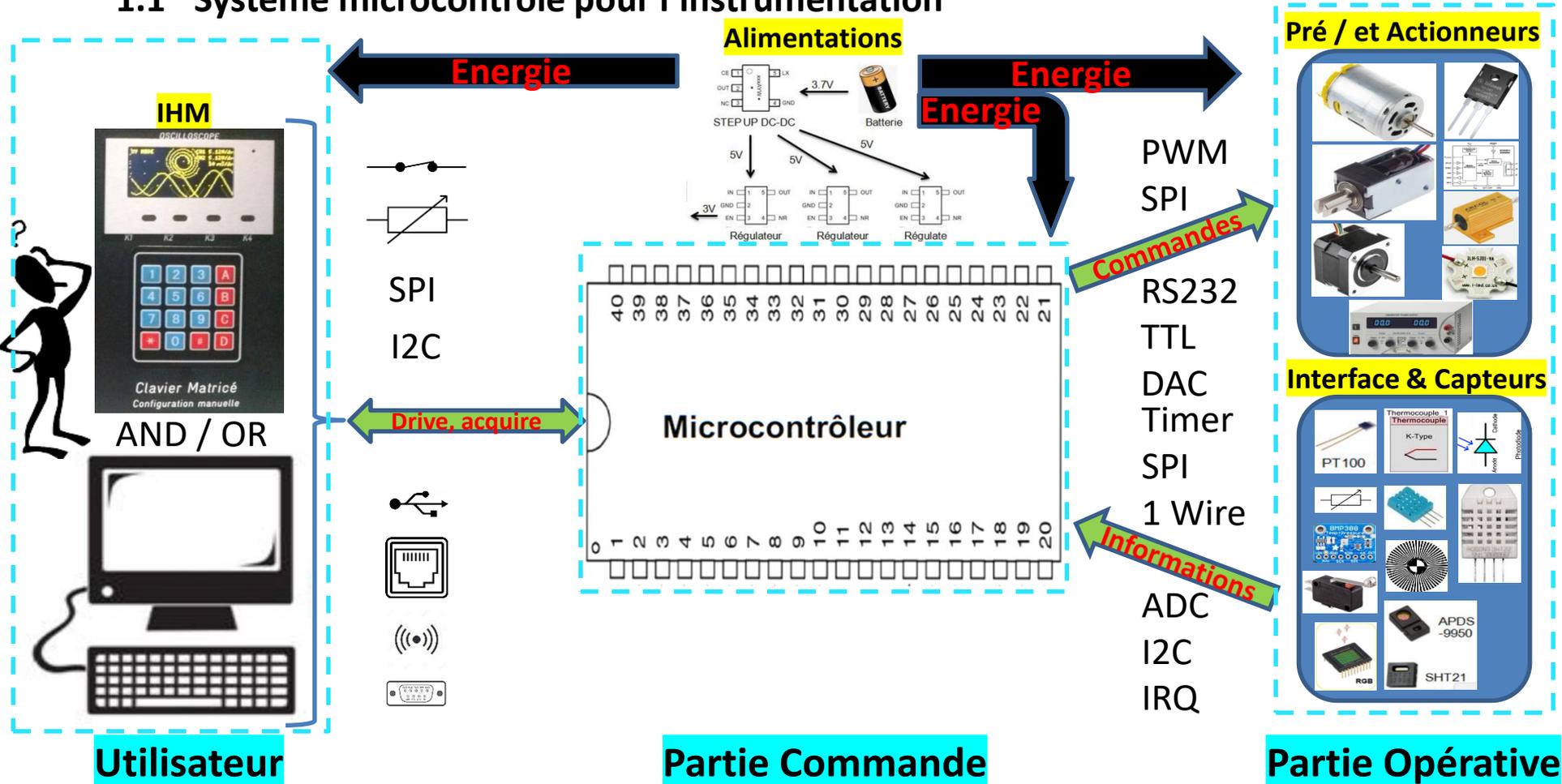
III. Programmation en C de microcontrôleurs



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.1 Système microcontrôlé pour l'instrumentation



Utilisateur

Partie Commande

Partie Opérative

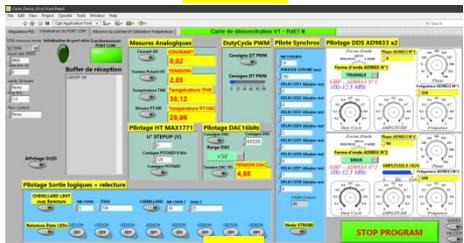
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

<https://gitlab.in2p3.fr/RdEI/formations/anf-mcu-instrum>

1.1 Système microcontrôlé pour l'instrumentation – Carte DEMO V1

IHM



OR



AND / OR

Drive, acquire



Utilisateur

Alimentations => +5V &/| +12V

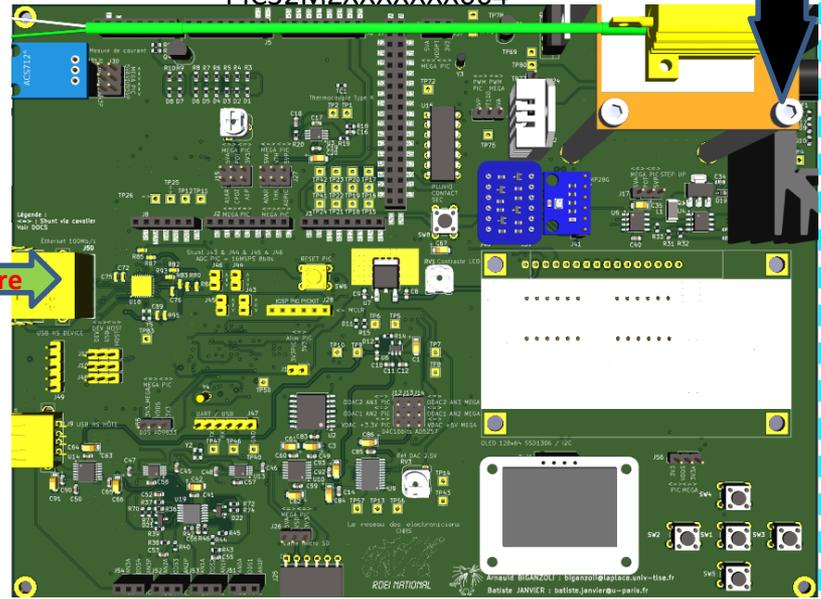
Energie

Energie

+3.3, 5V, -5V

Microcontrôleurs :

- Carte ARDUINO MEGA
- Ou
- PIC32MZXXXXXXXX064



Partie Commande

PWM

SPI

Commandes

RS232

TTL

DAC

Timer

SPI

1 Wire

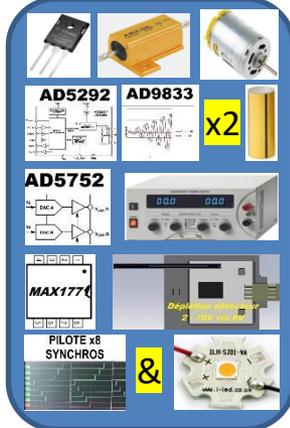
Informations

ADC

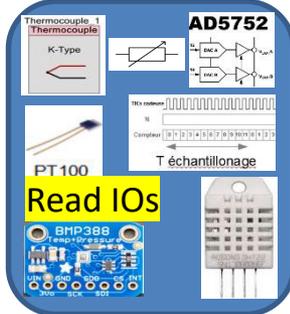
I2C

IRQ

Pré / et Actionneurs



Interface & Capteurs



Partie Opérative

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

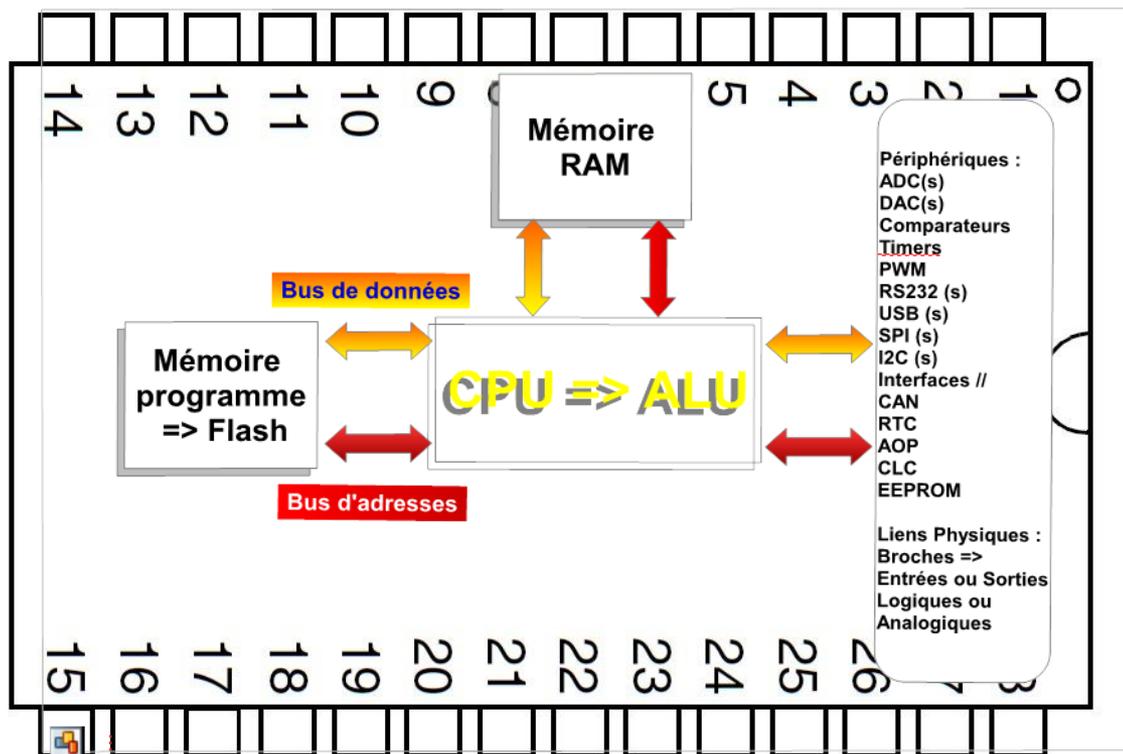
I. Introduction générale

1.2 Définition et architecture simplifiée d'un microcontrôleur

- UAL / ALU
- Mémoires
- Bus d'adressage
- Bus de données
- Périphériques
- Interface physique

Architecture : HARVARD / Von NEUMANN?

Jeux d'instructions : CISC / RISC?



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.2 UAL, Unité Arithmétique et Logique :

Le rôle d'un processeur est soit de faire des calculs, soit de faire des transferts de données avec la mémoire ou les périphériques.

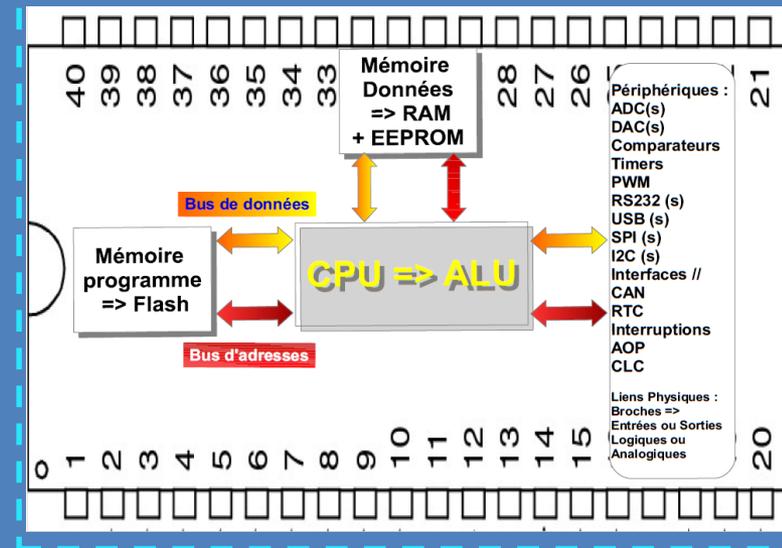
Les calculs sont réalisés au sein de l'Unité Arithmétique et Logique (UAL ou ALU), afin de traiter des opérations :

Arithmétiques : addition / soustraction / multiplication / division

Logiques : AND / OR / NAND / NOR / XOR / ...

L'UAL regroupe donc des composants réalisant ces opérations en permanence.

La sélection de l'opération souhaitée se fait avec un multiplexeur, pour aiguiller le résultat du bon opérateur.



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.2 UAL

Les bits d'état NZVC indiquent comment s'est passée l'opération :

N: résultat Négatif

Z: __résultat __égal à Zéro

V: : Débordement signé : oVerflow

C: : Débordement non signé

(retenue) : Carry

l'analyse de ces bits d'état permet de réaliser des tests pour comparer des valeurs dans le cas des instructions de branchement.

1 Unité Arithmétique et Logique

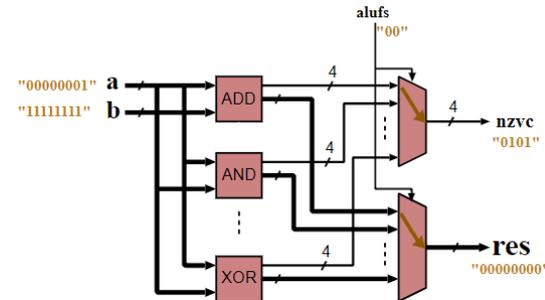
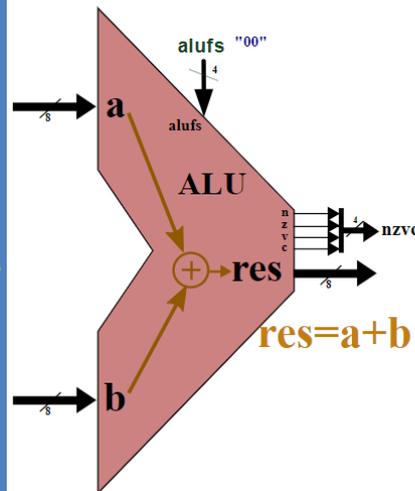
Le rôle d'un processeur est soit de faire des calculs, soit de faire des transferts de données avec la mémoire ou les périphériques.

Les calculs sont réalisés au sein de l'Unité Arithmétique et Logique (UAL ou ALU), afin de traiter des opérations :

- **Arithmétiques** : addition / soustraction / multiplication / division
- **Logiques** : and / or / nand / nor / xor / ...

L'UAL regroupe donc des composants réalisant ces opérations en permanence.

La sélection de l'opération souhaitée se fait avec un **multiplexeur**, pour aiguiller le résultat du bon opérateur.



Vincent KERHOAS, Professeur agrégé : https://www.enib.fr/~kerhoas/electronique_numerique_architecture.html

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.3 Mémoires / programme / interruptions

**Mémoire
programme
=> Flash**

- **ROM / mémoire morte : garde l'information même si coupure des alimentations => stockage du programme microcontrôleur**

**Mémoire
Données
=> RAM**

- **RAM / mémoire vive : information perdue si coupure des alimentations => stockage des variables et des calculs durant l'exécution du programme microcontrôleur**

**Mémoire
EEPROM**

- **ROM / mémoire morte : garde l'information même si coupure des alimentations => stockage des données importantes obtenues durant un processus d'automatisation (coeff calib, mode de fonctionnement, menu etc.)**

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.3 Mémoires

	Capacité	Temps en écriture	Tension de rétention	Temps de rétention	Nombre de cycles d'écriture
Flash	qq o – 512 Mo	qq ns	NC	Dizaines années	q milliers
RAM	qq o – 125 Mo	qq ns	> 1,5V	NC	> millions
EEPROM	qq o – 16 Mo	qq ms	NC	Dizaines années	> dizaines milliers

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.3 Exécution programme simplifiée PIC18F4550

Niveau de la pile, stocke temporairement des données

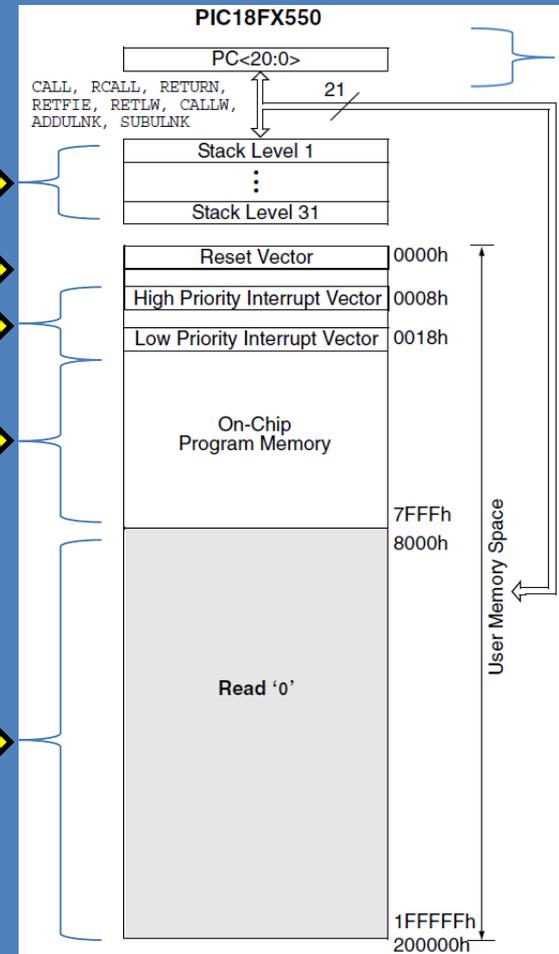
Stocke l'adresse début programme ou instruction en cours

2 adresses mémoires réservées aux 2 vecteurs d'interruption

Code programme stocké dans la mémoire Flash

Adresse mémoire Flash mais non implémentée
Puisque capacité = 32 Ko pour 2Mo adressable

MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p57 à p65



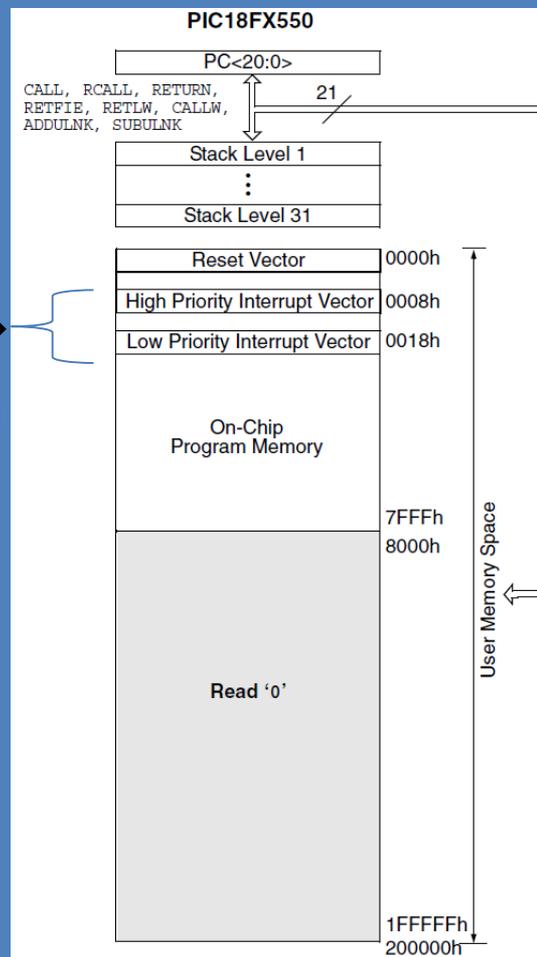
Program Counter = 3 registres qui contiennent
adresse instruction en cours dans la mémoire
du programme

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.3 Interruptions

- 2 adresses mémoires réservées aux 2 vecteurs d'interruption
- Plusieurs sources d'événements d'interruption externes (INTX, PORTB)
- Autres sources d'interruption multiples => ADC, EUSART, Timers, SPI, USB, etc.

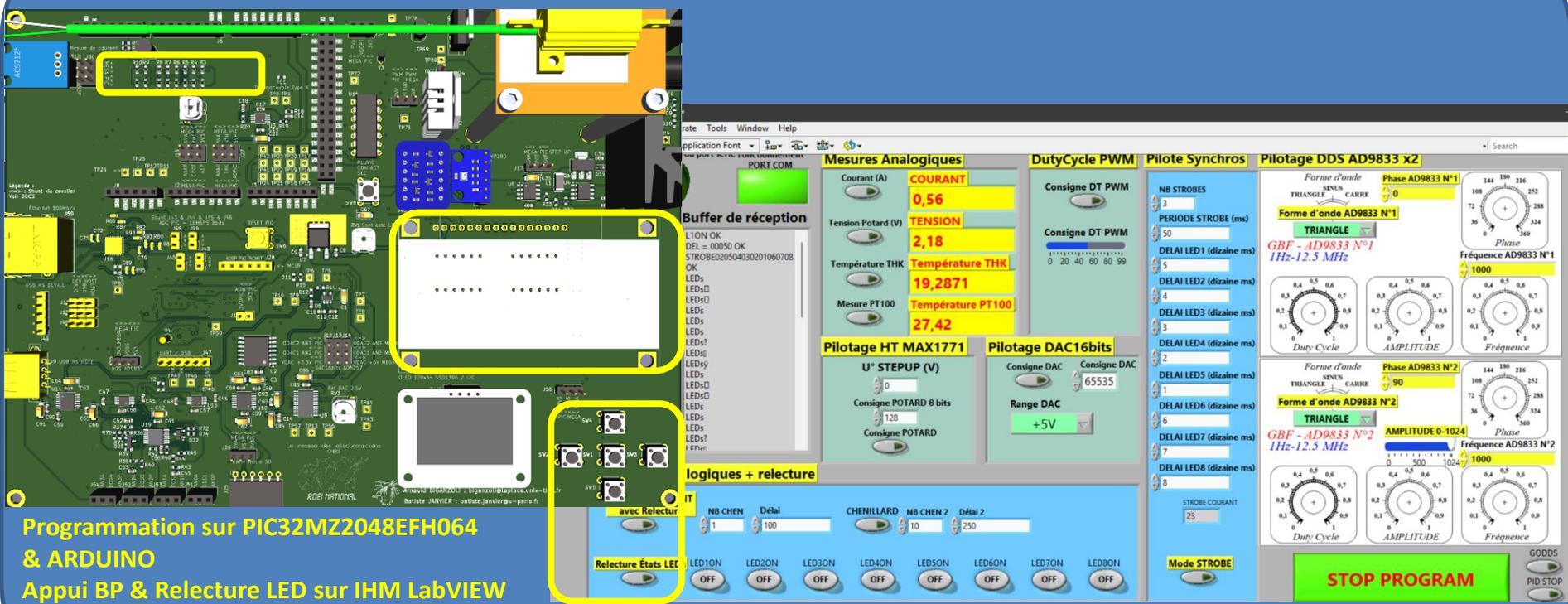


MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p57 à p65

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.3 Mémoires / interruptions / Atelier de démonstration



Buffer de réception

```

L'ION OK
DEL = 00050 OK
STROBE020504030201060708
OK
LED1
LED2
LED3
LED4
LED5
LED6
LED7
LED8
LED9
LED10
LED11
LED12
LED13
LED14
LED15
LED16
LED17
LED18
LED19
LED20
LED21
LED22
LED23
LED24
LED25
LED26
LED27
LED28
LED29
LED30
LED31
LED32
LED33
LED34
LED35
LED36
LED37
LED38
LED39
LED40
LED41
LED42
LED43
LED44
LED45
LED46
LED47
LED48
LED49
LED50
LED51
LED52
LED53
LED54
LED55
LED56
LED57
LED58
LED59
LED60
LED61
LED62
LED63
LED64
LED65
LED66
LED67
LED68
LED69
LED70
LED71
LED72
LED73
LED74
LED75
LED76
LED77
LED78
LED79
LED80
LED81
LED82
LED83
LED84
LED85
LED86
LED87
LED88
LED89
LED90
LED91
LED92
LED93
LED94
LED95
LED96
LED97
LED98
LED99
LED100
                
```

Mesures Analogiques

Courant (A) **COURANT**
0,56

Tension Potard (V) **TENSION**
2,18

Température THK **Température THK**
19,2871

Mesure PT100 **Température PT100**
27,42

DutyCycle PWM

Consigne DT PWM

Consigne DT PWM

Pilote Synchron

NB STROBES

PERIODE STROBE (ms)

DELAI LED1 (dizaine ms)

DELAI LED2 (dizaine ms)

DELAI LED3 (dizaine ms)

DELAI LED4 (dizaine ms)

DELAI LED5 (dizaine ms)

DELAI LED6 (dizaine ms)

DELAI LED7 (dizaine ms)

DELAI LED8 (dizaine ms)

STROBE COURANT

Mode STROBE

Pilotage DDS AD9833 x2

Forme d'onde

Phase AD9833 N°1

Forme d'onde AD9833 N°1

GBF - AD9833 N°1

Fréquence AD9833 N°1

Forme d'onde

Phase AD9833 N°2

Forme d'onde AD9833 N°2

GBF - AD9833 N°2

Fréquence AD9833 N°2

logiques + relecture

NB CHEN Délai

CHENILLARD NB CHEN 2 Délai 2

avec Relecture

Relecture États LEC

LED1ON LED2ON LED3ON LED4ON LED5ON LED6ON LED7ON LED8ON

Programmation sur PIC32M2048EFH064 & ARDUINO
Appui BP & Relecture LED sur IHM LabVIEW
+ Action IHM manuelle ARDUINO

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.4 Oscillateur principal / Cadencement - horloge du processeur et périphériques

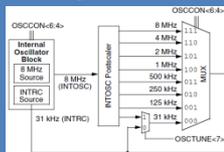
- Oscillateur interne (intégré dans le microcontrôleur selon les références) configuré en oscillateur principal pour le cadencement du processeur et périphériques
- Oscillateur externe câblé sur l'entrée oscillateur principal pour le cadencement processeur et des périphériques
- Quartz externe câblé sur les entrées oscillateur principal pour le cadencement du processeur et des périphériques

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

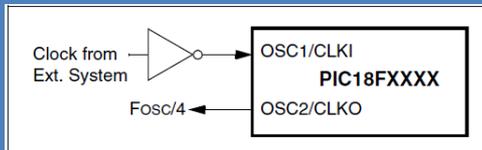
I. Introduction générale

1.4 Oscillateur principal / Cadencement du processeur et des périphériques

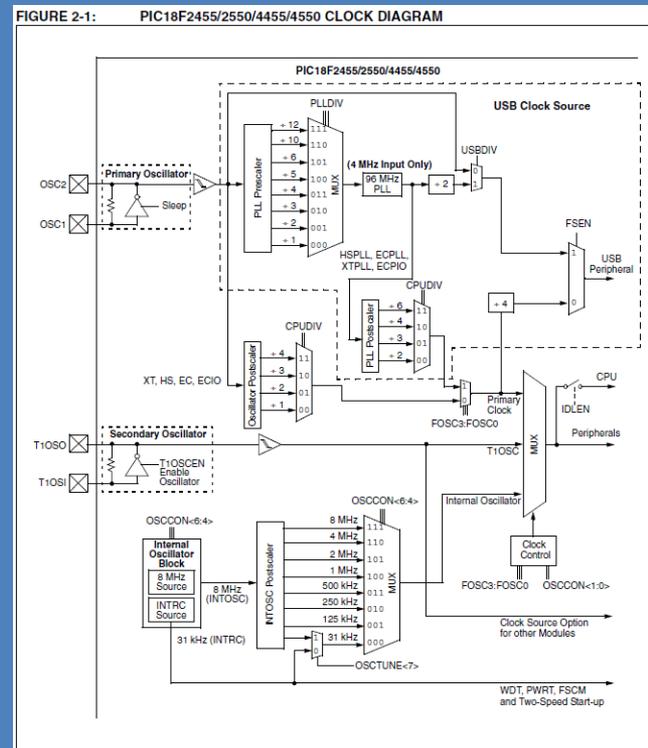
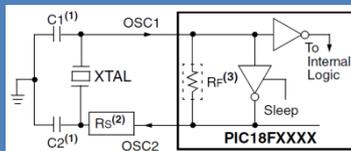
- Oscillateur interne => modes INTHS, INTXT, INTIO, INTCKO



- Oscillateur externe => modes EC, ECIO, ECPLL, ECPIO



- Quartz externe => modes XT, XTPLL, HS ou HSPLL



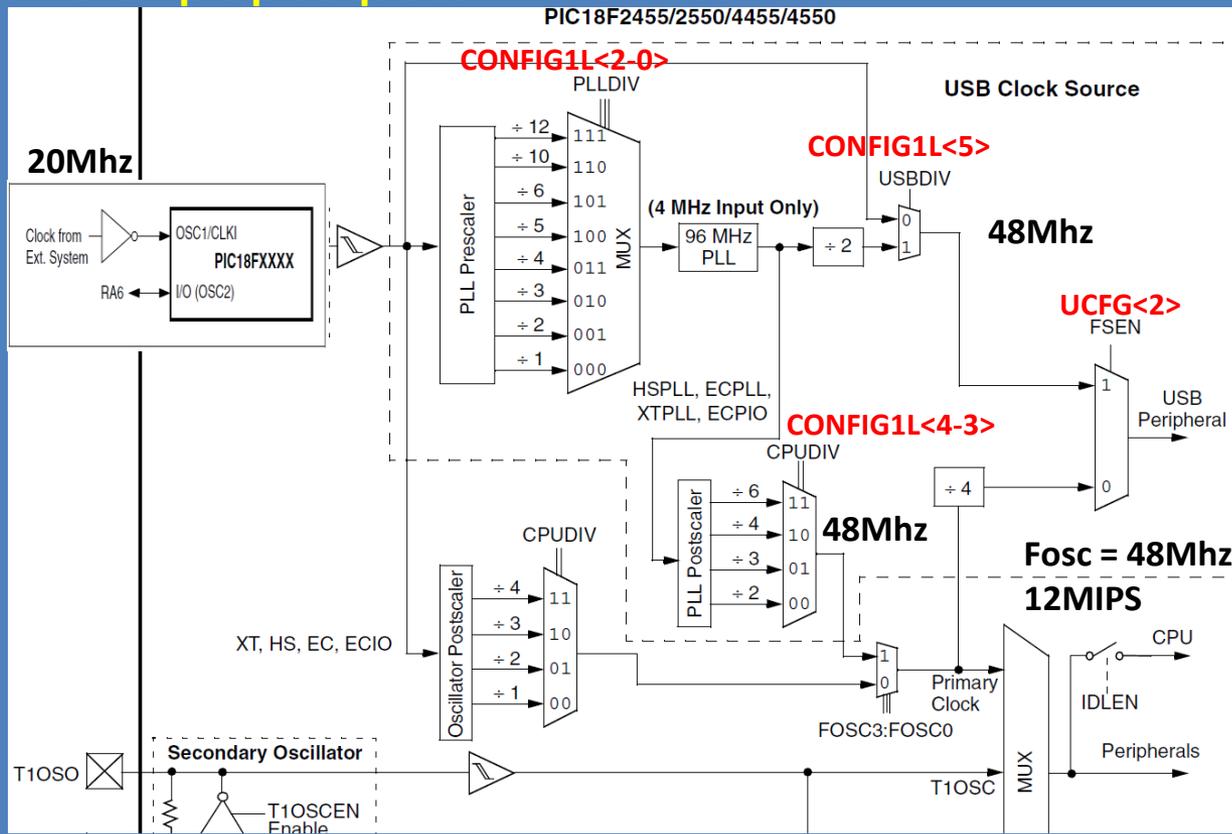
MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p24, p25, p26

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.4 Oscillateur principal : exemple pratique sur PIC18F4550

- Oscillateur 20Mhz
 - Mode ECPIO => CONFIG1H<3-0> 0110
 - PLLDIV = /5 => CONFIG1L<2-0> 100
 - CPUDIV = /2 CONFIG1L<4-3> 00
 - USBDIV = /2 CONFIG1L<5> 1
 - UCFG<2> = 1
- RISC & 1 instruction = Fosc / 4



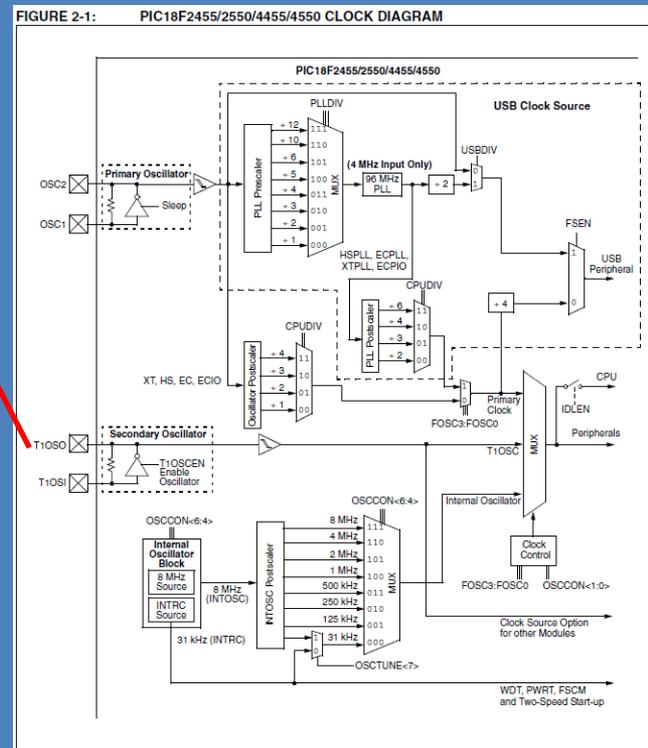
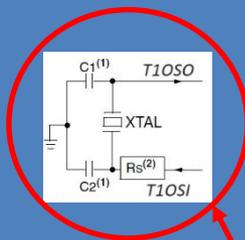
MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p24, p287, p288

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.4 Oscillateur secondaire / fonctionnalités

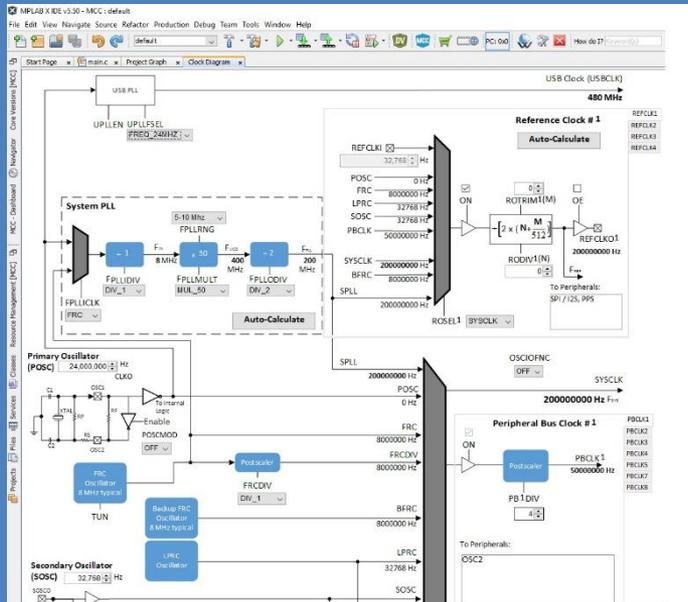
- Quartz externe
- Pourquoi faire => cadencer le temps / Real Time Clock / RTC
=> tâches en parallèle



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.4 Oscillateurs / Atelier de démonstration / outils de configuration



```

// *****
#pragma config DEBUG = OFF
#pragma config JTARGEN = OFF
#pragma config ICESEL = ICS_PGx1
#pragma config TRCEN = OFF
#pragma config BOOTISA = MIPS32
#pragma config FECCON = OFF_UNLOCKED
#pragma config FSLEEP = OFF
#pragma config DBGEPEN = PG_ALL
#pragma config SWCLA = MCR_NORM
#pragma config SOSCGAIN = GAIN_LEVEL_3
#pragma config SOSBOOST = ON
#pragma config POSCGAIN = GAIN_LEVEL_3
#pragma config POSBOOST = ON
#pragma config EJTARGEN = NORMAL
#pragma config CP = OFF

// *****
#pragma config FWSOC = SPLL
#pragma config DMINTV = WIN_127_128
#pragma config FWSOCEN = ON
#pragma config ISO = OFF
#pragma config POSCHED = SE
#pragma config OSCIOFNC = OFF
#pragma config PCKEN = OFF
#pragma config WDTPS = PS1048576
#pragma config WDTSPGM = STOP
#pragma config FWITEN = OFF
#pragma config WEMIS = NORMAL
#pragma config FWSWENSE = WINSZ_25
#pragma config DMICNT = DM11
#pragma config FMTEN = OFF

// *****
#pragma config FLLDIV = DIV_1
#pragma config FLLRNG = RANGE_5_10_MHZ
#pragma config FLLCLK = PLL_FRC
#pragma config FLLMULT = MUL_50
#pragma config FLLDIV2 = DIV_2
#pragma config UPLLSEL = FREQ_24MHZ

// *****
#pragma config USERID = 0xffff
#pragma config PMIEN = ON
#pragma config FETHIO = ON
#pragma config RGLWAY = ON
#pragma config PLLLWAY = ON
#pragma config YOLLWAY = ON
#pragma config FUSBDIO = ON

// *****
#pragma config TSOQ = 0xffff
#pragma config CSQ = 0x0

```

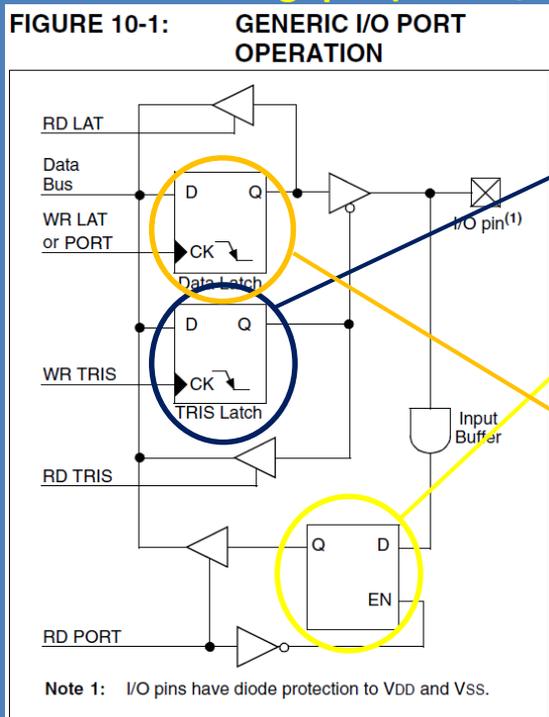
Sur PIC32M2048EFH064 => datasheet « Section N°8 » p165 - 184 et MCC
 Sur ARDUINO => fonctions Automatiques

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.5 Entrées - Sorties

- Configuration matérielle du port B d'un microcontrôleur PIC18F en entrée ou sortie logique (entrée/sortie tout ou rien => TOR)



Configuration de la direction du port B (registre $TRISB = 0xFF$ => toute les broches sont en entrées)

Lecture des tensions présentes sur les broches du port B (Variable = « $PORTB = 1$ octet = 8 bits)

Si $TRISB = 0x00$ => toutes le broches sont en sortie et nous forcerons leur état logique via le registre $LATB$ => Le registre LAT est utilisé pour écrire des données sur les broches configurées en sortie ($TRISx=0$).

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.5 Entrées - Sorties / Atelier de démonstration

Pin Number	Pin ID	Voltage Tolerance	Custom Name	Function	Direction (TRIS)	Latsh (LAT)	Open Drain (ODC)	Mode (MODE)	Change Notification	Pull Up (CWP)	Pull Down (CPD)	Slew Rate
1	RES		DIL	GPO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
2	RES		DIL	GPO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
3	RE7		DIL	GPO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
4	RG6		RSDT	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
5	RG7		LEPT	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
6	RG8		SBL	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
7	VSS				n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
8	VDD				n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
9	MCLR	SV			n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
10	RG9		INT1	INT1	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
11	RES		LP	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
12	RB4		DOWN	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
13	RB3		AND	AND	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Analog	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
14	RB2		AND	AND	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Analog	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
15	RB1		AN1	AN1	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Analog	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
16	RB0		Available	Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Analog	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
17	RB6		PGE2	Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
18	RE7		PGE2	Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
19	AVDD				n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
20	AVSS				n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
21	RB8		L1	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
22	RB9		L2	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
23	RB10		L3	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
24	RB11		L4	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
25	VSS				n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
26	VDD				n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
27	RB12		L5	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
28	RB13		L6	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
28	RB14		L7	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
30	RE15		L8	GPO	In	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
31	RC12		OSC1	OSC1	n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
32	RC15		SS8	GPO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate
33	VBUS	SV			n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Digital	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fastest Edge Rate

```

void initPins ()
{
    pinMode(45, INPUT_PULLUP);
    pinMode(SS2, OUTPUT); // mettre en IN
    digitalWrite(SS2,HIGH); // A commenter
    //pinMode(T5, INPUT); // A commenter
    pinMode(12, OUTPUT);
    digitalWrite(12, LOW);
    pinMode(chipselect, OUTPUT);
    digitalWrite(chipselect, LOW);
    pinMode(2, OUTPUT);
    pinMode(3, OUTPUT);
    pinMode(4, OUTPUT);
    pinMode(5, OUTPUT);
    pinMode(6, OUTPUT);
    pinMode(7, OUTPUT);
    pinMode(8, OUTPUT);
    pinMode(9, OUTPUT);
    pinMode(10, OUTPUT);
    pinMode(SS3, OUTPUT);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(SS3, HIGH);
    pinMode(SI, OUTPUT);
    pinMode(SCK, OUTPUT);
}
    
```

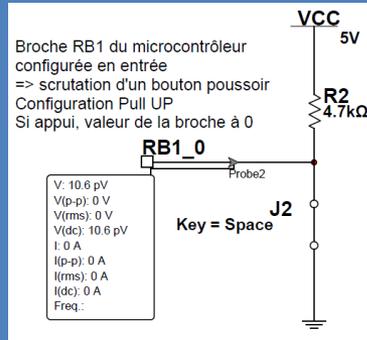
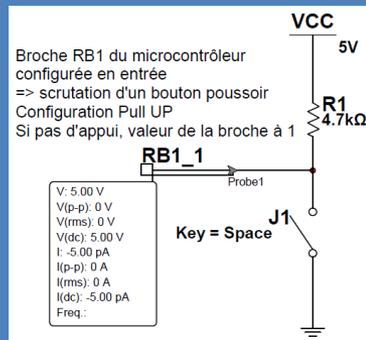
Sur PIC32MZ2048EFH064 => datasheet « Section N°8 » p165 - 184 et MCC
 Sur ARDUINO, fonctions Automatiques

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

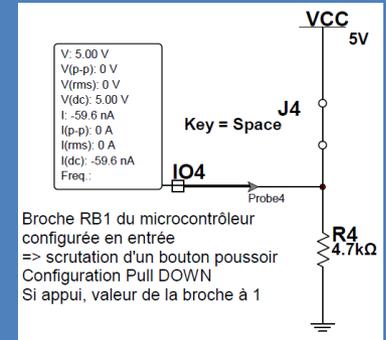
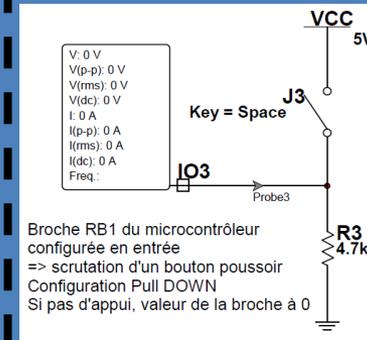
I. Introduction générale

1.5 Entrées - Sorties

- Entrées / Sorties Tout Ou Rien (TOR => 0 ou 5V, 0 ou 3,3V etc.)
 - Exemple du câblage d'un bouton poussoir (broche RB1 PIC18F configurée en entrée = peut être lue)



**Configuration Pull UP
utilisée majoritairement**



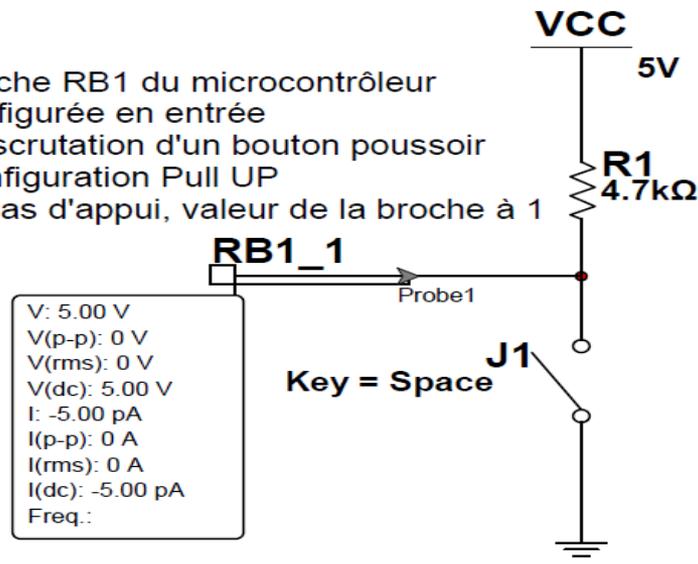
**Configuration Pull DOWN
peu utilisée**

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

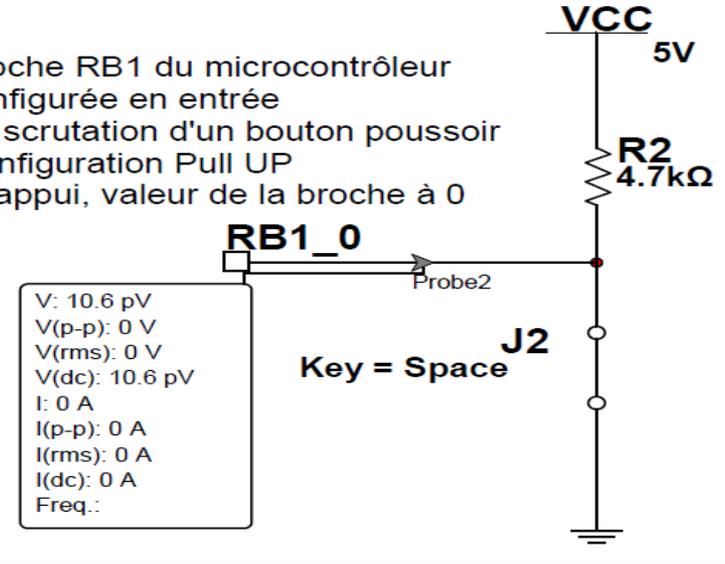
I. Introduction générale

1.5 Entrées - Sorties

Broche RB1 du microcontrôleur configurée en entrée
 => scrutation d'un bouton poussoir
 Configuration Pull UP
 Si pas d'appui, valeur de la broche à 1



Broche RB1 du microcontrôleur configurée en entrée
 => scrutation d'un bouton poussoir
 Configuration Pull UP
 Si appui, valeur de la broche à 0

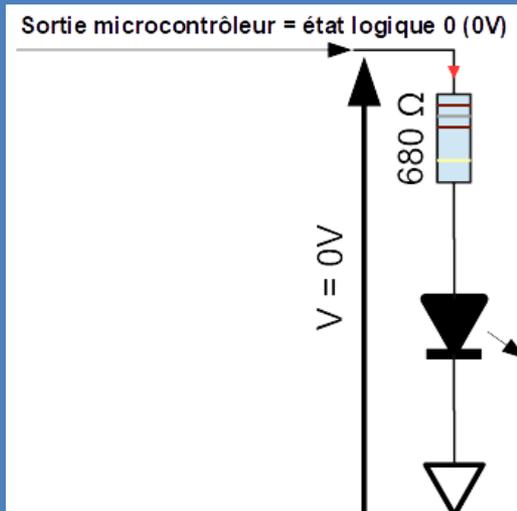


Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

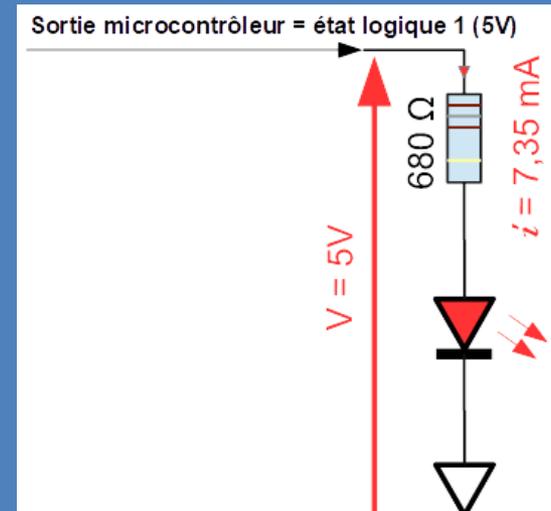
I. Introduction générale

1.5 Entrées - Sorties

- Exemple du câblage d'une LED sur une broche configurée en sortie
- Attention, le courant maximum pouvant être débité par les broches est limité (200mA pour le PIC18F4550)



Sortie Logique 0



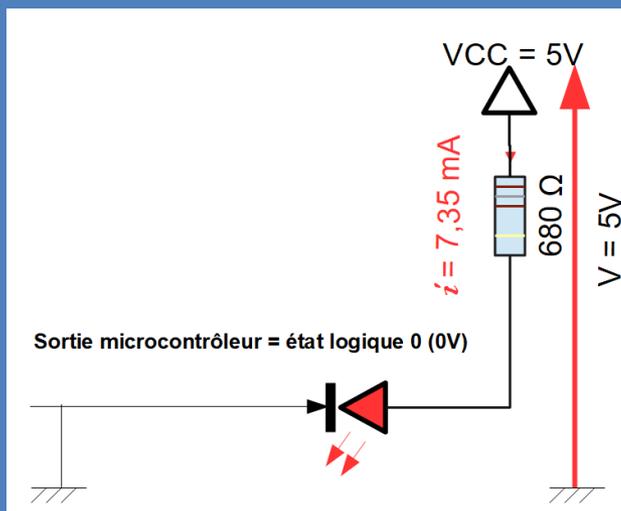
Sortie logique à 1

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

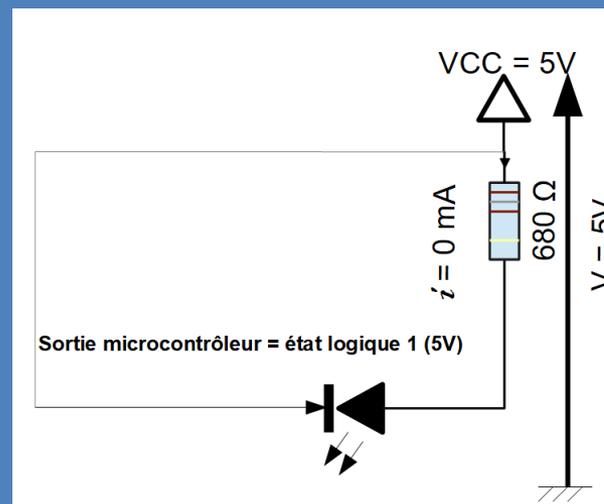
I. Introduction générale

1.5 Entrées - Sorties

- Exemple du câblage d'une LED sur une broche configurée en sortie
- Attention, le courant maximum pouvant être débité par les broches est limité (200mA pour le PIC18F4550, utiliser un driver de ligne ou un réseau de transistors)



Sortie Logique à 0

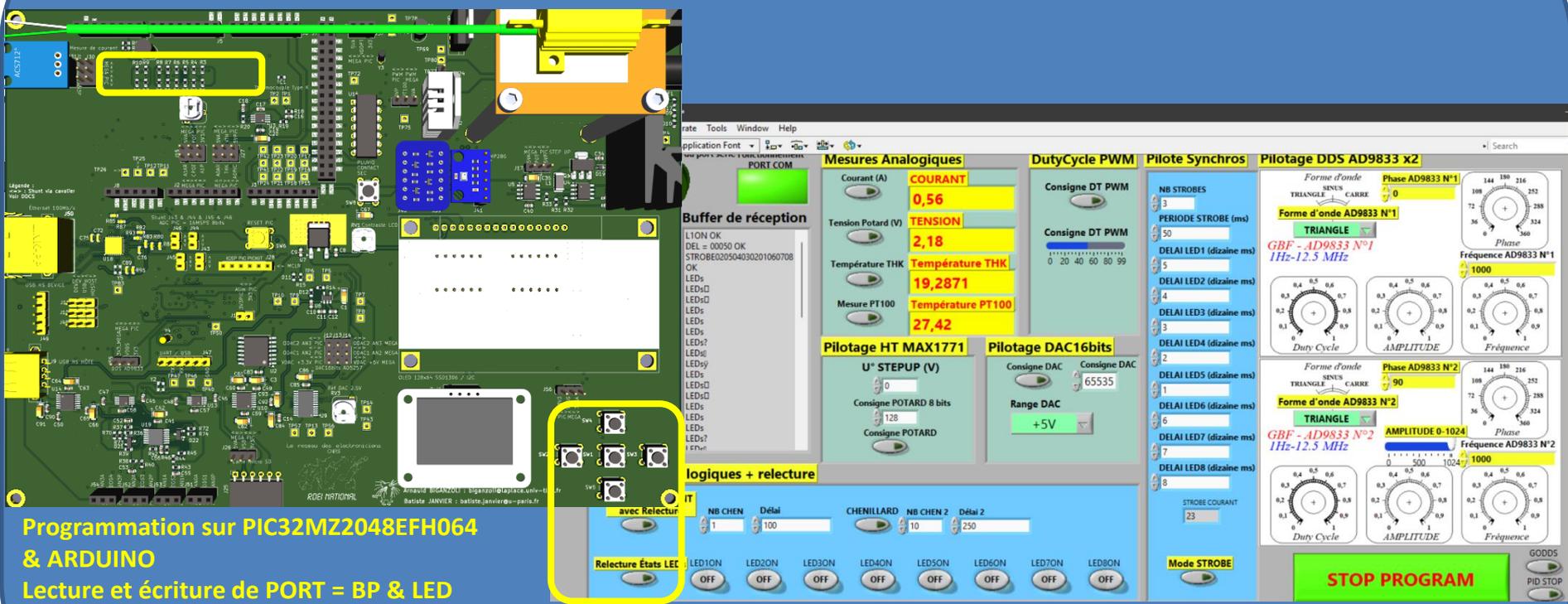


Sortie logique à 1

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.5 Entrées - Sorties / Atelier de démonstration



Programmation sur PIC32MZ2048EFH064 & ARDUINO
Lecture et écriture de PORT = BP & LED

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

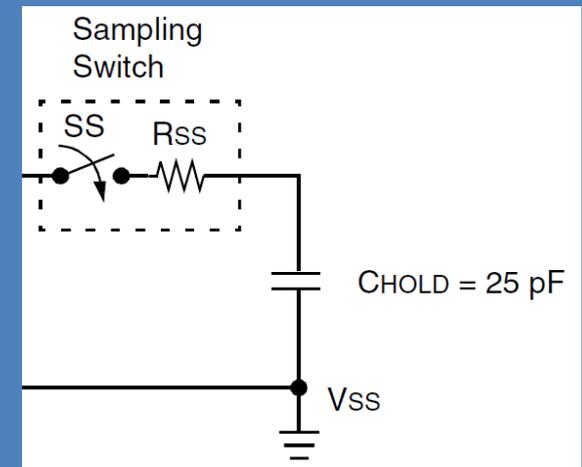
1.6 Convertisseur Analogique Numérique (CAN) par approximations successives

- Broche de mesure de la tension configurée en entrée analogique et aiguillée vers le CAN microcontrôleur (écriture des registres du périphérique TRISX, ADCON0, ADCON1, ADCON2 pour le PIC18F4550)
- Temps d'acquisition $\geq 1,4\mu\text{s}$ ($T_{acq} = T_{amp} + T_c + T_{coff}$ à 25°C)
- Temps de conversion $\geq 11 \times 0,7\mu\text{s}$
- Temps de décharge $\geq 0,2\mu\text{s}$

TABLE 28-29: A/D CONVERSION REQUIREMENTS

Param No.	Symbol	Characteristic		Min	Max	Units	Conditions
130	TAD	A/D Clock Period	PIC18FXXXX	0.7	25.0 ⁽¹⁾	μs	TOSC based, $V_{REF} \geq 3.0\text{V}$
			PIC18LFXXXX	1.4	25.0 ⁽¹⁾	μs	$V_{DD} = 2.0\text{V}$, TOSC based, V_{REF} full range
			PIC18FXXXX	TBD	1	μs	A/D RC mode
			PIC18LFXXXX	TBD	3	μs	$V_{DD} = 2.0\text{V}$, A/D RC mode
131	TCNV	Conversion Time (not including acquisition time) ⁽²⁾		11	12	TAD	
132	TACQ	Acquisition Time ⁽³⁾		1.4	—	μs	-40°C to $+85^\circ\text{C}$
				TBD	—	μs	$0^\circ\text{C} \leq t_o \leq +85^\circ\text{C}$
135	TSWC	Switching Time from Convert \rightarrow Sample		—	(Note 4)		
137	TDIS	Discharge Time		0.2	—	μs	

MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p259 à p267, p398

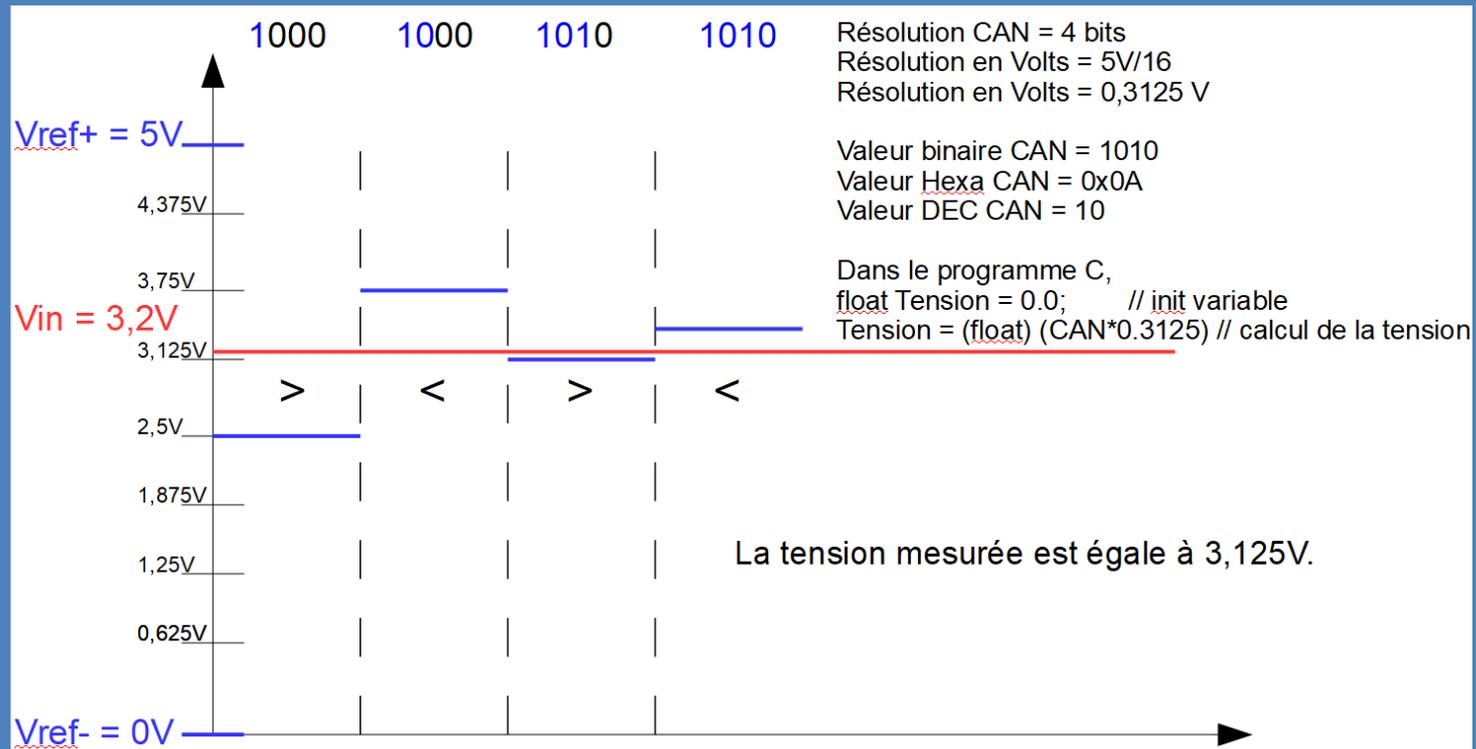


Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.6 Convertisseur Analogique Numérique (CAN) par approximations successives

- Exemple pratique



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.6 Convertisseur Analogique Numérique / Atelier de démonstration

Mesures Analogiques

- Courant (A) **COURANT** 0,56
- Tension Potard (V) **TENSION** 2,18
- Température THK **Température THK** 19,2871
- Mesure PT100 **Température PT100** 27,42

Pilote DDS AD9833 x2

- Forme d'onde SINES
- Phase AD9833 N°1 0
- Forme d'onde AD9833 N°1 TRIANGLE
- GBF - AD9833 N°1 1Hz-12.5 MHz
- Fréquence AD9833 N°1 1000

logiques + relecture

- NB CHEN 1
- Délai 100
- CHENILLARD
- NB CHEN 2 10
- Délai 2 250

Relecture États LEDs

- LED1ON OFF
- LED2ON OFF
- LED3ON OFF
- LED4ON OFF
- LED5ON OFF
- LED6ON OFF
- LED7ON OFF
- LED8ON OFF

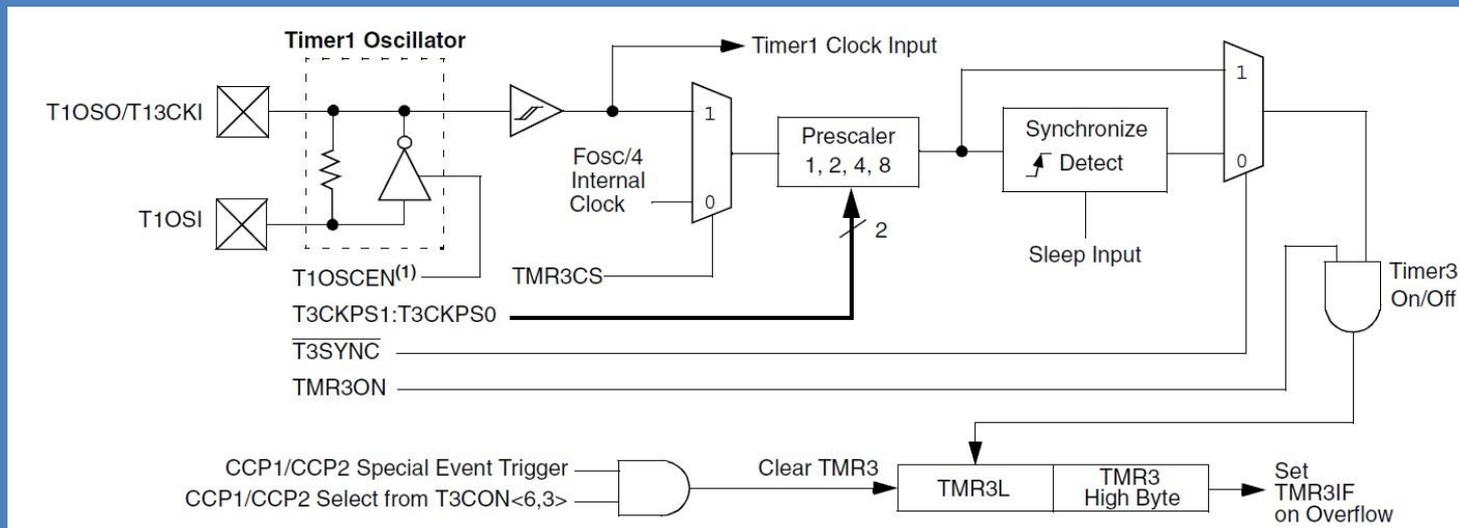
Programmation sur PIC32MZ2048EFH064
& Programmation ARDUINO
CAN 10 ou 12 bits tension potentiomètre
sur IHM LabVIEW
Démonstration Interleaving PIC32MZ (16MSPS – 8bits)

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.7 Timers - Compteurs

- **Timer / Compteur = comptage d'un nombre de pulses (horloge, appui bouton, pulses TTL en sortie PM etc.) sans affecter le déroulement du programme principal**
- **Chaque pulse incrémente un registre de comptage**
- **Le registre de comptage peut déclencher une interruption ou être lu/écrit**



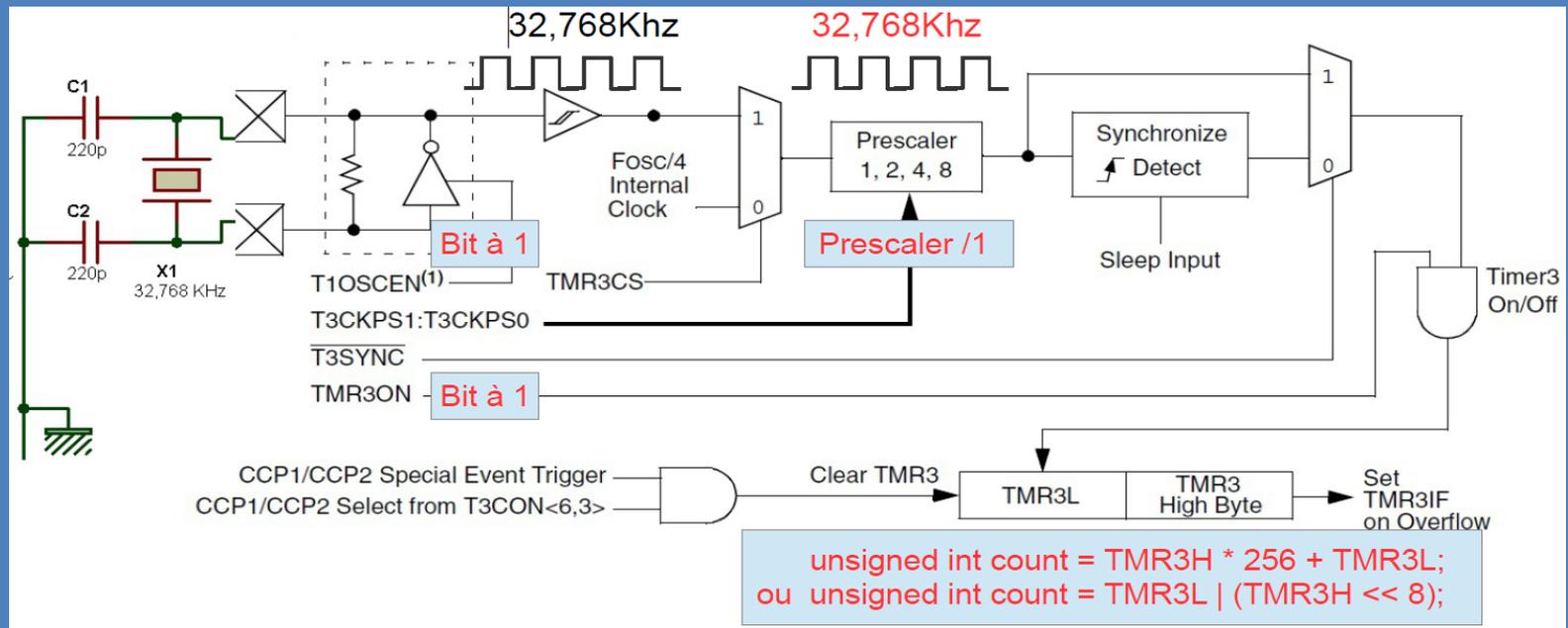
MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p130

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.7 Timers - Compteurs

- Exemple => câblage d'un quartz 32,768 KHz aux bornes T1OSO/T1OSI, activation de l'oscillateur interne avec le bit T1OSCEN à 1, les bits T3CKPS1 et T3CKPS0 sont écrits à 0 => le diviseur ou prescaler est égal à 1 et le bit TMR3ON est écrit à 1.

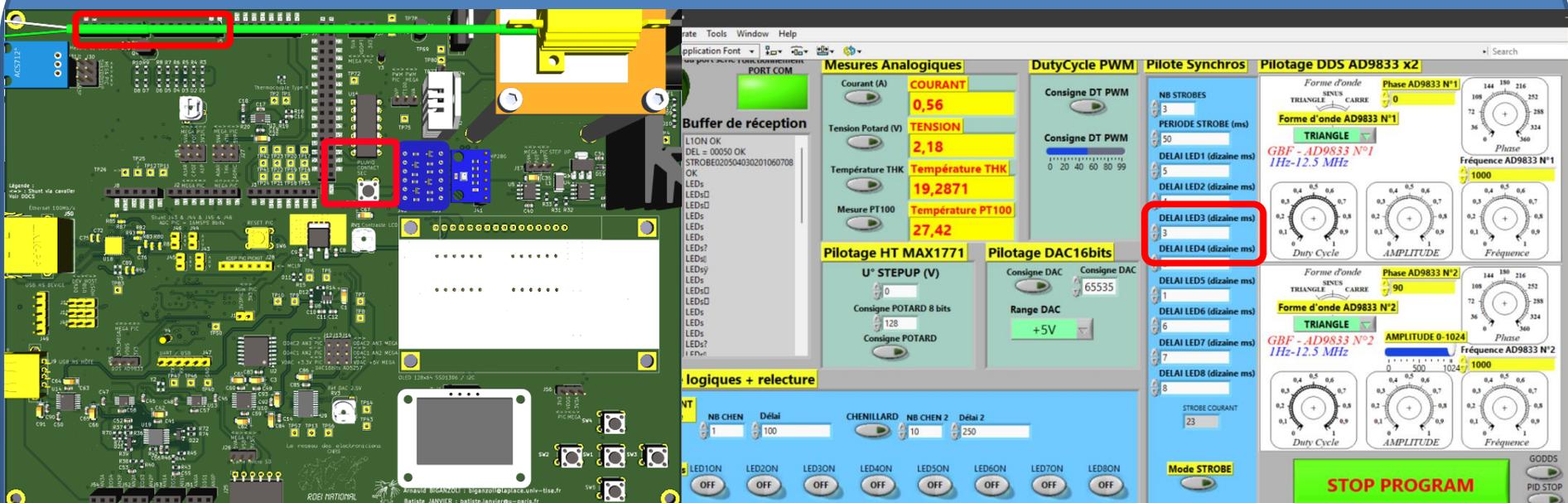


MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p138

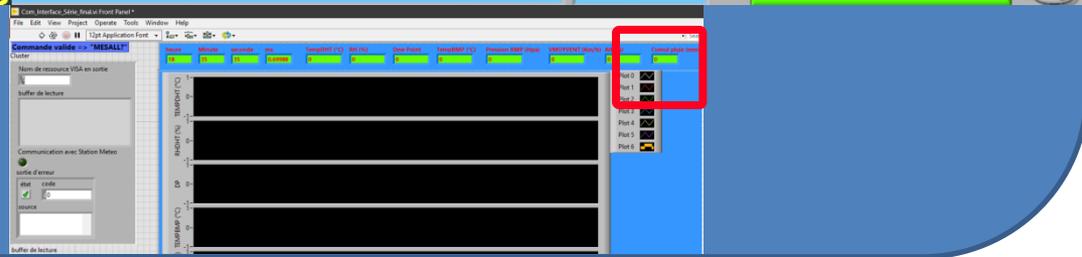
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.7 Timers - Compteurs / Atelier de démonstration



Programmation sur PIC32MZZ048EFH064
& Programmation ARDUINO
 Comptage basculements pluvio Timer5 MEGA
 Scrutation Timer1 PIC32MZ (Fréquence Strobe)

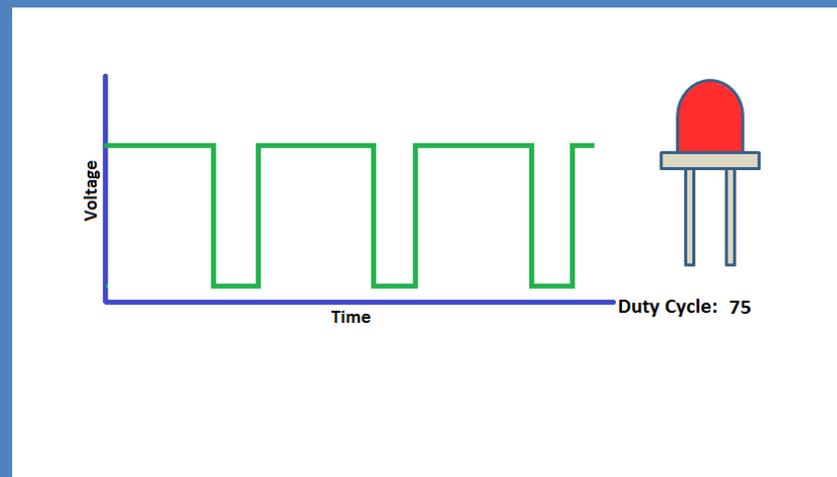
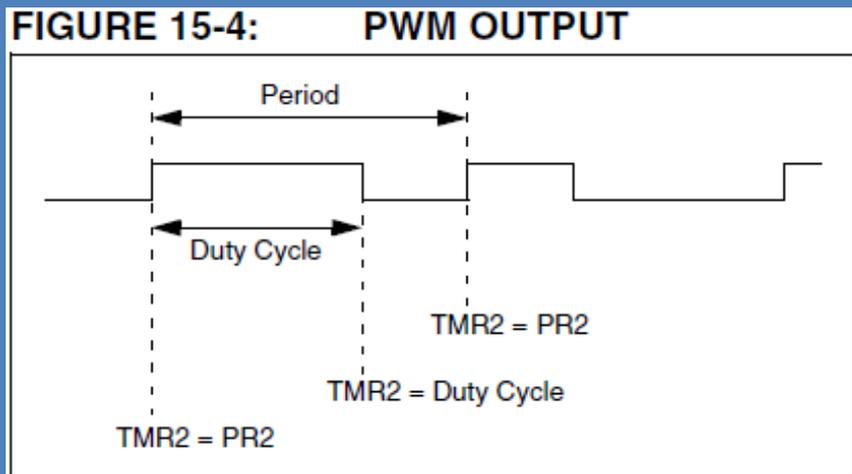


Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.8 PWM (Pulse Width Modulation) / MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

- Une PWM est définie par sa fréquence et le rapport cyclique



MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p146

<https://www.electronicwings.com/pic/pic18f4550-pwm>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.8 PWM (Pulse Width Modulation) / MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

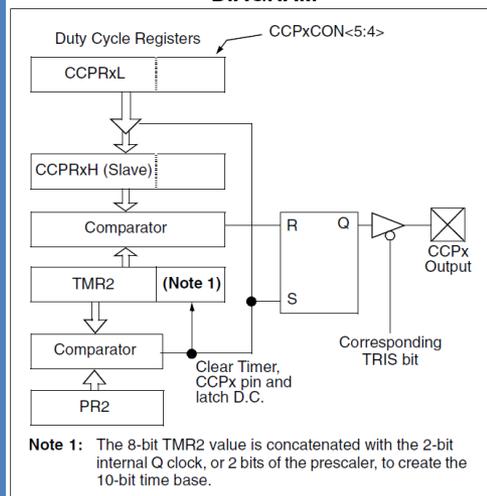
- La période du signal PWM est définie par la formule =>

$$\text{PWM Period} = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot TOSC \cdot (\text{TMR2 Prescale Value})$$

$$PR2 = (\text{PWM Period} / 4 \cdot TOSC \cdot (\text{TMR2 Prescale Value}) - 1$$
- Le rapport cyclique du signal PWM est défini par la formule =>

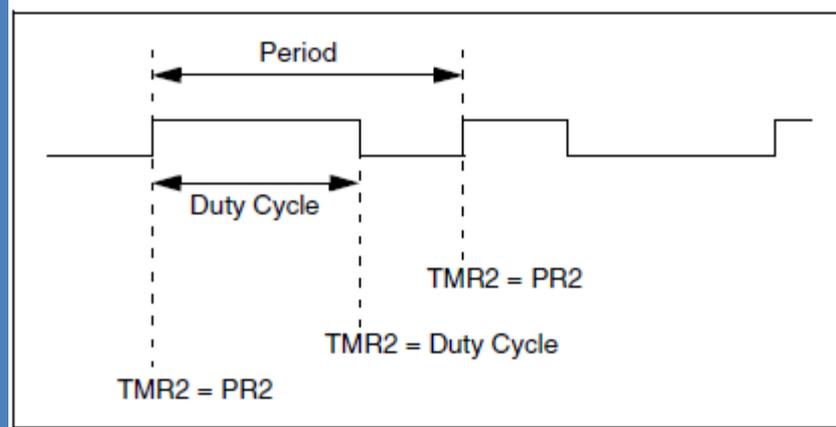
$$\text{PWM Duty Cycle} = (\text{CCPRXL:CCPXCON}\langle 5:4 \rangle) \cdot TOSC \cdot (\text{TMR2 Prescale Value})$$

FIGURE 15-3: SIMPLIFIED PWM BLOCK DIAGRAM



Fosc	48000000
Period PWM	3,41E-04
TMR2 Precaler	16
Tosc	2,08333E-08
constante	4
PR2	254,75
Freq PWM	2932,55132
PWM10bits	1023
PWMdutycycle	0,000341

FIGURE 15-4: PWM OUTPUT

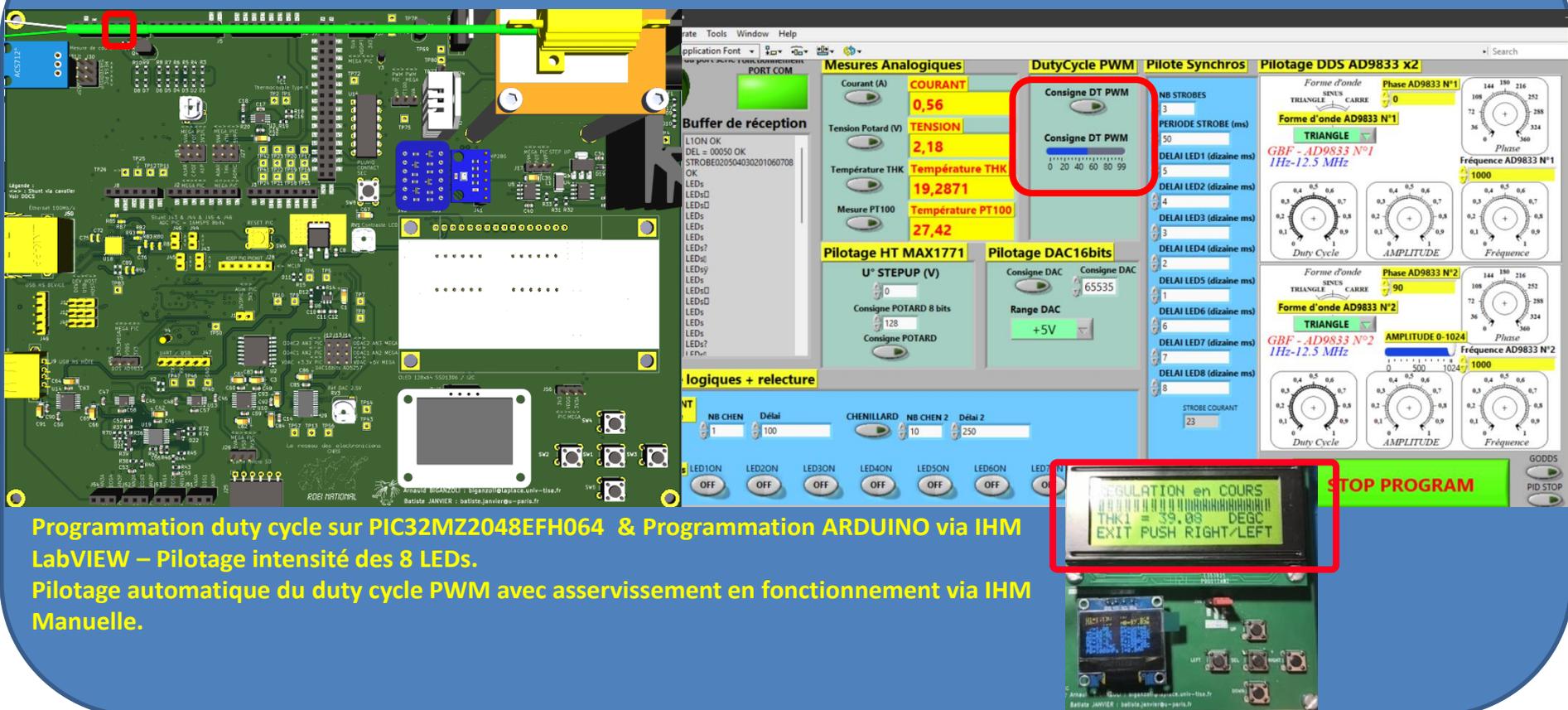


MICROCHIP : datasheet PIC18F4550, p146

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.8 PWM ou MLI



The image displays a hardware setup for a microcontroller-based instrumentation system. On the left, a green PCB is populated with various components, including a PIC32MZ2048EFH064 microcontroller. A red box highlights a specific component on the board. In the center, a LabVIEW software interface is shown, featuring several control panels: 'Mesures Analogiques' (Analog Measurements) with readouts for current (0.56 A), voltage (2.18 V), and temperature (19.2871 THK, 27.42 PT100); 'DutyCycle PWM' with a 'Consigne DT PWM' control; 'Pilote Synchron' (Synchronous Driver) with various delay and strobe settings; and 'Pilote DDS AD9833 x2' for signal generation. At the bottom, a small LCD display shows 'REGULATION en COURS' and 'THK1 = 39.08 DEGC'. A red box highlights the LCD display and the 'Consigne DT PWM' control in the LabVIEW interface. A 'STOP PROGRAM' button is visible on the right side of the interface.

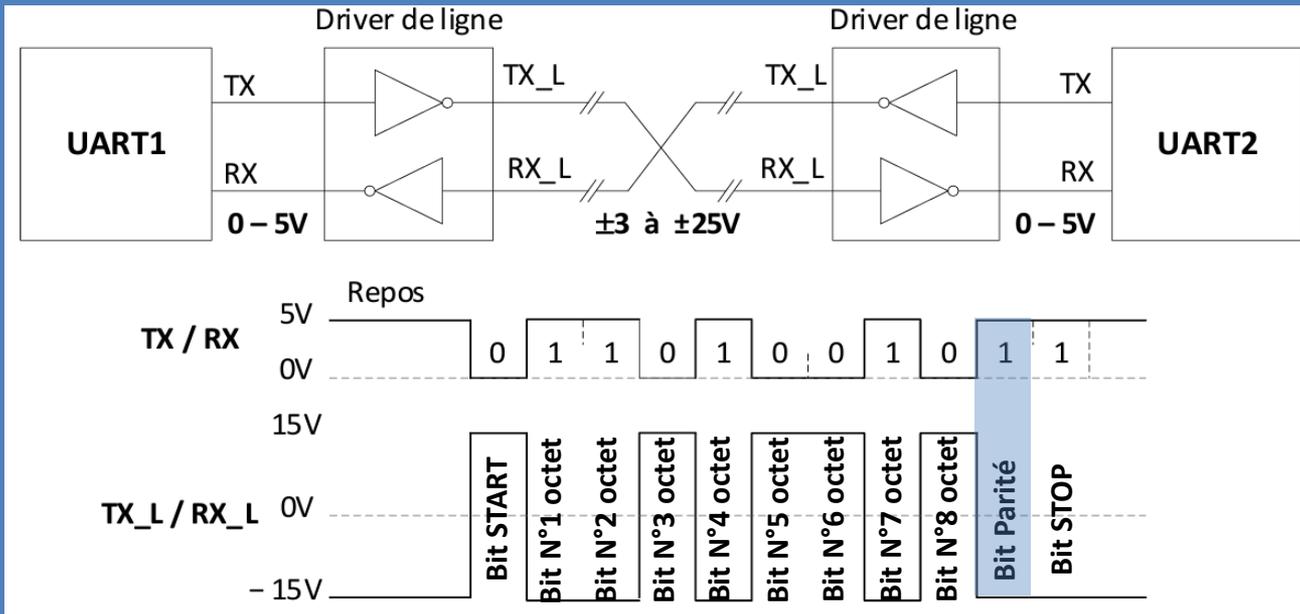
Programmation duty cycle sur PIC32MZ2048EFH064 & Programmation ARDUINO via IHM LabVIEW – Pilotage intensité des 8 LEDs.
Pilotage automatique du duty cycle PWM avec asservissement en fonctionnement via IHM Manuelle.

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- **EUSART / RS232 => communication entre microcontrôleur et instrumentation / PC**
- **Avantages => seulement 2 broches utilisées et 1 masse commune**
- **Inconvénients => débit faible, nécessite un convertisseur (MAX232, MAX3232), distance de communication limitée**



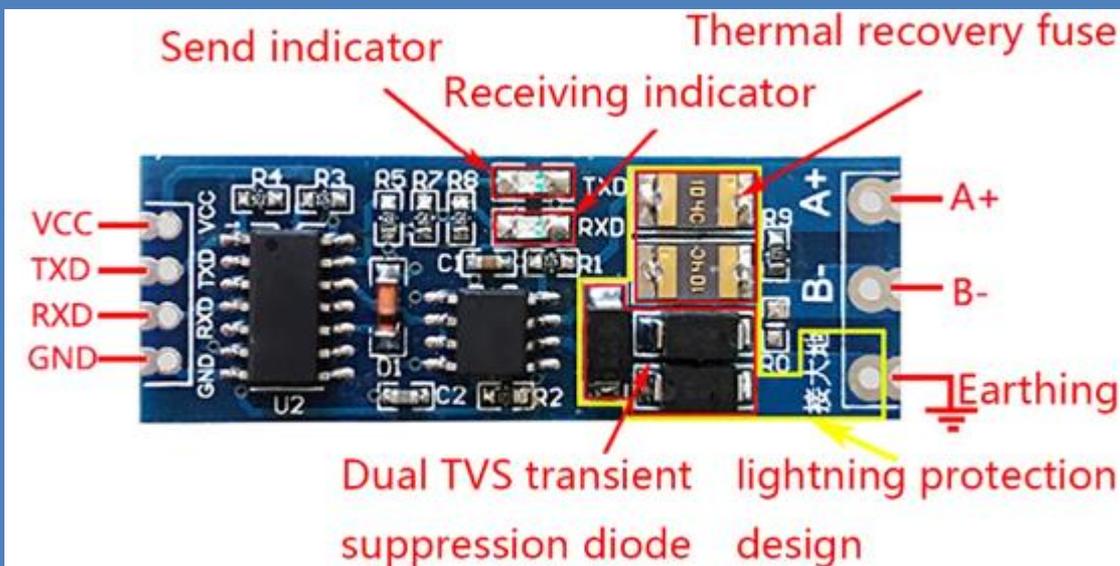
Communication entre deux périphérique UART et conversion RS232

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- **UART / RS485 => communication entre microcontrôleur et instrumentation ou PC**
- **Avantages => seulement 2 broches utilisées et 1 masse commune, distance inférieure à 1200 mètres, immune aux bruits**
- **Inconvénients => débit faible, nécessite un driver de ligne**



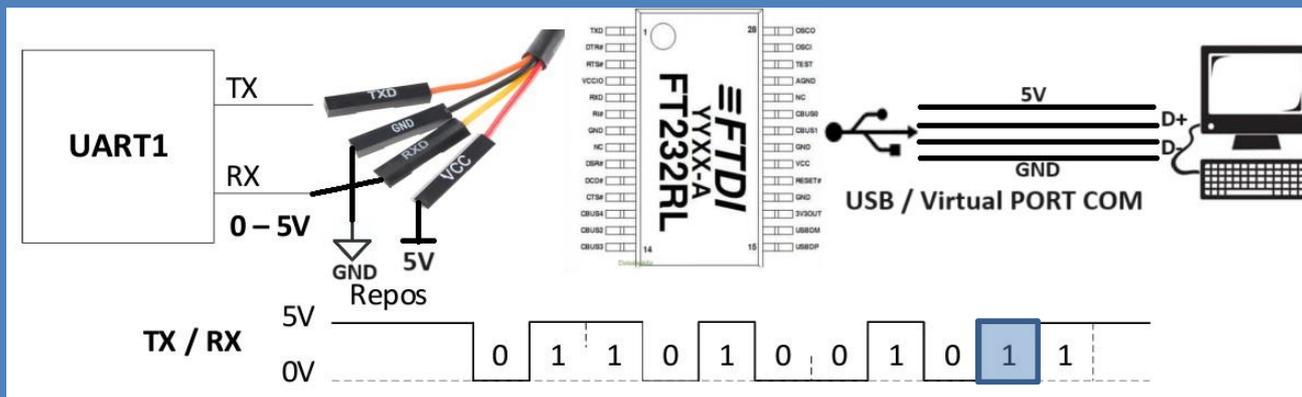
Module de conversion UART vers RS485

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- **UART / USB => communication entre microcontrôleur et instrumentation ou PC**
- **Avantages => seulement 2 broches utilisées + 1 masse commune et « VUSB », interface omniprésente, l'alimentation de l'électronique peut être fournie par le PC**
- **Inconvénients => débit limité comparé à l'USB 2 High Speed et USB3, nécessite un circuit de conversion, distance de communication < 5mètres**



Nom	Debit (théorique)	Distance max.
RS232	20 kb/s	15m
RS485	35 Mb/s 100 kb/s	15m 1200 m
I2C	100 kb/s - 3,4Mb/s	2-3m
USB-2	480 Mb/s	5m
USB-3	5 Gb/s	3m
IEEE1394 (FireWire)	400-800-1600 Mb/s	5m
SATA III	6Gb/s	faible

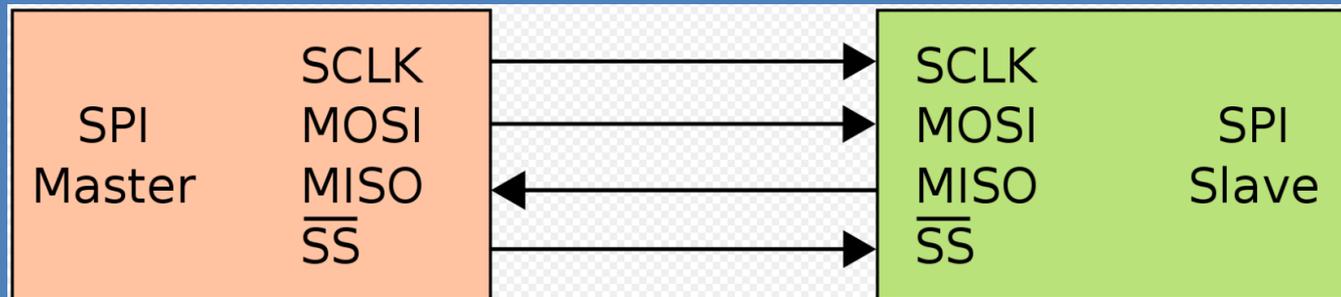
Communication entre deux périphériques UART et USB (Virtual PORT COM)

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- **SPI (Serial Peripheral Interface)** permet la communication avec des composants aux fonctionnalités diverses (potentiomètre numérique, DAC, ADC, capteurs, DDS, afficheurs, transceiver RF, convertisseur USB etc.)
- **Avantages** : Débit important (+++ Mbits/s), chaînable si composants l'autorisent, pilotage sans chaînage de différents composants si ajout de broche SS/CS
- **Inconvénients** : 4 broches ou plus utilisées (monopolisation des E/S µcontrôleur)



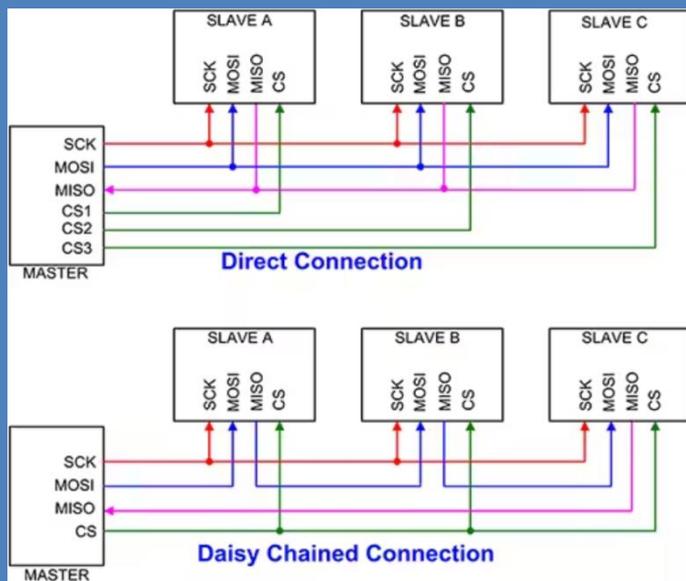
Nécessite 3 ou 4 broches microcontrôleur => SCLK (broche configurée en sortie sur laquelle est générée l'horloge), MOSI (broche configurée en sortie qui véhicule les données), MISO (broche configurée en entrée qui reçoit les données entrantes) et « SS » ou « CS » qui active désactive la communication entre périphériques SPI.

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- SPI (Serial Peripheral Interface)



« Direct Connection » => 6 broches microcontrôleur utilisées afin de piloter 3 composants aux fonctionnalités différentes (potard, ADC, DAC, DDS etc.)

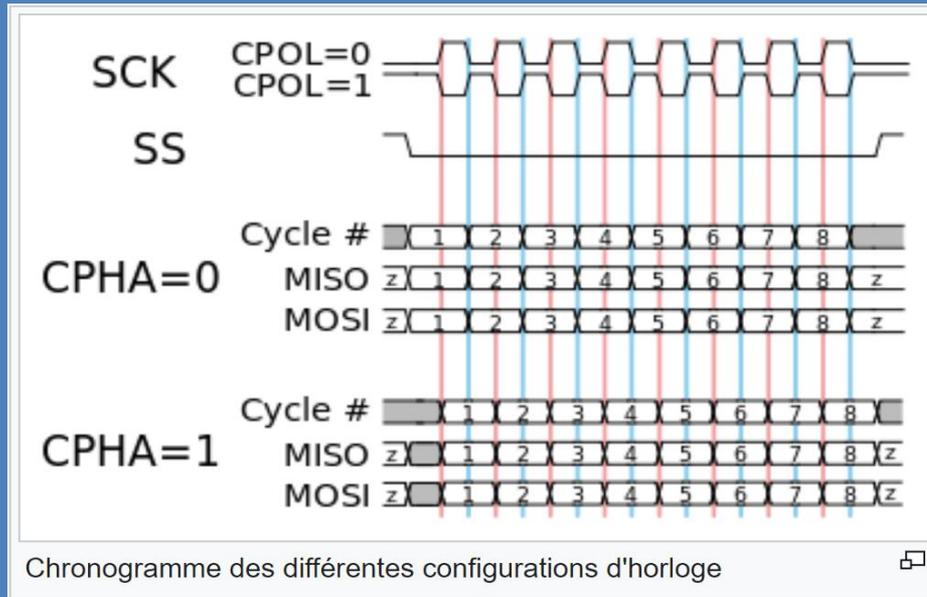
« Daisy Chained Connection » => 4 broches seulement utilisées, les esclaves possèdent la même configuration matérielle au niveau de leurs registres de communication

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- SPI (Serial Peripheral Interface) => 4 configurations de communication possibles



Configuration SPI via l'écriture des registres du périphérique

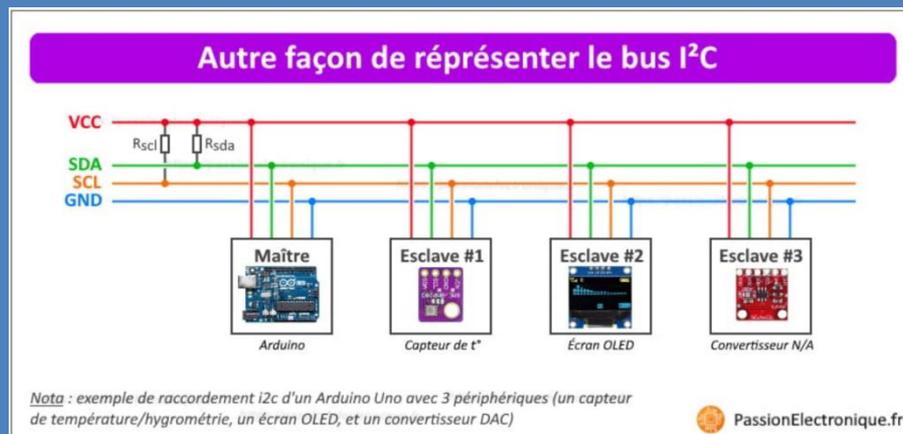
- CPOL = 0, CPHA = 0 => l'horloge est à l'état bas au repos, la donnée est présente sur le front montant
- CPOL = 1, CPHA = 0 => l'horloge est à l'état haut au repos, la donnée est présente sur le front descendant
- CPOL = 0, CPHA = 1 => l'horloge est à l'état bas au repos, la donnée est présente sur le front descendant
- CPOL = 1, CPHA = 1 => l'horloge est à l'état haut au repos, la donnée est présente sur le front montant

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- **I2C (Inter Integrated Circuit)** permet la communication avec des composants aux fonctionnalités diverses (potentiomètre numérique, DAC, ADC, capteurs, afficheurs, transceiver RF, etc.)
- **Avantages** : 2 broches microcontrôleur utilisées, chaînable, pilotage de différents composants selon adressage codé sur 7bits
- **Inconvénients** : datarate assez faible (100 à 400Kbits/s voir > 1Mbits/s)



<https://passionelectronique.fr/liaisons-series-uart-i2c-spi/#la-liaison-serie-i2c>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

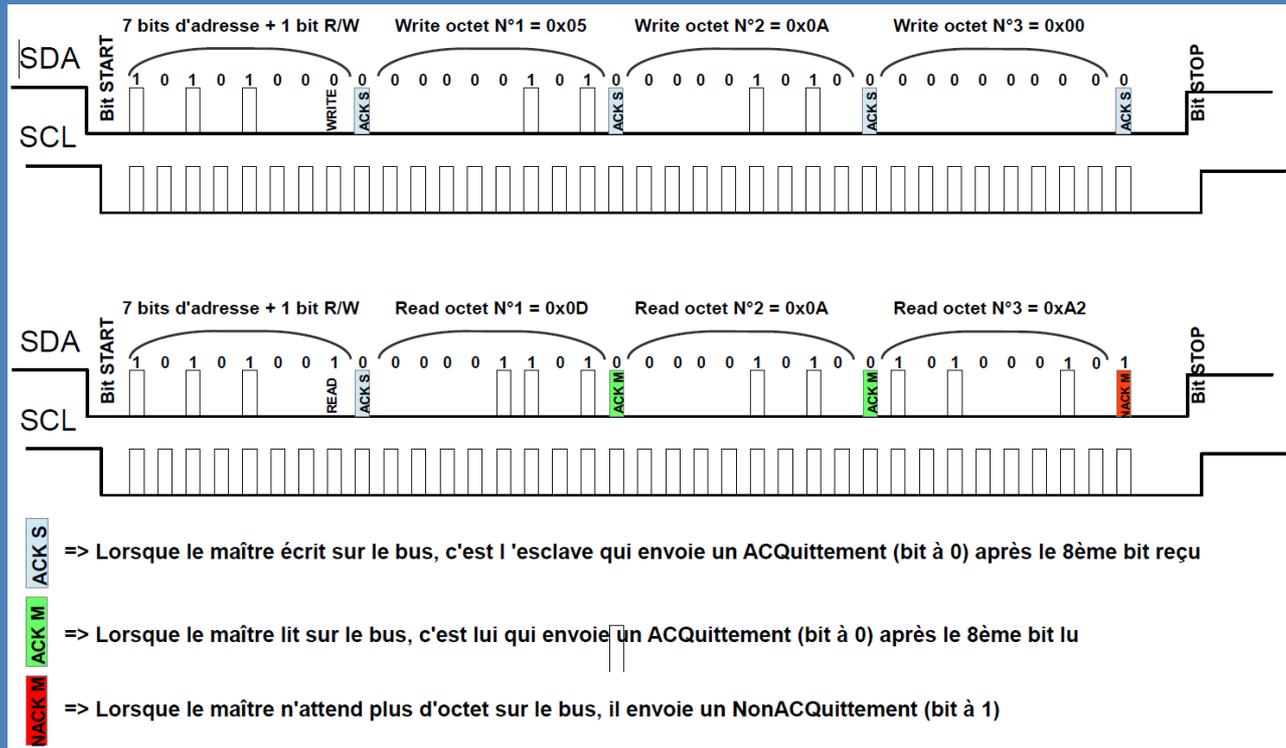
I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- I2C (Inter Integrated Circuit)

On écrit/configure les registres d'un esclave

On lit des données reçues d'un esclave



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.9 Interfaces Séries

- **USB (Universal Serial Bus) permet la communication avec des périphériques (oscilloscope, multimètre, générateur de signaux, alimentations, PC etc.)**
- **Avantages : 2 broches microcontrôleur utilisées, interface universelle, taux de transfert rapide à très rapide (émulation de PORT COM propriétaire, LowSpeed, Full Speed, HighSpeed)**
- **Inconvénients : un port USB / périphérique, nécessite un oscillateur externe précis voir compensé en température, norme USB complexe.**
- **Exemples : microcontrôleurs 8bits PIC81F13K50, PIC18F4550, PIC18F46J50, PIC18F87J50 ATXMEGA32A4U etc.**
- **Exemples : microcontrôleurs 16bits : PIC24FJ512GU405**
- **Exemples : microcontrôleurs 32bits : PIC32MZ2048EFHXXX**

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

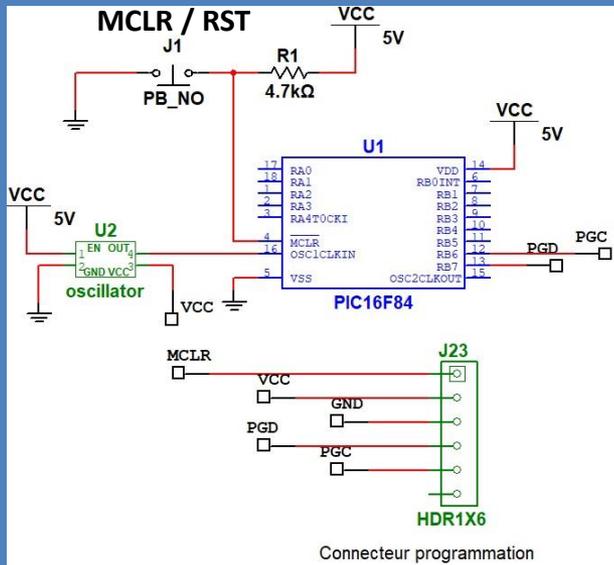
2.0 Autres périphériques ou fonctionnalités / configuration minimale

- Interface parallèle (utilisation de plusieurs broches d'un PORT microcontrôleur)
- Up to 4 ADC Interleaved
- Bus CAN
- Idle, Sleep, DeepSleep, WatchDog
- IO mapping (routage de périphériques vers différentes broches)
- RTCC
- Comparateur
- DAC
- Ethernet
- DMA
- CRC, cryptographie
- Logique intégrée
- AOP
- Capteur de température On-Chip
- Etc.

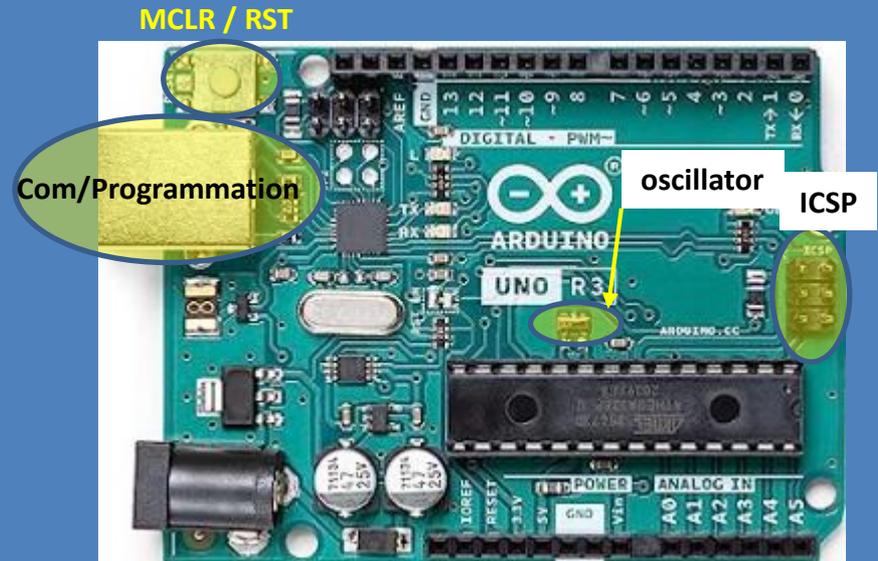
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.0 Configuration matérielle minimale pour développer sur microcontrôleur



Programmation PIC16F, PIC18F, PIC24, PIC32



Plateforme de développement Arduino UNO

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.0 Configuration matérielle minimale pour développer sur microcontrôleur

- Plateformes ARDUINO, facilité de mise en œuvre des périphériques:



Plateforme de développement Arduino UNO

```
pinMode(8, OUTPUT ou INPUT); // configuration en sortie ou entrée de la broche 8
```

```
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(Pin), blink, CHANGE);
```

```
etat = digitalRead(8); // on lit l'état logique sur la broche N°8 configurée en entrée
```

```
digitalWrite(13,HIGH ou LOW); // on écrit la broche N°13 à 5V ou 0V
```

```
analogWrite(Pin, 0 à 255); // analogWrite = PWM DT values from 0 to 255
```

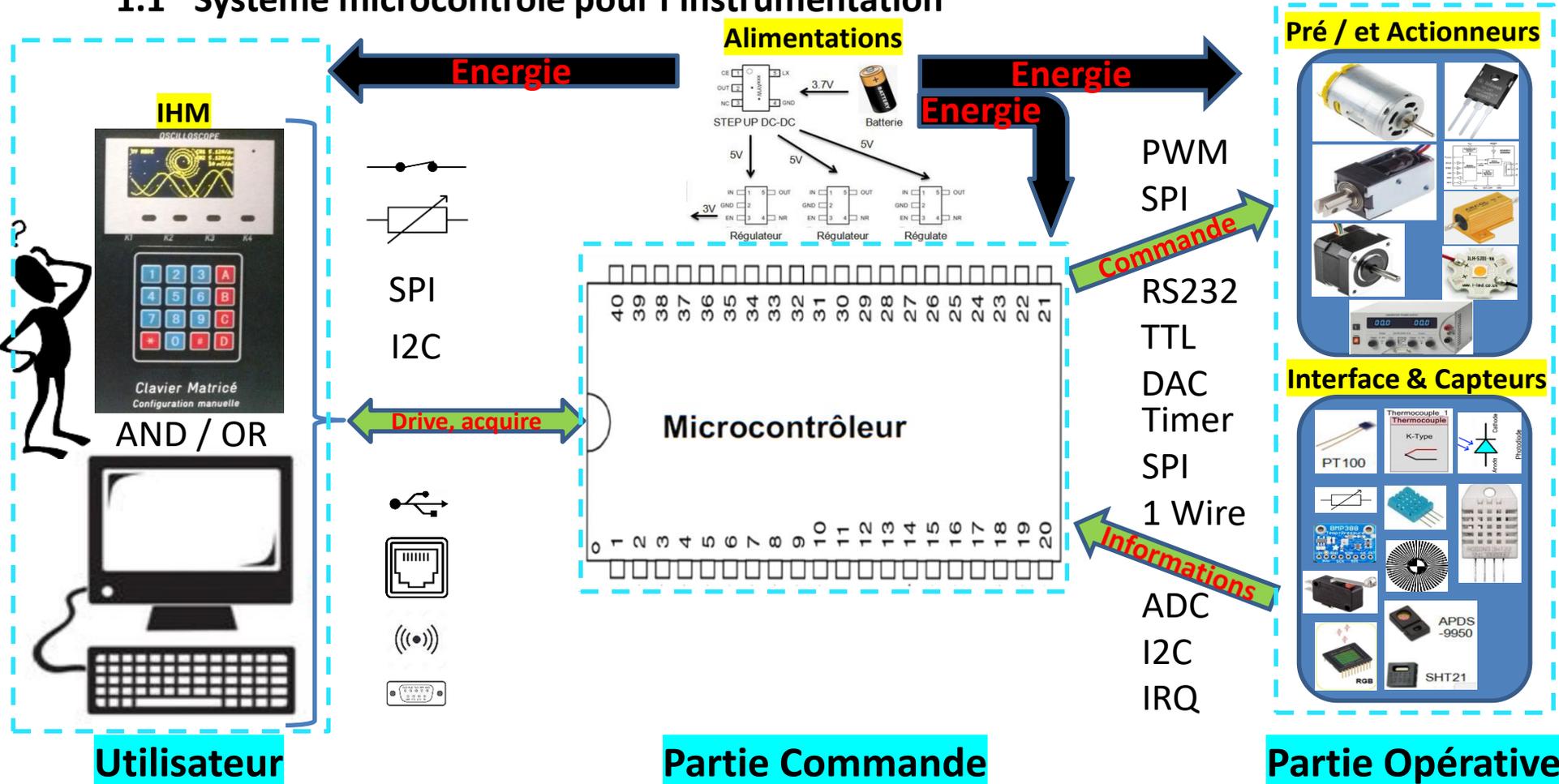
```
val = analogRead(analogPin); // read the input pin voltage / CAN
```

ATTENTION, certaines fonctionnalités de cadencement du temps ne sont pas très précises et devront être implémentées via l'écriture directe des registres microcontrôleur afin de piloter les Timers et la fréquence PWM par exemple.

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

1.1 Système microcontrôlé pour l'instrumentation



Utilisateur

Partie Commande

Partie Opérative

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.1 Actionneurs

Un actionneur permet de convertir un signal électrique :

- en mouvement mécanique (moteurs, vérins, HP, ultra-sons, piezos etc.)
- en photons (LEDs, diodes LASER, afficheurs etc.)
- en chaleur (résistances, Peltier)
- en champ magnétique



Partie Opérative

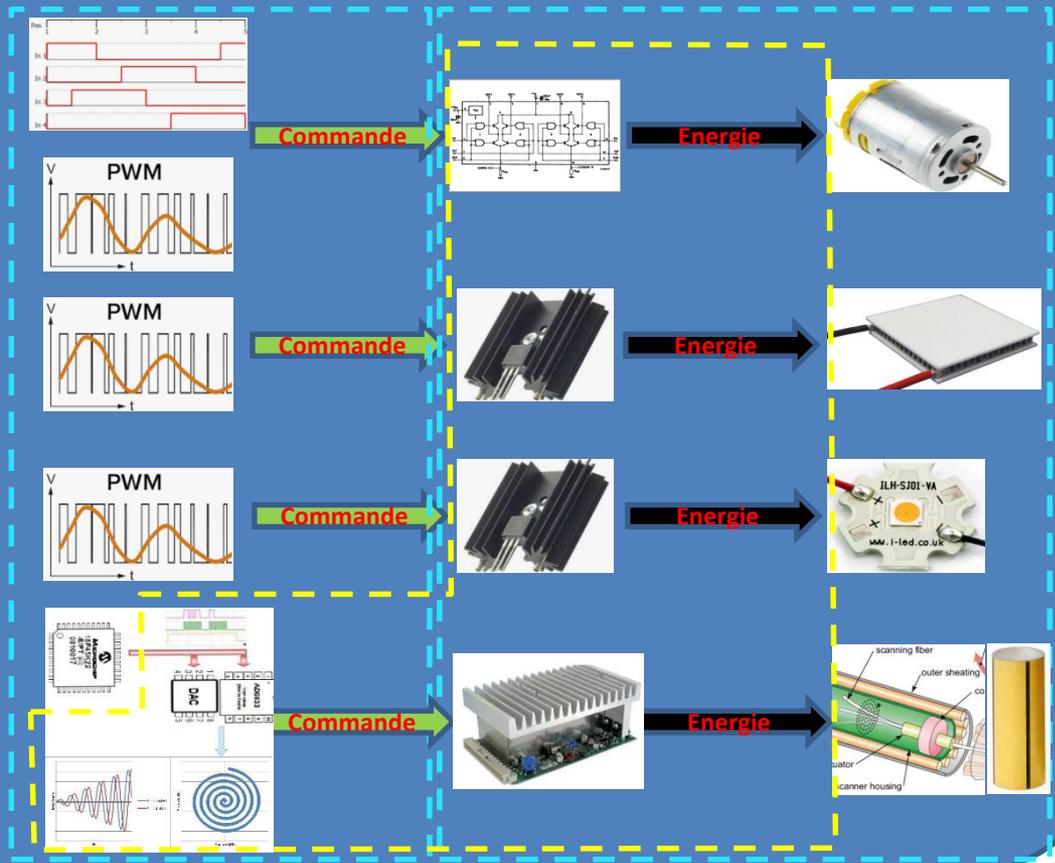
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.2 Pré-actionneurs

Un pré-actionneur permet de convertir une commande électrique de faible énergie en :

- en signal électrique de puissance (moteurs, vérins, HP, ultra-sons, piezos etc.)
- en un signal électrique mis en forme (LEDs, diodes LASER, afficheurs etc.)
- en chaleur (résistances, Peltier)



Partie Commande

Partie Opérative

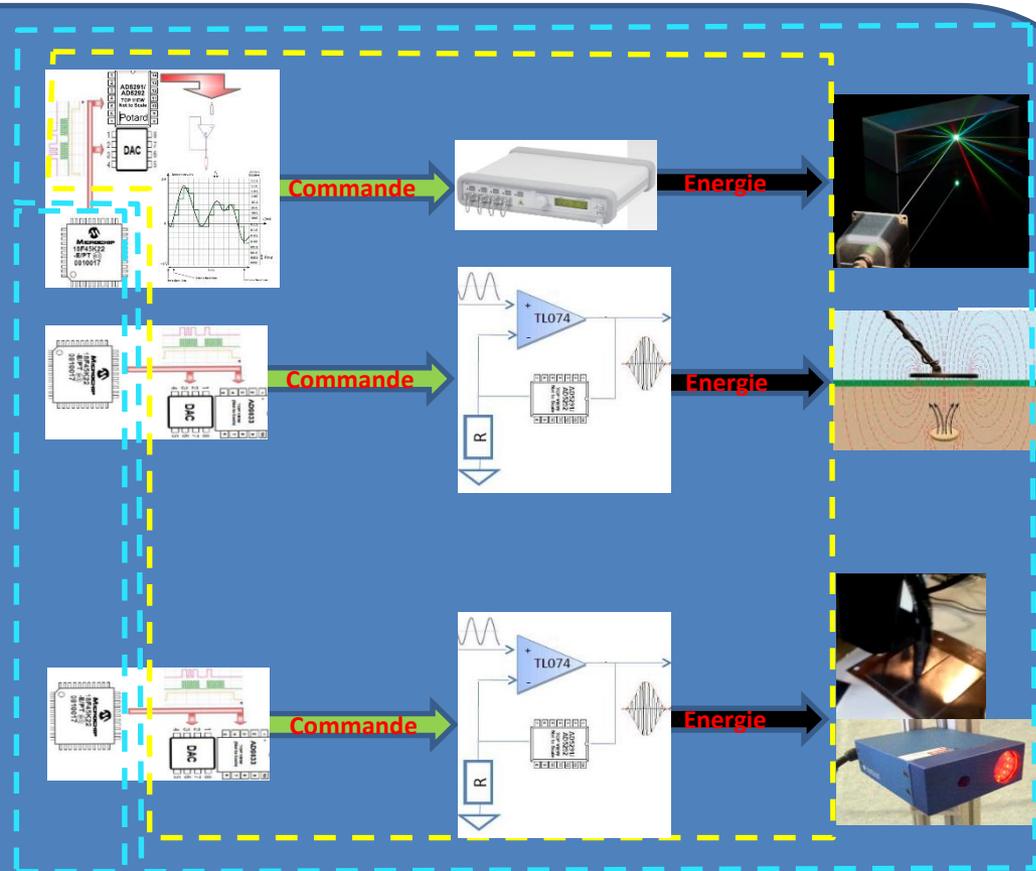
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.2 Pré-actionneurs

Un pré-actionneur permet de convertir une commande électrique de faible énergie en :

- en signal électrique de puissance (moteurs, vérins, HP, ultra-sons, piezos etc.)
- en un signal électrique mis en forme (LEDs, diodes LASER, afficheurs etc.)
- en chaleur (résistances, Peltier)



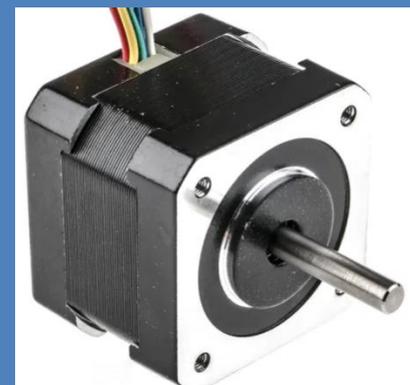
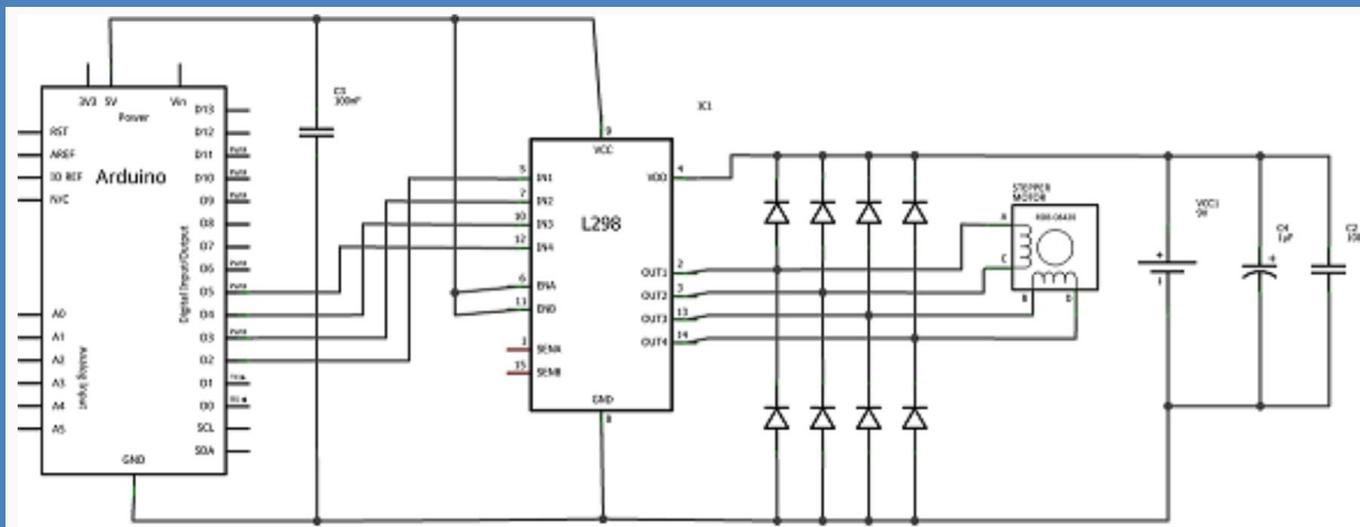
Partie Commande

Partie Opérative

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.2 Pré-actionneurs – moteurs



- Drivers => L298, A4988, DRV8834, DRV8824...

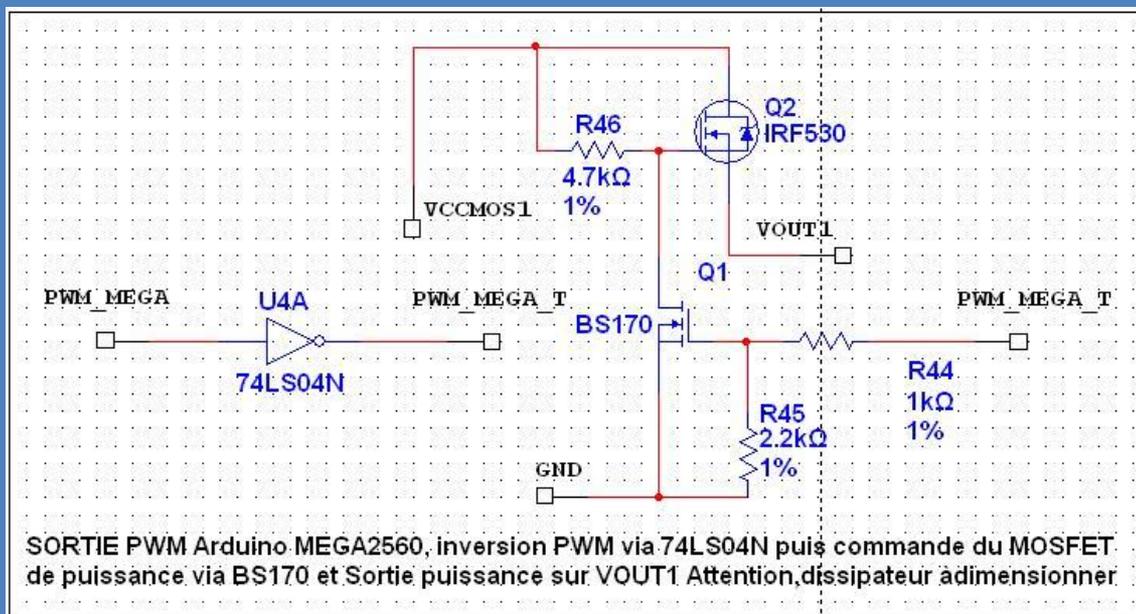
<https://www.lextronic.fr/drivers-moteurs-pas-a-pas-4003>

<https://www.gotronic.fr/blog/articles/moteur-pap/>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

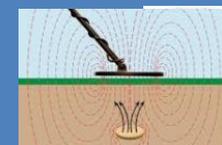
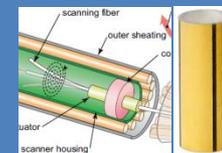
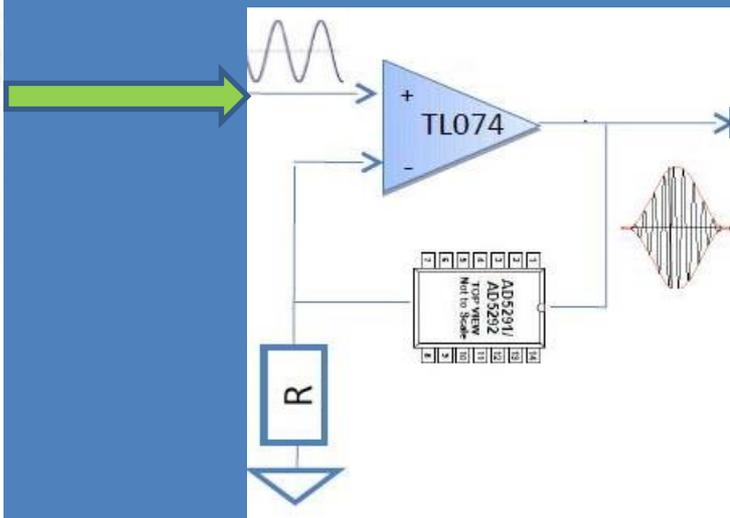
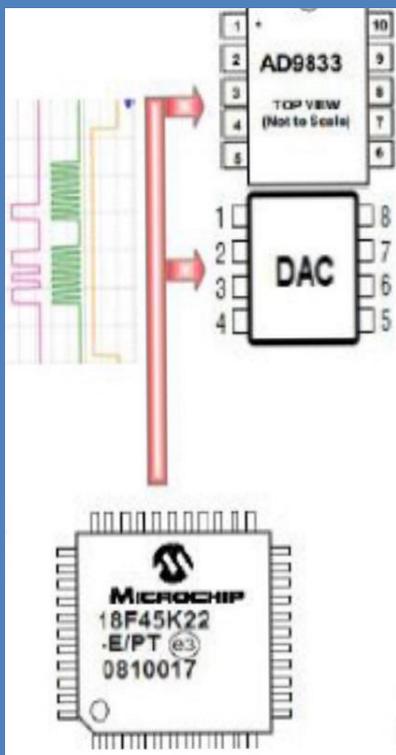
2.2 Pré-actionneurs – LED puissance – résistance - Heater



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.2 Pré-actionneurs – PIEZO – suivi de joint - bobines émettrices réceptrices



µcontrôleur – DDS ou DAC – AOP + potard numérique en CR – Systèmes oscillants ou bobines

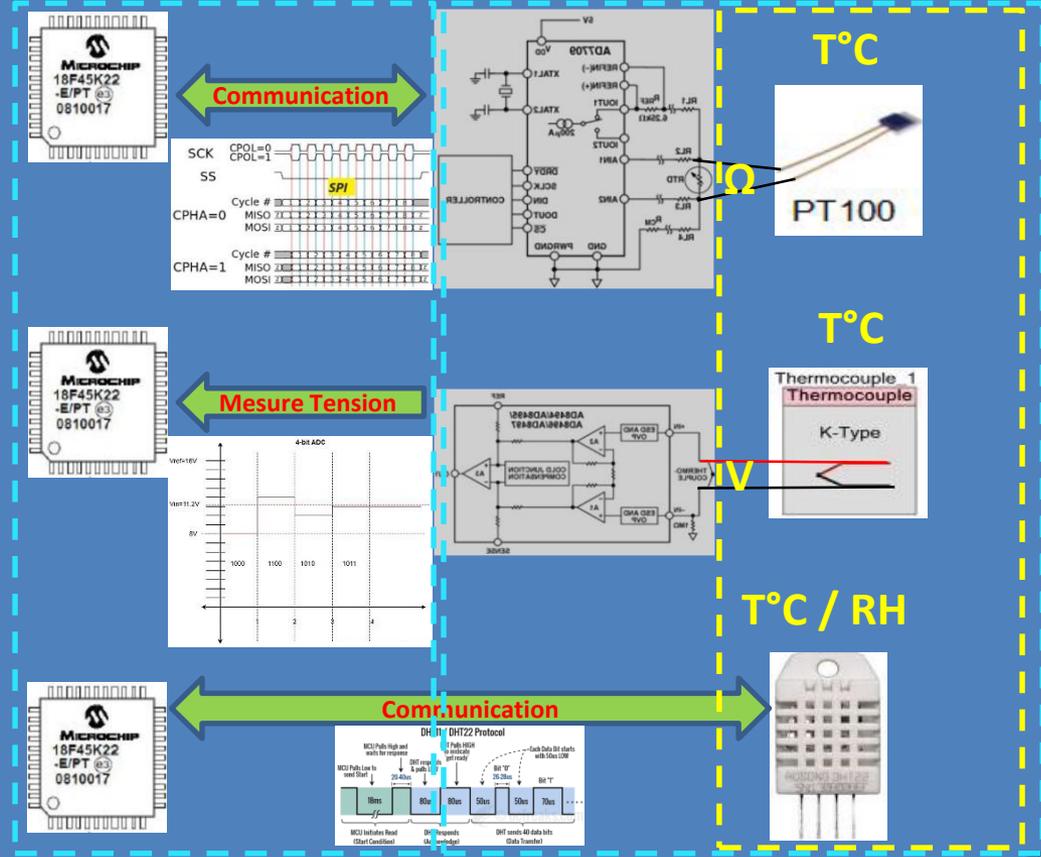
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.3 Capteurs

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable :

- température => tension électrique
- température => résistance => tension
- Température => tensions/signaux numériques
- vitesse => signal lumineux => courant => tension
- position mécanique => tension
- humidité relative => tensions/signaux numériques
- Pression => tensions/signaux numériques



Partie Commande

Partie Opérative

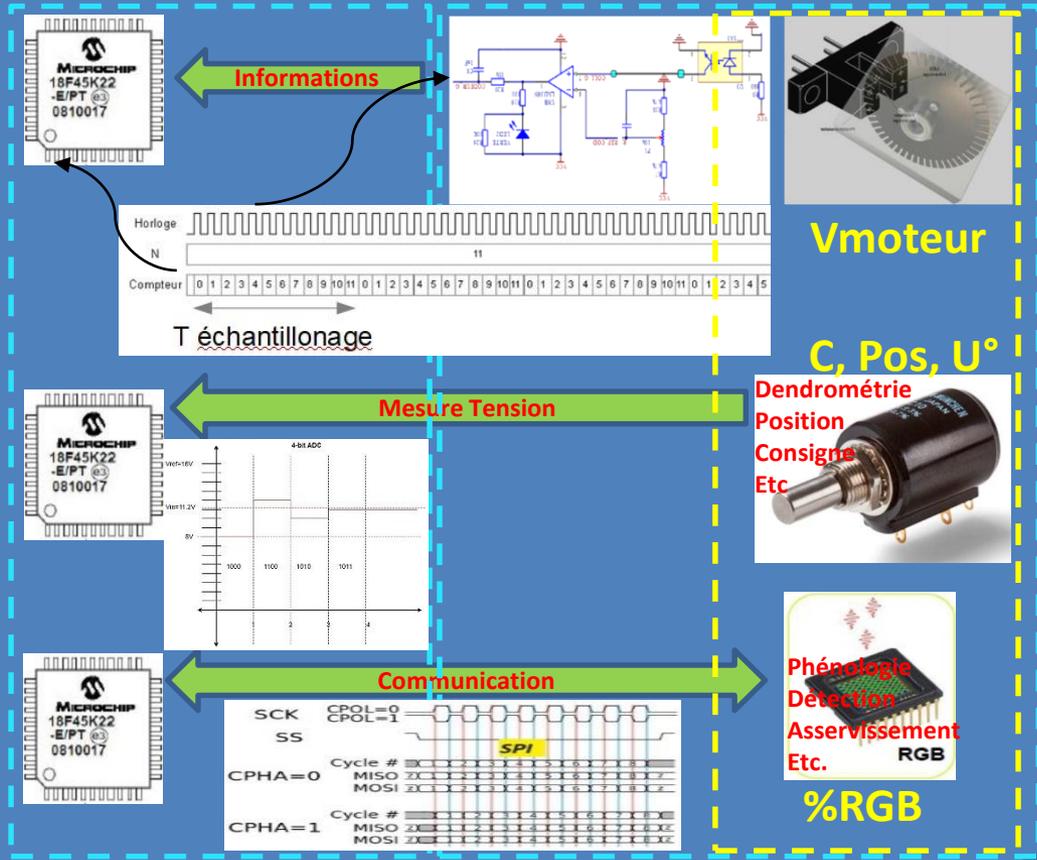
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.3 Capteurs

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable :

- température => tension électrique
- température => résistance => tension
- Température => tensions/signaux numériques
- vitesse => signal lumineux => courant => tension
- position mécanique => tension
- humidité relative => tensions/signaux numériques
- Pression => tensions/signaux numériques



Partie Commande

Partie Opérative

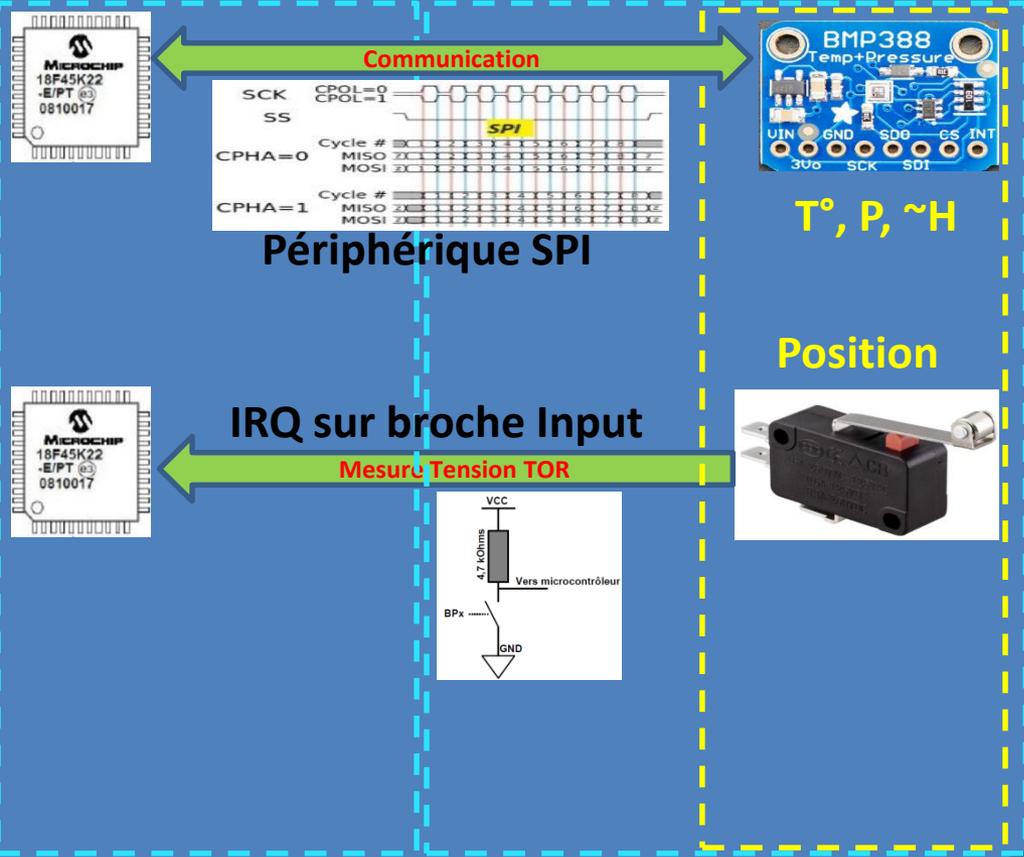
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.3 Capteurs

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable :

- température => tension électrique
- température => résistance => tension
- Température => tensions/signaux numériques
- vitesse => signal lumineux => courant => tension
- position mécanique => tension
- humidité relative => tensions/signaux numériques
- Pression => tensions/signaux numériques



Partie Commande

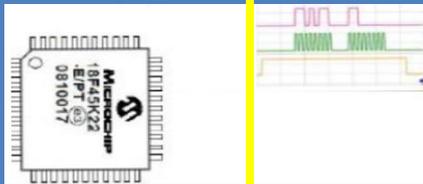
Partie Opérative

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

2.3 Interfaçage PT100

Mise En Œuvre sur Carte DEMO V1



Communication

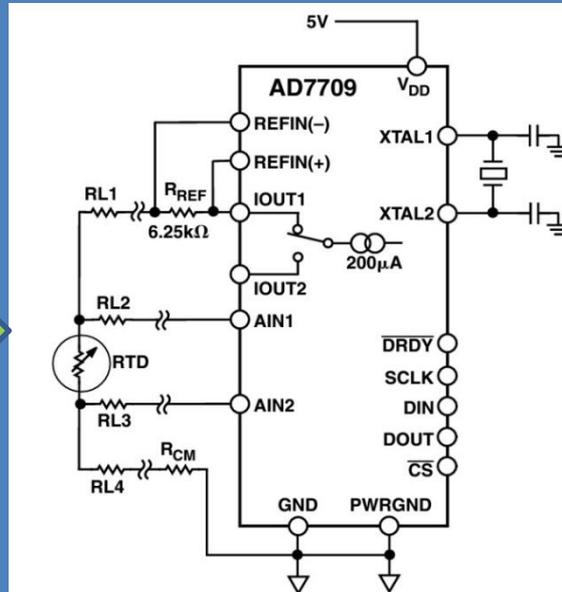


Figure 20. 4-Wire RTD Temperature Measurement Using the AD7709

Mesure Tension



µcontrôleur – ADC AD7709 (SPI) – PT100 en mode 4 fils intégrés au PCB

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

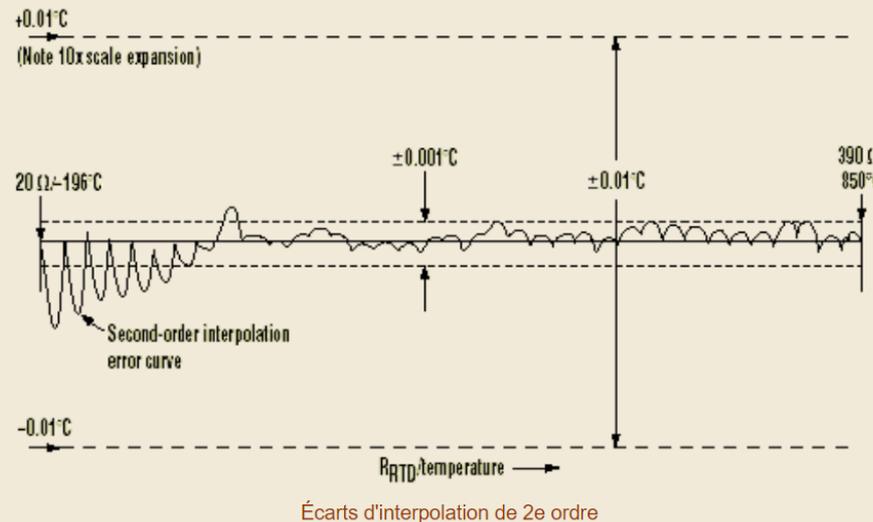
2.3 Interfaçage PT100

Mise En Œuvre sur Carte DEMO V1

Algorithme de second ordre

```

$interp = $rtd/10
$int = partie entière de $interp
$frac = $interp - $int
$a = $ta[$int]
$b = $ta[$int + 1]/2
$c = $ta[$int - 1]/2
$Temperature = $a + $frac*
($b-$c + $frac*($c+$b-$a))
    
```



Avec l'algorithme d'interpolation de second ordre, la précision est de 0,003 °C, avec, vu le calcul de \$c, une limitation inférieure à 20 Ω la limite supérieure, dans les deux algorithmes, étant de 399 Ω

Conversion résistance température

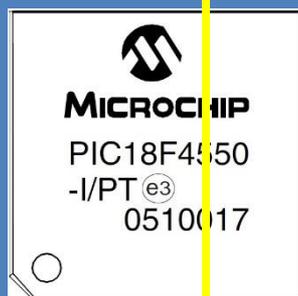
<https://aviatechno.net/thermo/rtd03.php>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

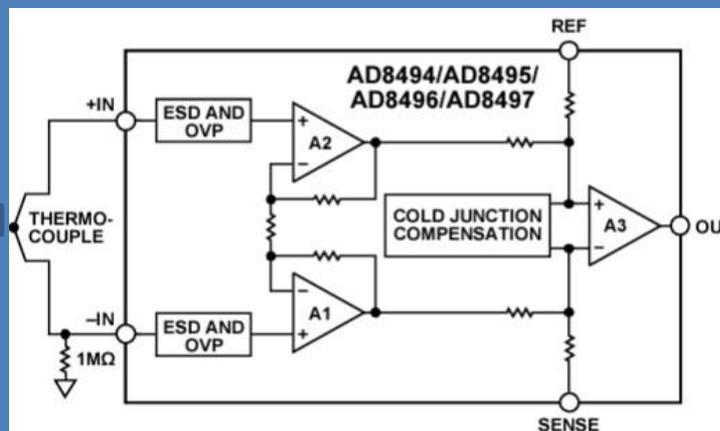
I. Introduction générale

2.3 Interfaçage Thermocouple type K

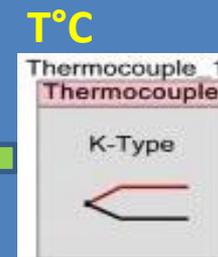
Mise En Œuvre sur Carte DEMO V1



Mesure Tension



Adaptation Tension

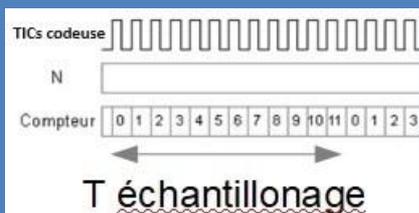


µcontrôleur – CAN – AOP AD8495 avec compensation soudure froide – Thermocouple type K

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

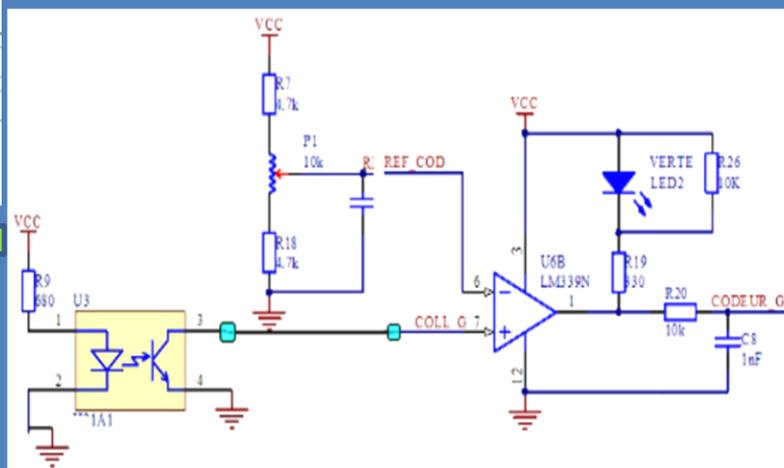
I. Introduction générale

2.3 Mesure vitesse moteur

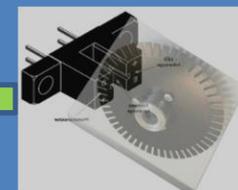


MICROCHIP
PIC18F4550
 -I/PT e3
 0510017

← Comptage Timer



← Adaptation Tension



µcontrôleur – Timer – comparateur LM339 – roue codeuse

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

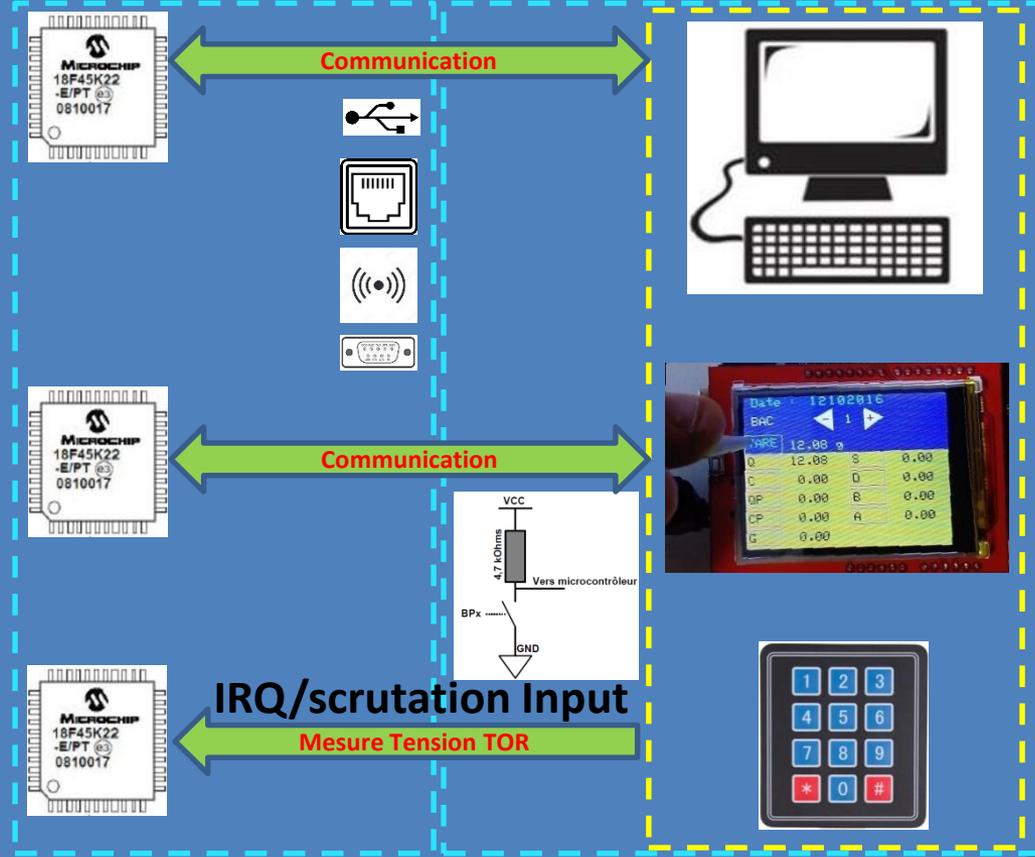
I. Introduction générale

2.4 IHM (Interface Homme Machine)

Une IHM ou Interface Homme Machine est une interface ou un panneau de commande qui relie un utilisateur à une machine :

- Clavier / écran sur boîtier automate
- Panneau de commande sur boîtier automate
- Clavier / écran / PC interfacé avec le microcontrôleur
- Écran tactile / PC interfacé avec le microcontrôleur
- Écran tactile connecté directement sur le microcontrôleur etc.

Mise En Œuvre sur Carte DEMO V1



Partie Commande **Partie Opérative / Utilisateur**

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

I. Introduction générale

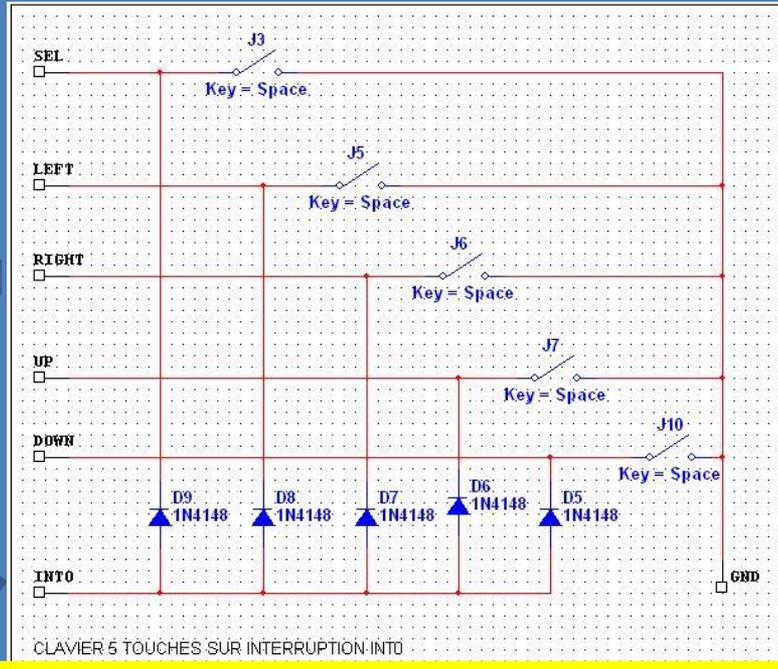
2.4 Interface touches tactiles – clavier matricé

Mise En Œuvre sur Carte DEMO V1



Lecture Input

Interruption



Brochage

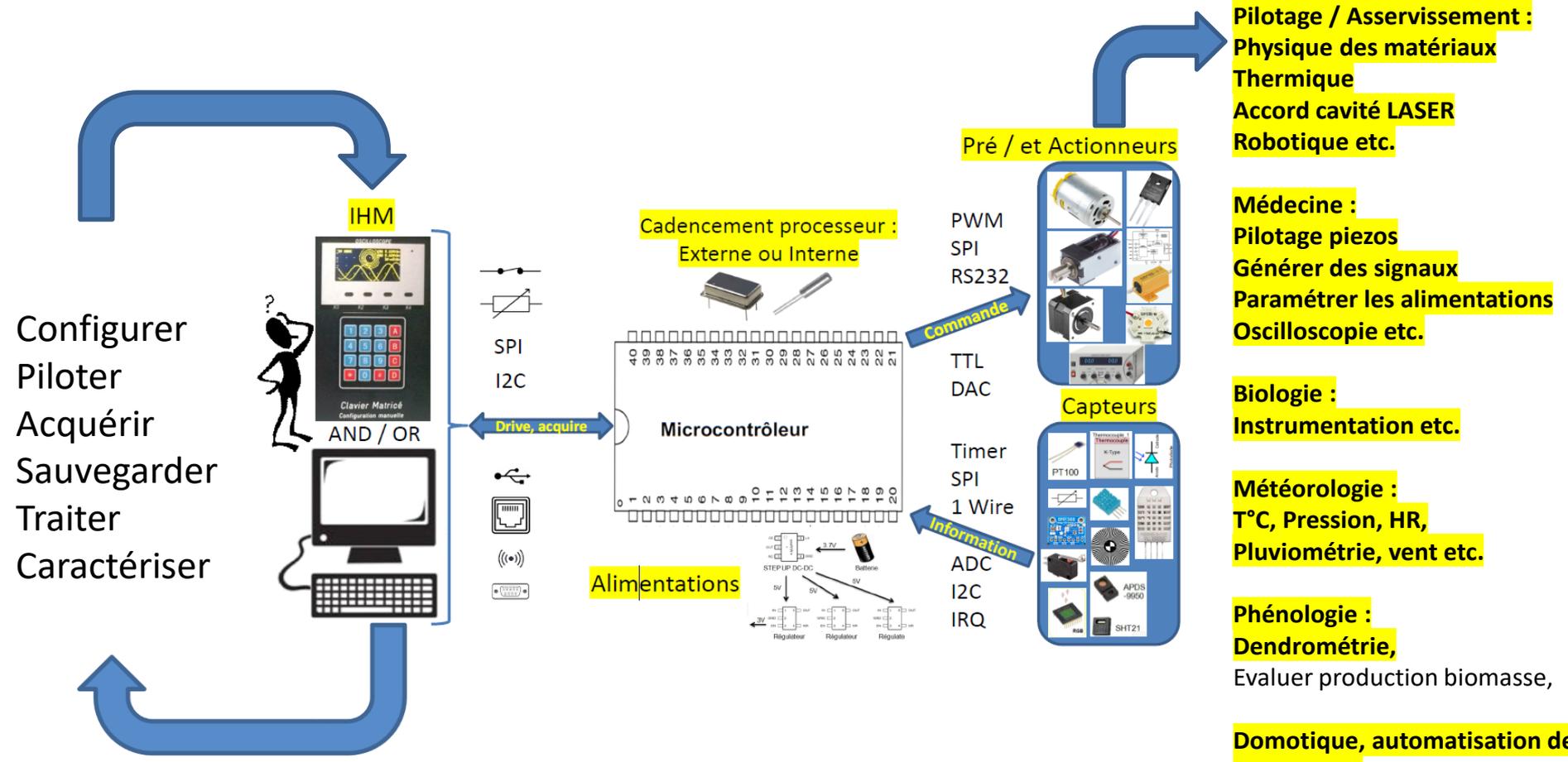


µcontrôleur – Interruption / scrutation IO (pullups actifs) – Clavier / touche tactile

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1. Système microcontrôlé pour l'instrumentation. Applications concrètes.

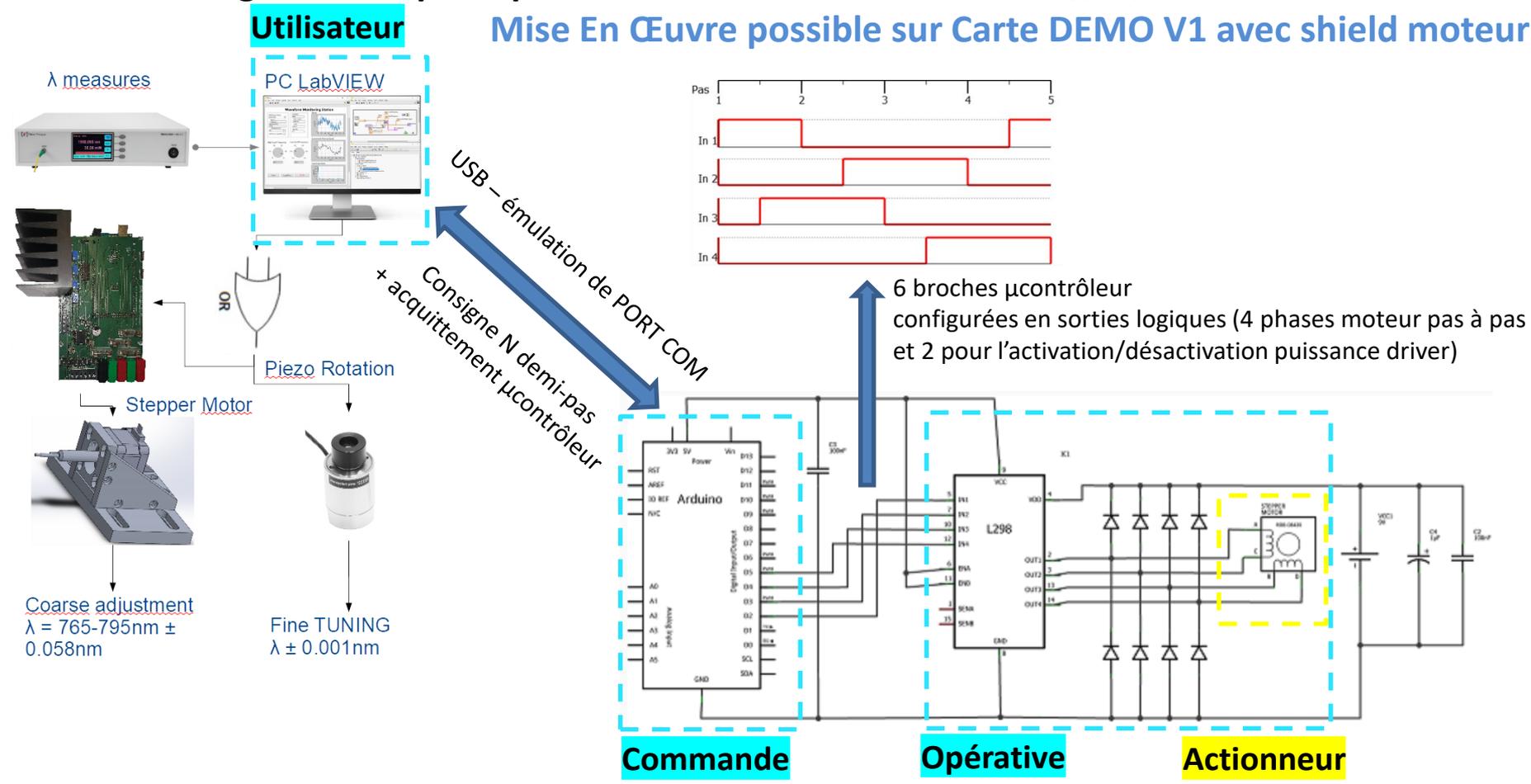


Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.1 Pilotage moteur pas à pas => accord cavité LASER – MPQ / QITE.

Mise En Œuvre possible sur Carte DEMO V1 avec shield moteur

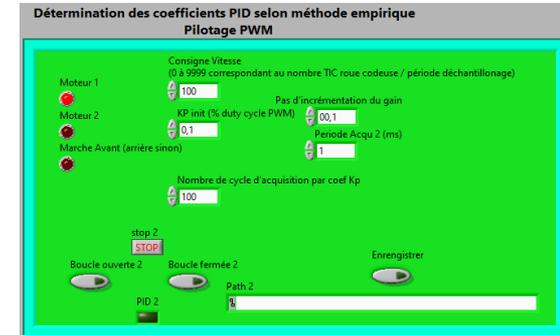


Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

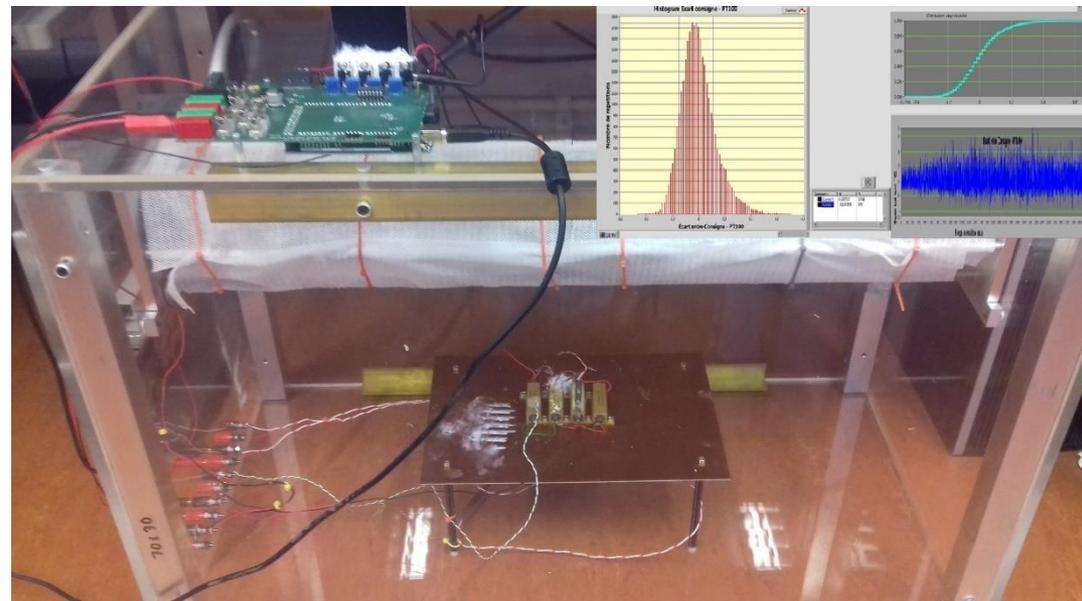
II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.2 Asservissements – MPQ / Pôle Technique

- Banc de détermination des coefficients K_p , K_i et K_d



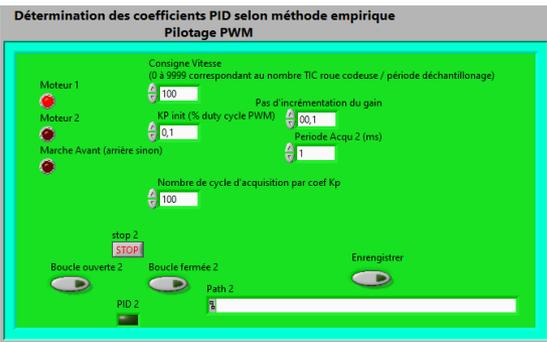
Mise En Œuvre possible sur Carte DEMO V1



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

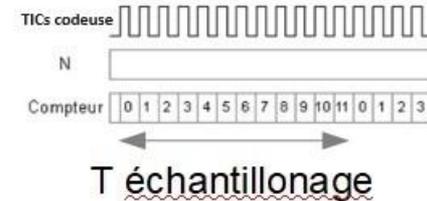
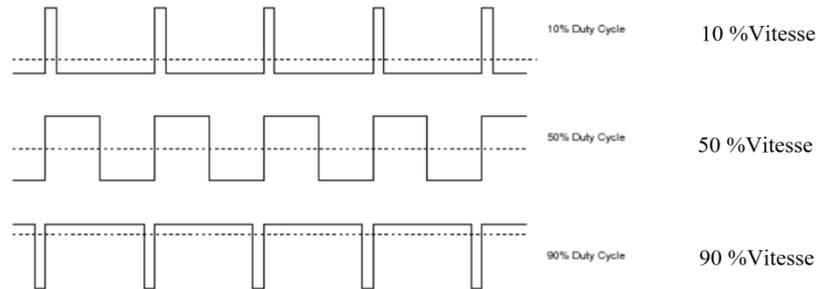
II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.2 Pilotage moteur continu => Asservissement / partie N°1.



Utilisateur / IHM

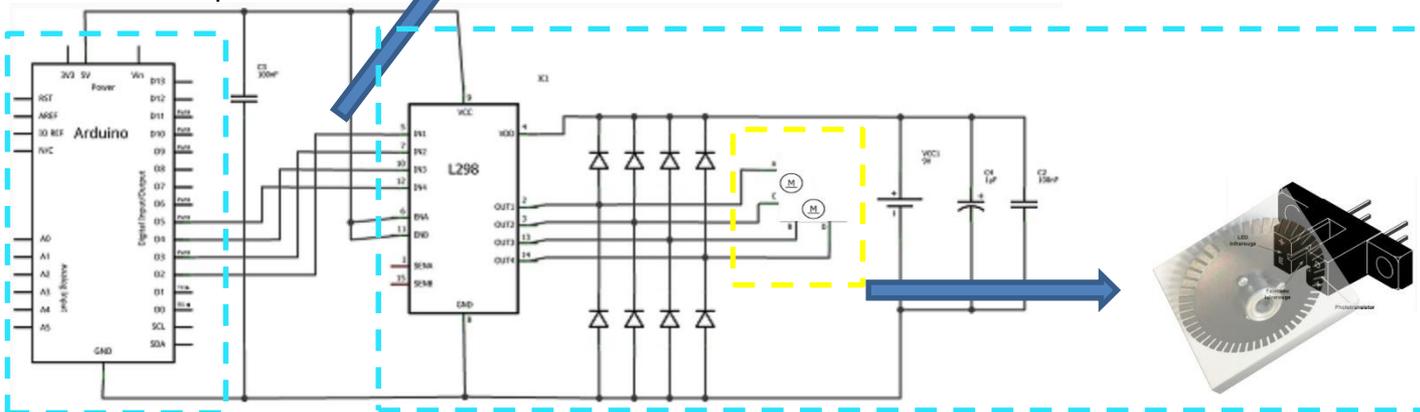
Mise En Œuvre possible sur Carte DEMO V1



USB – émulation de PORT COM
envoi vitesse et réception nb TIC

4 broches μ contrôleur Configurées en sorties logiques
(2 PWM + 2 pour activer/désactiver la puissance driver)

Incrémentation
compteur fonction
du nombre de tics,
recueil selon
période définie
puis envoi
de la valeur Timer
vers PC



Commande

Opérative

Actionneurs

Capteurs

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.2 Pilotage moteur continu => Asservissement / partie N°1.

Détermination des coefficients K_p , K_i et K_d selon la méthode empirique

ZIEGLER/NICHOLS en boucle fermée.

Le procédé en boucle fermée indique d'annuler les actions intégrales et dérivées puis de faire varier le coefficient K_p jusqu'à la limite de la stabilité du système, c'est-à-dire lorsque ce dernier oscille autour d'une consigne. Le gain critique nommé K_{pc} et la période d'oscillation T_c permettent d'obtenir les coefficients de régulation PID. (K_{pc} = alimentation moteur continu telles que DutyCycle PWM ou alimentation en tension)

```
Kp = Kp + 0,1;
```

```
For(i=0;i<X;i++){
```

```
compteur = TMR3L | (TMR3H << 8);
```

```
TMR3L = 0x00; TMR3H = 0x00;
```

```
erreur1 = VITMOT - compteur;
```

```
duty1 = Kp*erreur1; Delay(1);}
```

```
// Incréméntation de Kp
```

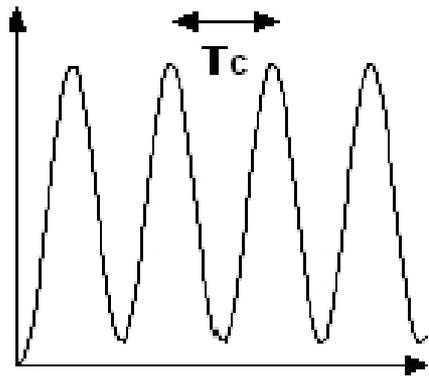
```
// boucle for pour acquérir X fois la vitesse moteur
```

```
// recueil et affectation de la valeur des 2 registres 8 bits de comptage
```

```
// remise à 0 des deux registres de comptage = début d'une période d'échantillonnage
```

```
// calcul de l'erreur entre la consigne de tic et celle mesurée
```

```
// Correction du duty cycle PWM => asservissement proportionnel => DT PWM change
```



Réponse du système en boucle fermée au gain critique K_{pc}

10/06/2025

Réglage des paramètres (boucle fermée)			
Régulateur	K_p	K_i	K_d
P	$0.5 K_{pc}$		
PI	$0.45 K_{pc}$	$0.83 T_c$	
PID	$0.6 K_{pc}$	$K_p * \left(\frac{1}{0.5 * T_c}\right)$	$K_p * 0.125 T_c$

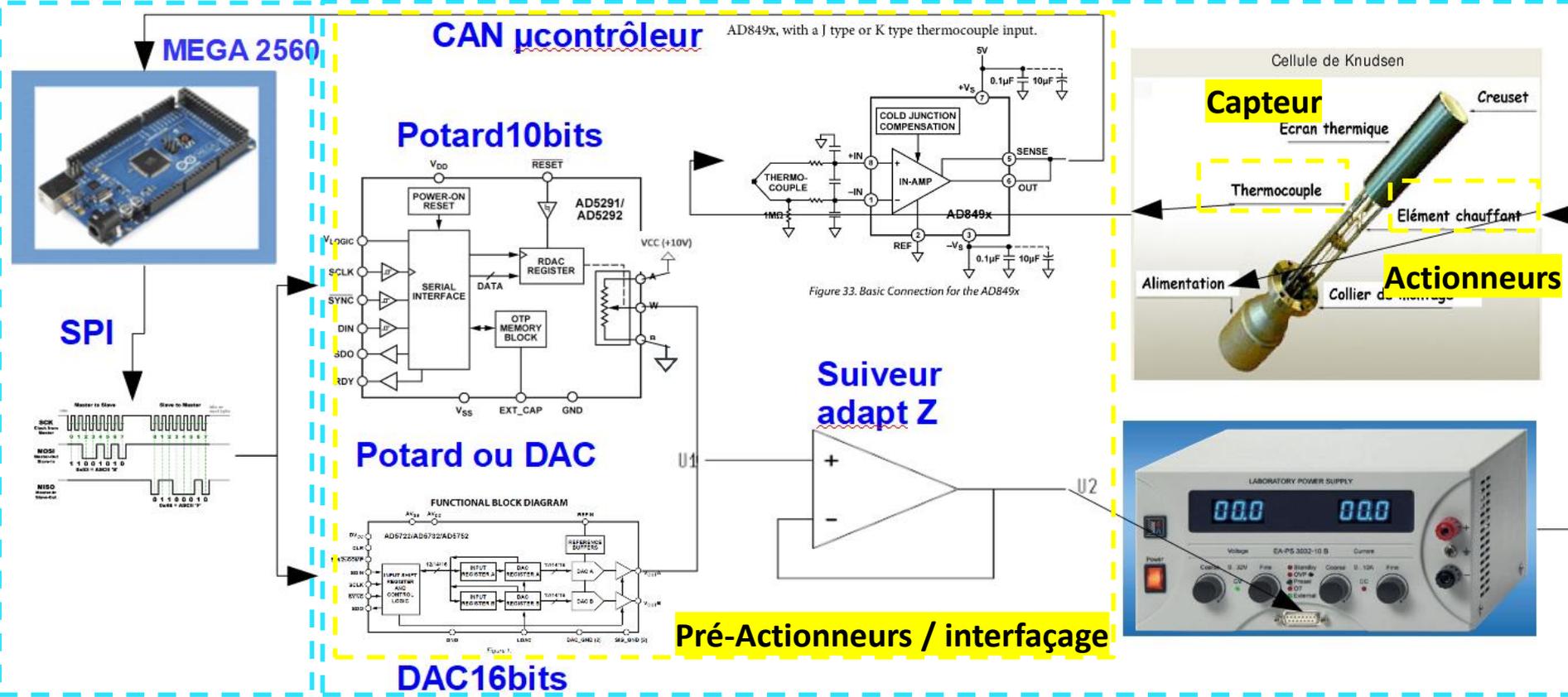
Recommandation pour le calcul de coefficients PID dans le cadre la méthode Ziegler-Nichols (boucle fermée)

Mise En Œuvre possible sur Carte DEMO V1 avec shield moteur

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.3 Mesure de température via thermocouple type K => Asservissement / partie N°2.



Commande

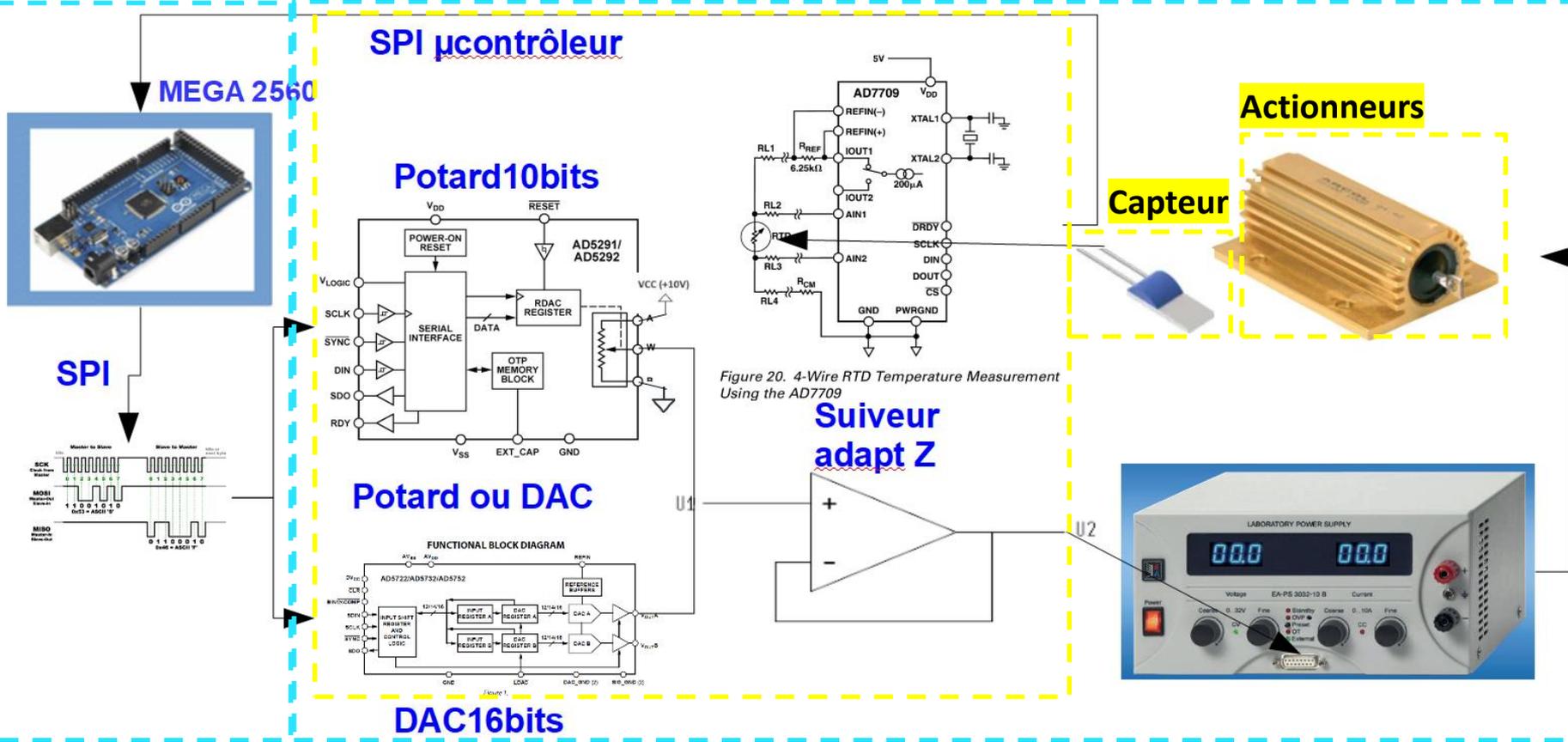
Opérative

Mise En Œuvre sur Carte DEMO V1 via PWM

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.4 Mesure de température via PT100 4 fils => Asservissement / partie N°2.



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

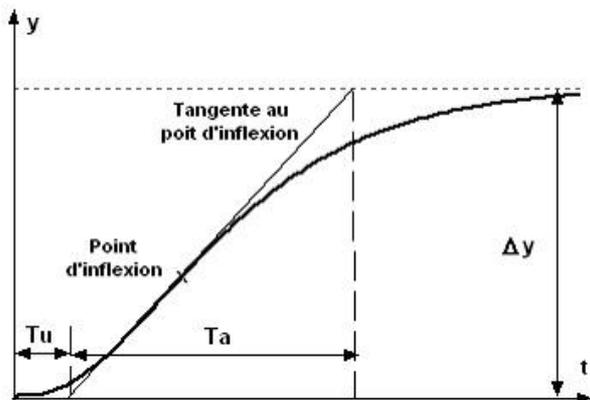
1.4 Asservissement en température / partie 2.

Détermination des coefficients K_p , K_i et K_d selon la méthode empirique ZIEGLER/NICHOLS en boucle ouverte.

Le procédé en boucle ouvert indique d'appliquer une consigne tout en mesurant à intervalle régulier la grandeur de sortie. La tangente au point d'inflexion permet de définir les trois coefficients (notés : K_p , K_i et K_d) (voir figures ci dessous) à l'aide du temps entre l'origine et le point d'intersection de la tangente avec l'abscisse noté T_u et T_a le temps entre les points d'intersection de la tangente avec l'abscisse et l'ordonnée de la consigne.

```

Usortie = XXVolts;           // On applique une tension aux bornes de la résistance
For(i=0;i<XXX;i++) {        // boucle for pour acquérir la température XXX fois
TEMP = analogRead(X);       // On mesure la température (attention, ici c'est une tension qu'il faut convertir en °C)
Tab[i] = TEMP;              // On enregistre dans un tableau les valeurs de température afin de tracer la courbe
Delay(100);}                // On attend 100ms puis on incrémente i et on mesure de nouveau la température
    
```



$$\text{float } K = (\text{max_} - \text{min_}) / 255;$$

Réglage des paramètres (boucle ouverte)			
Régulateur	K_p	K_i	K_d
P	$\left(\frac{T_a}{T_u}\right) * \left(\frac{1}{K}\right)$		
PI	$\left(\frac{T_a}{T_u}\right) * \left(\frac{0,9}{K}\right)$	$3.33 * T_u$	
PID	$\left(\frac{T_a}{T_u}\right) * \left(\frac{1,2}{K}\right)$	$K_p * (1 / (2.0 * T_u))$	$K_p * 0.5 * T_u$

Recommandation permettant de calculer les coefficients PID pour la méthode Ziegler-Nichols (boucle ouverte)

Mise en Œuvre possible sur Carte DEMO V1

Réponse indicielle d'un procédé à échelon unité

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.5 Pilotage PIEZO => micro endoscope / Projet MEMBO – MEVO – IMNC.

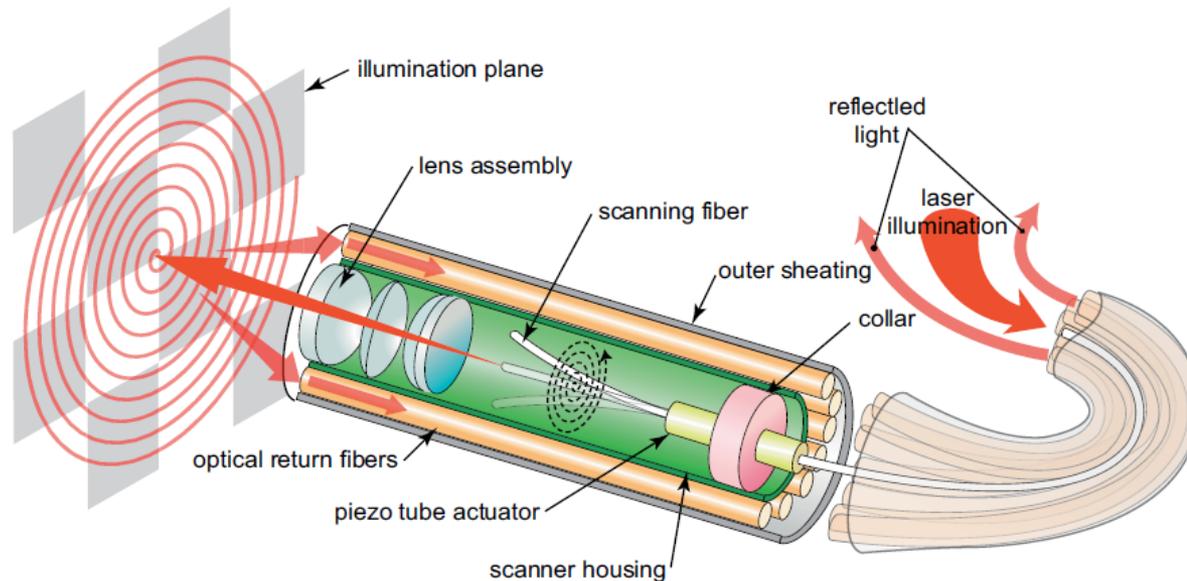
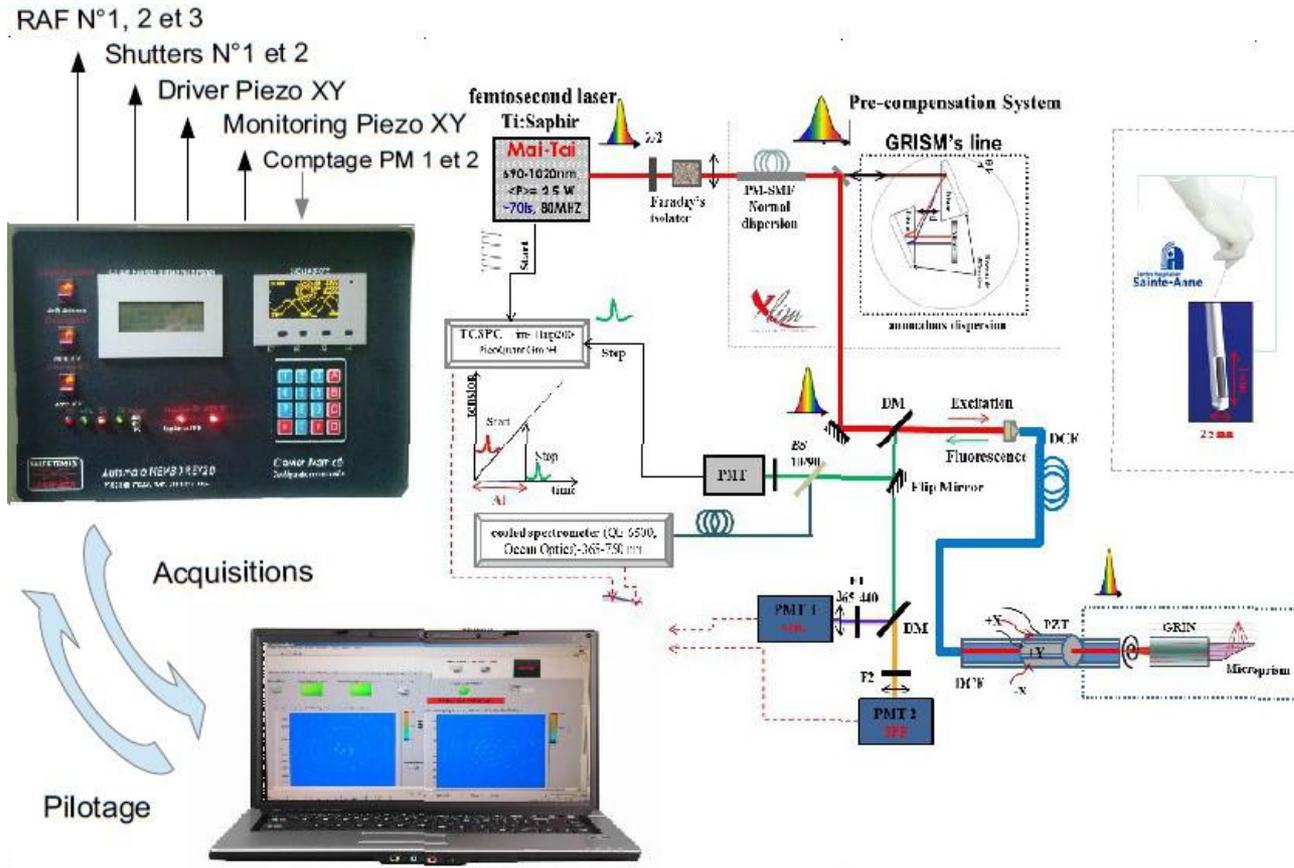


Schéma de principe du micro endoscope (adapté de Lee et al J Biophotonics 2010) comportant l'injection du laser dans une fibre double coeur, le système de balayage par piézoélectrique tubulaire, l'objectif multilentilles pour la focalisation du faisceau et la collection de la fluorescence. Sur ce schéma, la collection peut se faire alternativement par une couronne de fibres externes, plutôt que par la DCF, au détriment de la compacité du système.

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.5 Pilotage PIEZO => micro endoscope / Projet MEMBO – MEVO – IMNC.

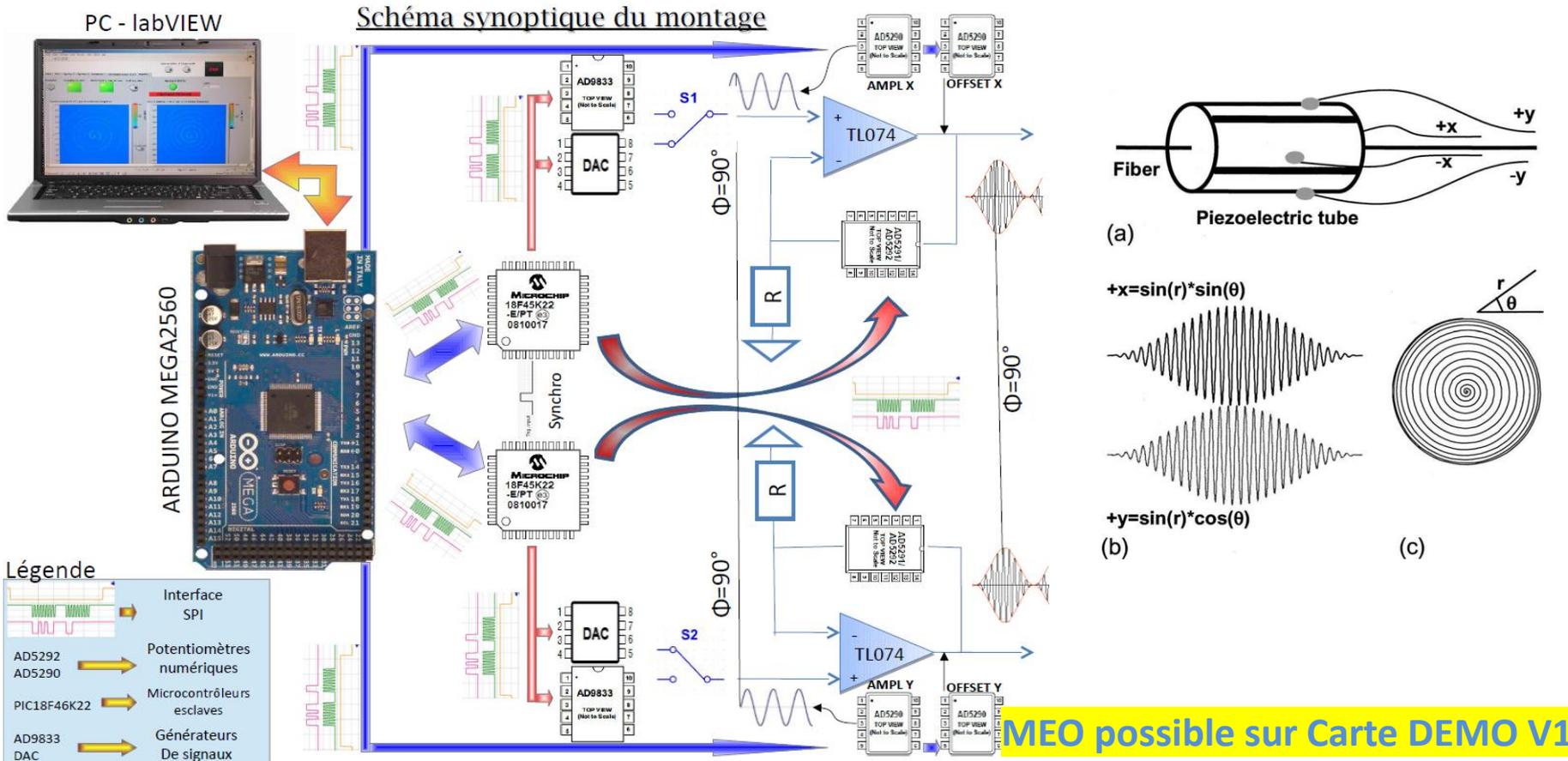


Synoptique du dispositif expérimental

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.5 Pilotage PIEZO => micro endoscope / Projet MEMBO – MEVO – IMNC.

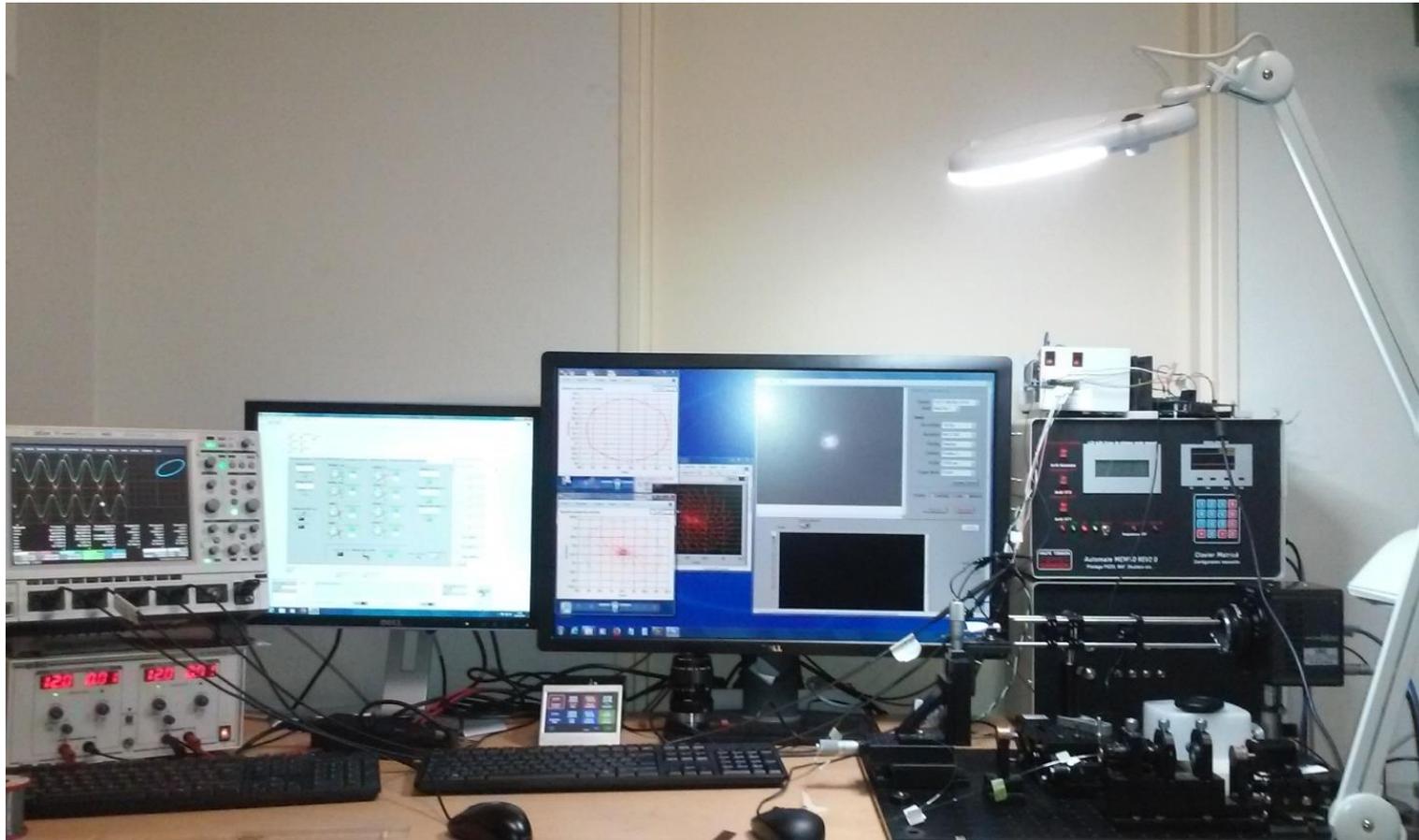


Synoptique de l'automate MEMBO

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.5 Pilotage PIEZO => micro endoscope / Projet MEMBO – MEVO – IMNC.

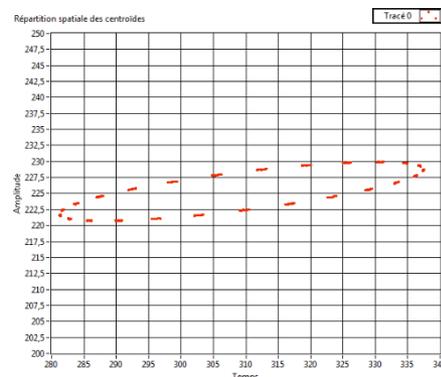
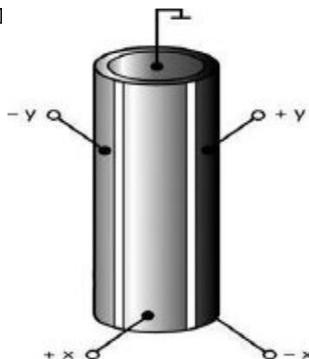
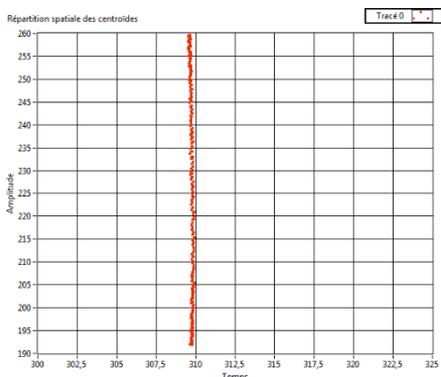
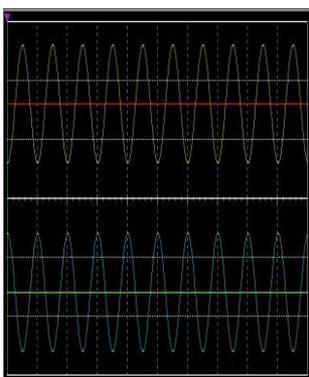


Dispositif de caractérisation de la trajectoire de la fibre multicœur

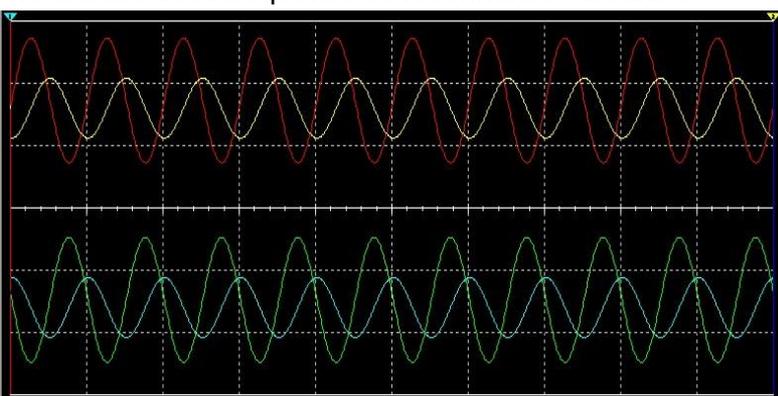
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

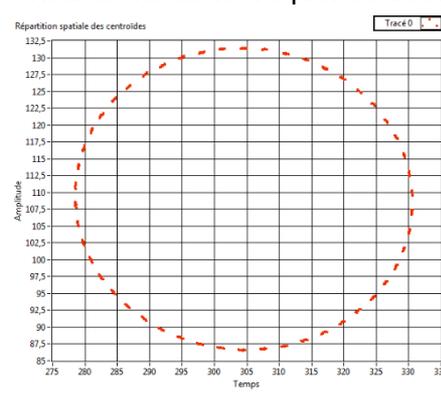
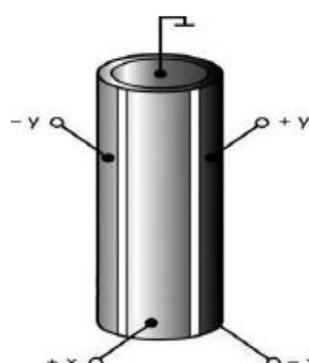
1.5 Pilotage PIEZO => micro endoscope / Projet MEMBO – MEVO – IMNC.



Recherche de la fréquence de résonance sur l'axe Y



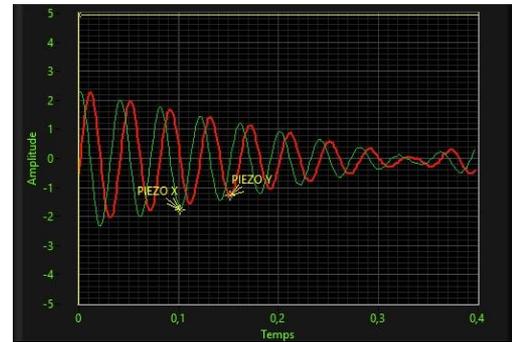
Recherche de la fréquence de résonance sur l'axe X



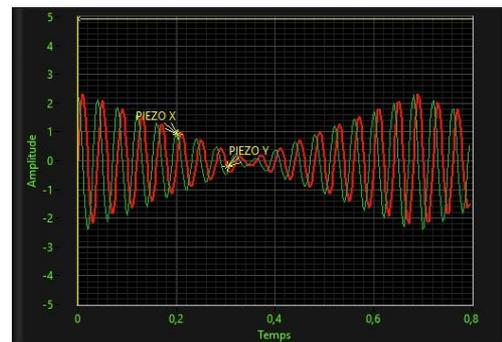
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

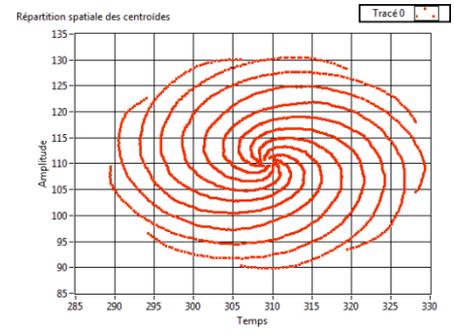
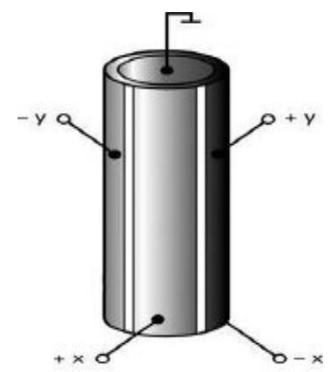
1.5 Pilotage PIEZO => micro endoscope / Projet MEMBO – MEVO – IMNC.



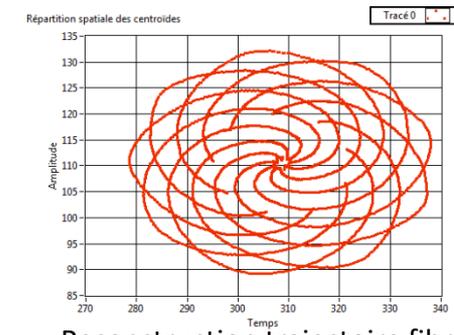
Modulation d'amplitude des signaux pilote appliqués sur les électrodes du tube PIEZO pour un aller simple



Modulation d'amplitude des signaux pilote appliqués sur les électrodes du tube PIEZO pour un aller retour
10/06/2025



Reconstruction trajectoire fibre en mode aller simple via calcul centroïdes faisceau (IMAQ/LabVIEW)



Reconstruction trajectoire fibre en mode aller/retour via calcul centroïde faisceau (IMAQ/LabVIEW)

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.6 Instrumentation projet « PIXSIC » – IMNC.

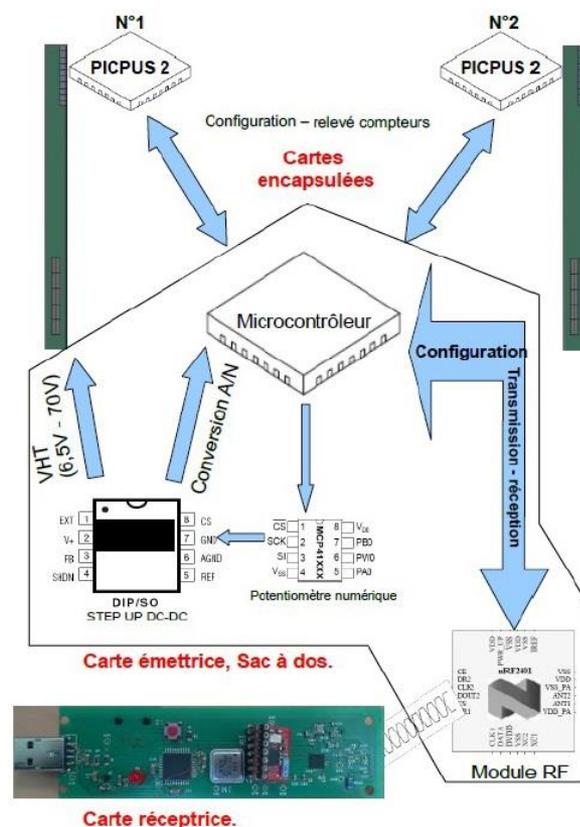
Contraintes

- Poids < 10%
- Dimensions < 25 x 35 mm²
- Autonomie >= 2 heures

Fonctions

- Fournir la tension de déplétion des détecteurs (20V – 70V)
- Configurer, recueillir les données des deux ASIC
- Envoi des données par liaison RF

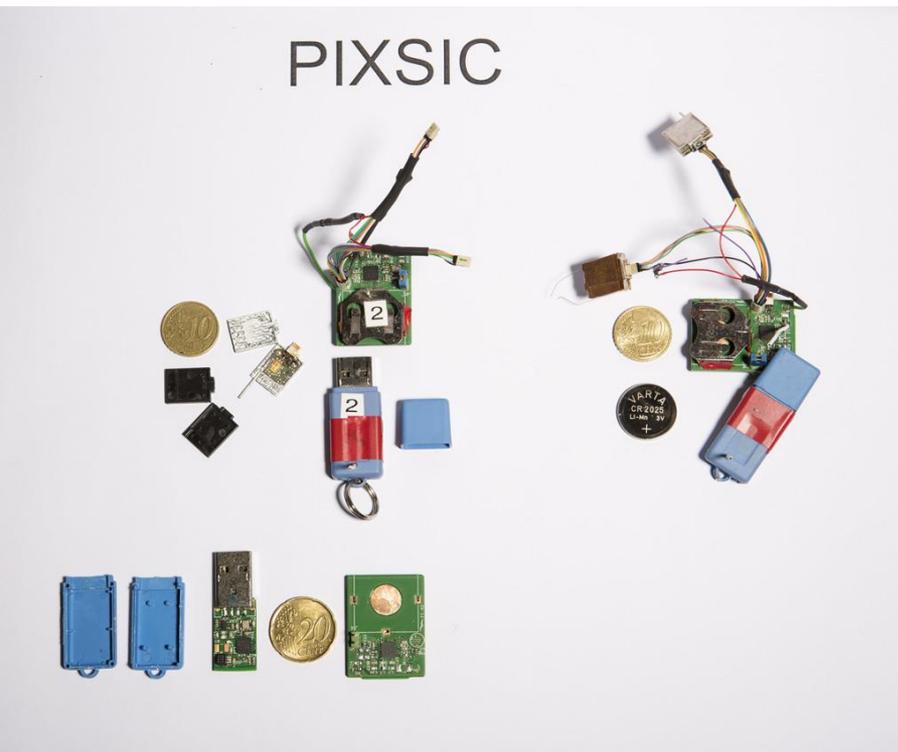
Synoptique du dispositif expérimental



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

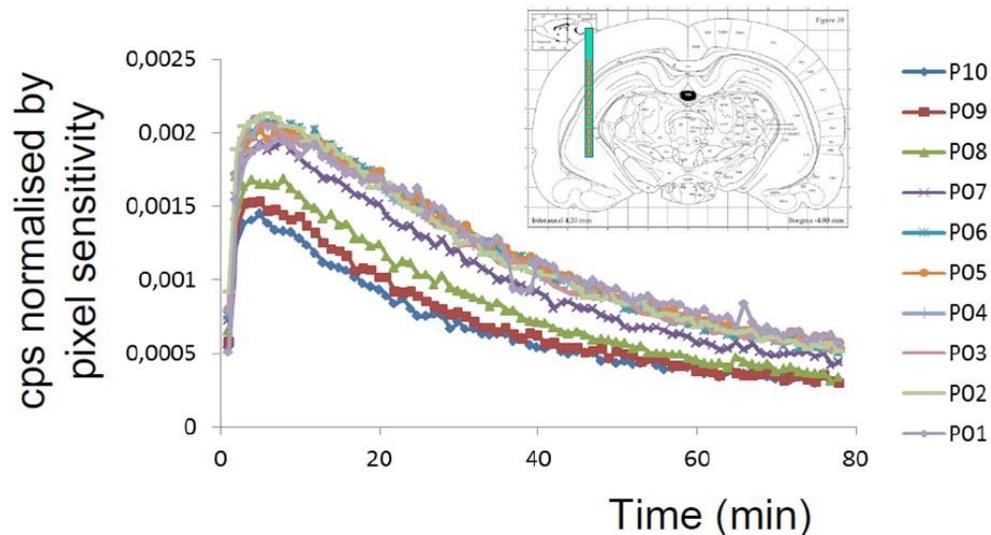
II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.6 Instrumentation projet « PIXSIC » – IMNC.



Échelle de la miniaturisation du dispositif électronique

Time activity curves were measured by PIXSIC in hippocampus after F18-MPPF injection



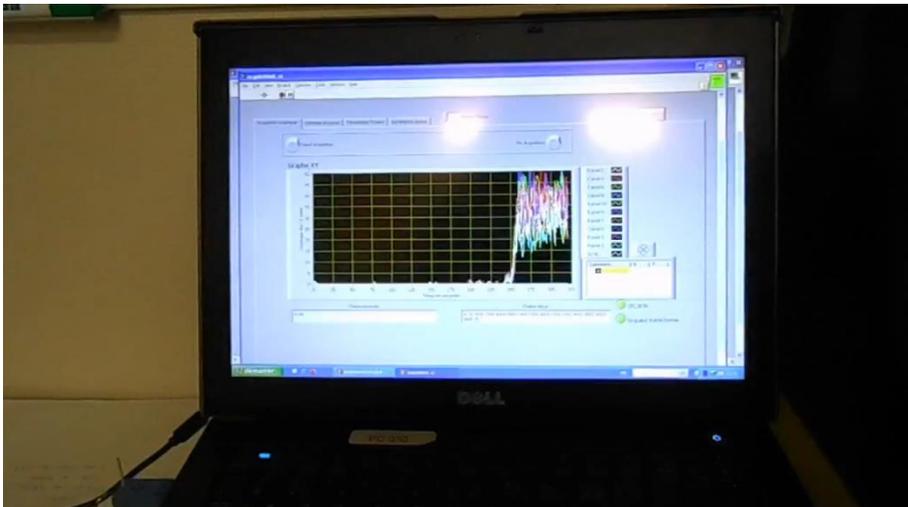
Validation Expérimentale

Mise En Œuvre tension de déplétion sur Carte DEMO V1

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

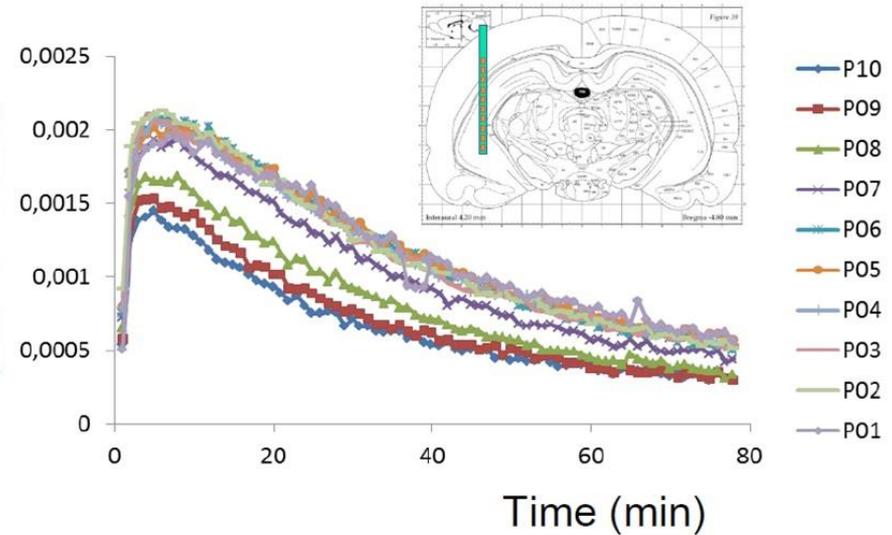
II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.6 Instrumentation projet « PIXSIC » – IMNC.



cps normalised by pixel sensitivity

Time activity curves were measured by PIXSIC in hippocampus after F18-MPPF injection



Validation Expérimentale

Échelle de la miniaturisation du dispositif électronique

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.7 Dendrométrie et études phénologiques – ESE.

- Delta circonférence
- Température
- Humidité Relative
- DewPoint
- Composantes RVB
- Basse consommation
- Communication RF

MEO partielle possible sur Carte DEMO V1

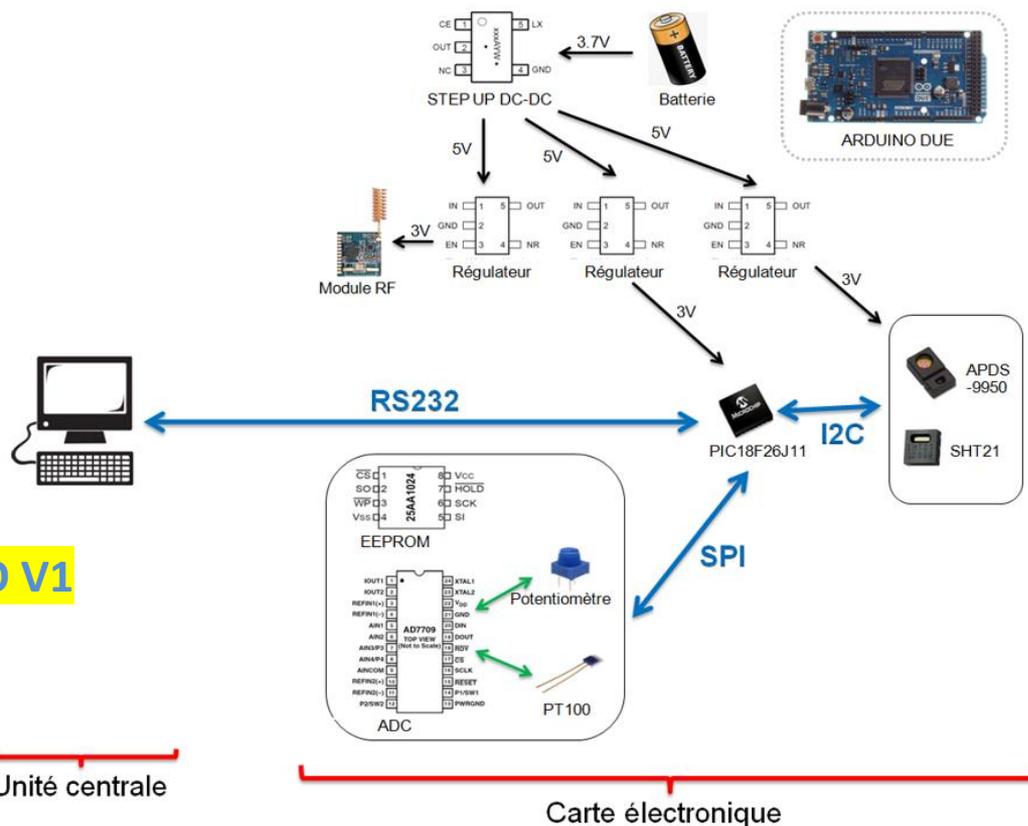


Figure 3. Synoptique général

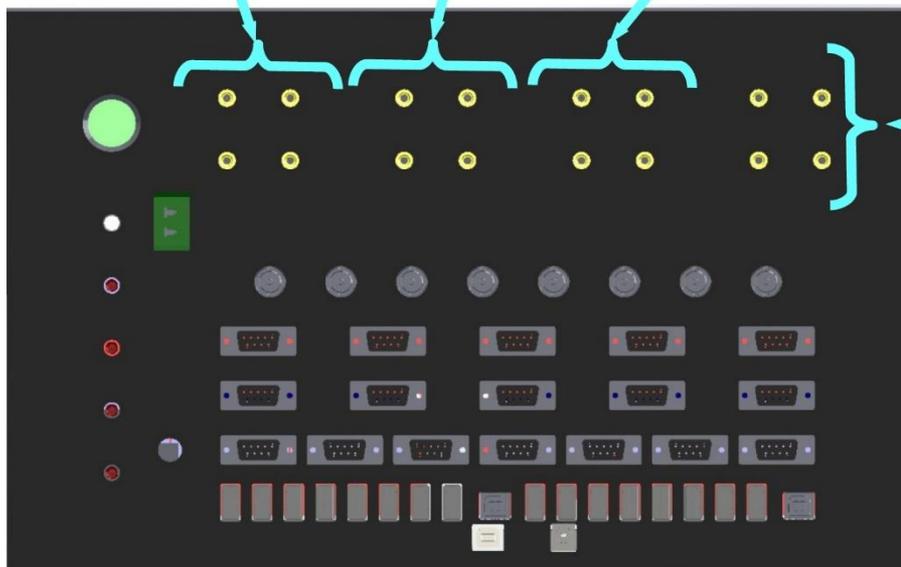
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.8 Projet « MONTANA » – MPQ / TELEM => <https://youtu.be/mtMdJmNLrpg>



Multiplexage 1 vers 3 => Alignement chaînes Est, Ouest, Sud



Driver actuateurs
PIEZO

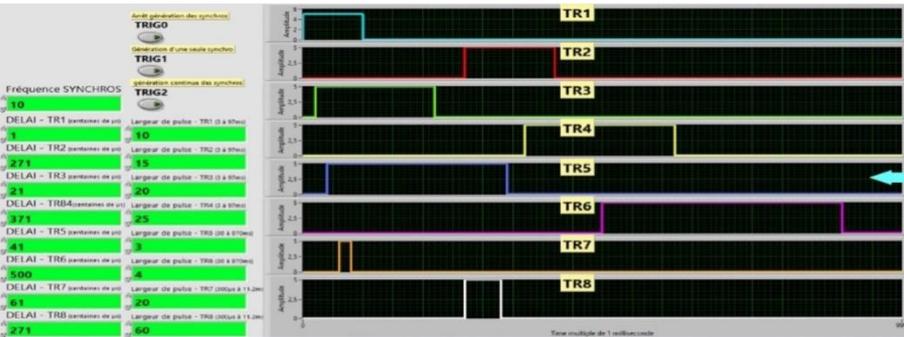
Economie de 1990 € HT

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

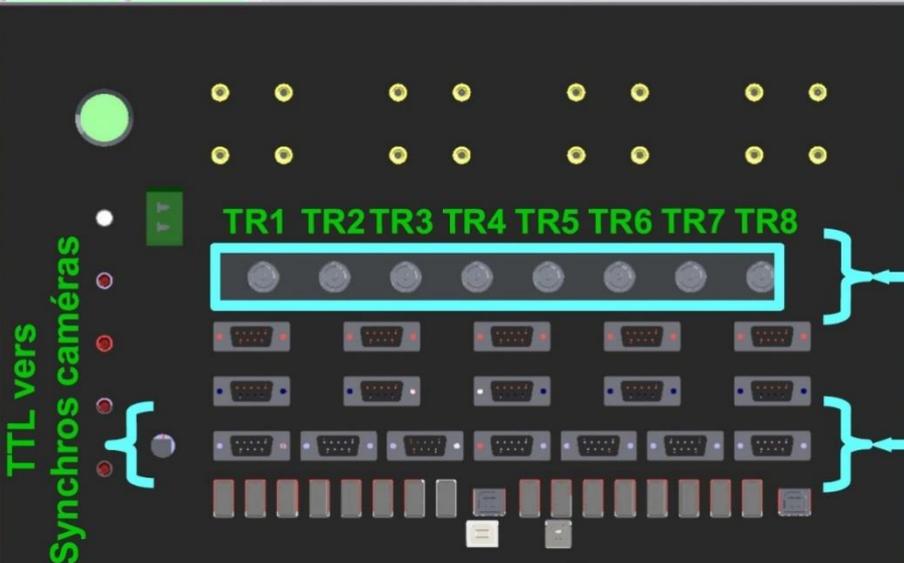
II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.8 Projet « MONTANA » – MPQ / TELEM => <https://youtu.be/mtMdJmNLrpg>

Mise en Œuvre sur Carte DEMO V1



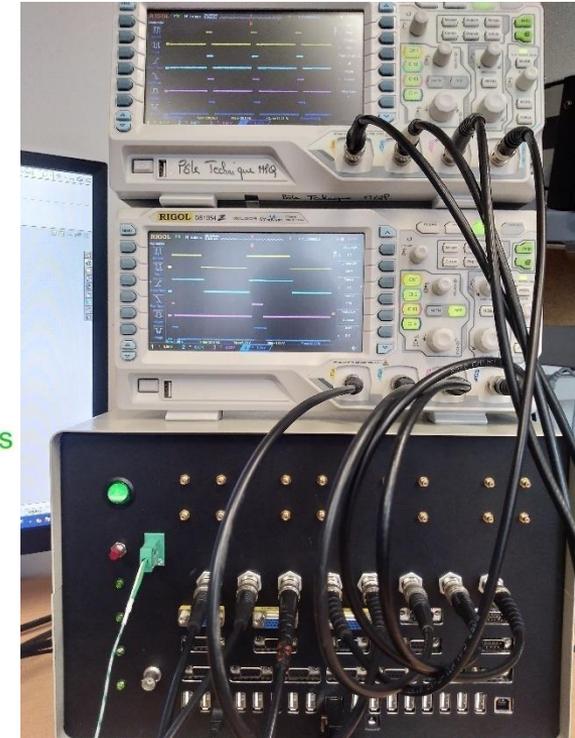
Pilotage LABVIEW
=> ARDUINO
=> MICROCHIP



8 synchros TTL indépendantes
réglables en fréquence,
délais et largeur de pulse

Multiplexage 1 vers 7
trigger caméras

Economie de +++
centaines € HT



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.8 Projet « MONTANA » – MPQ / TELEM => <https://youtu.be/mtMdJmNLrpg>

Remplaçables par

Multiplexage 1 vers 4 platines 25mm =>
Focalisation faisceaux sur échantillon
chaîne Sud, Ouest et Est
Et collimation en sortie de fibre

TR1 TR2 TR3 TR4 TR5 TR6 TR7 TR8

Multiplexage 1 vers 4
Platines en translation

Economie de 1944 € HT

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

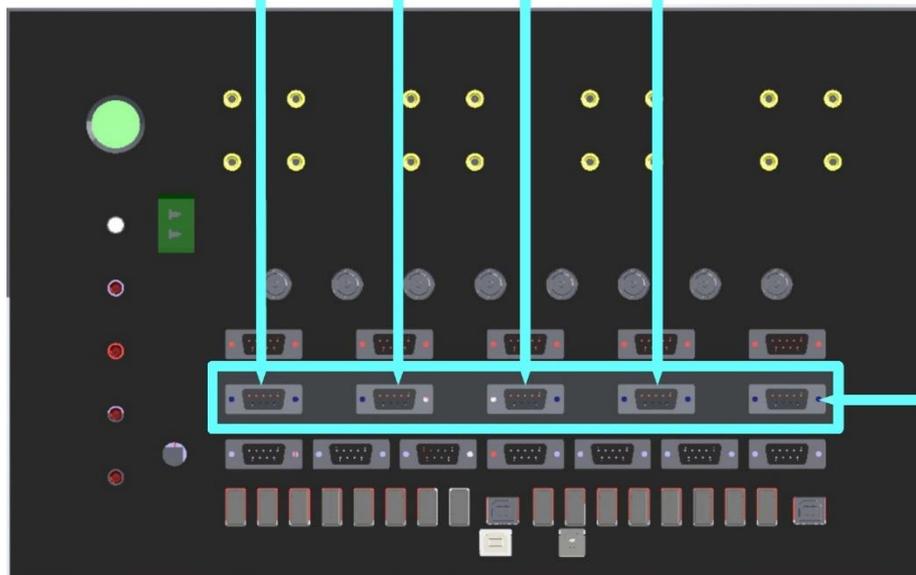
II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.8 Projet « MONTANA » – MPQ / TELEM => <https://youtu.be/mtMdJmNLrpg>

Remplaçables par tous les capteurs thermiques ou pyromètres THORLABS



Multiplexage 1 vers 4 détecteur => Mesures puissance chaîne Sud, Ouest et Est Si photodiode 400 – 1100nm 50nW - 50mW



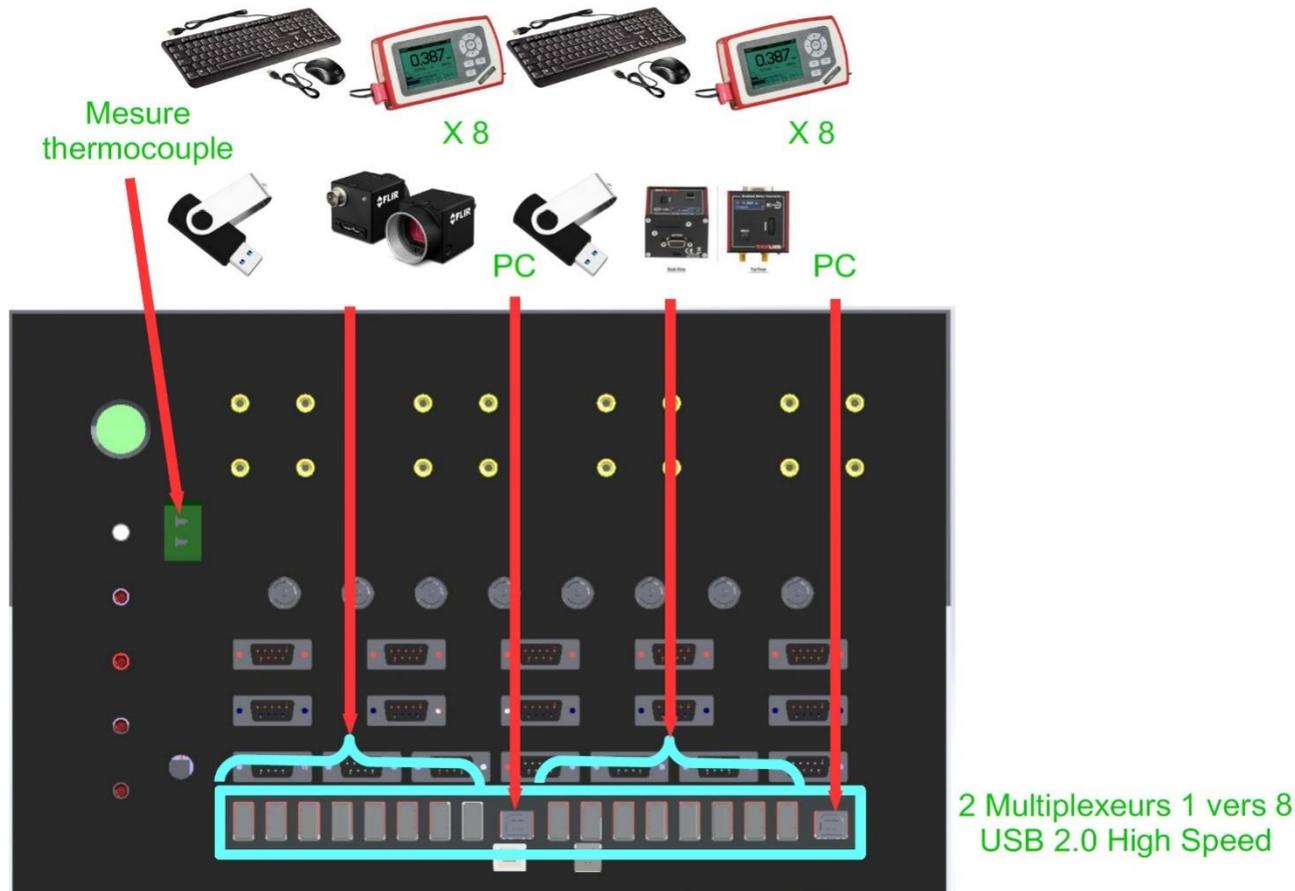
Multiplexage 1 vers 4 Puissance mètre - détecteurs

Economie de 3111 € HT

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.8 Projet « MONTANA » – MPQ / TELEM => <https://youtu.be/mtMdJmNLrpg>



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Exemples d'applications pour l'instrumentation

1.9 Évaporateur avec Flux Intégré – MPQ / STM

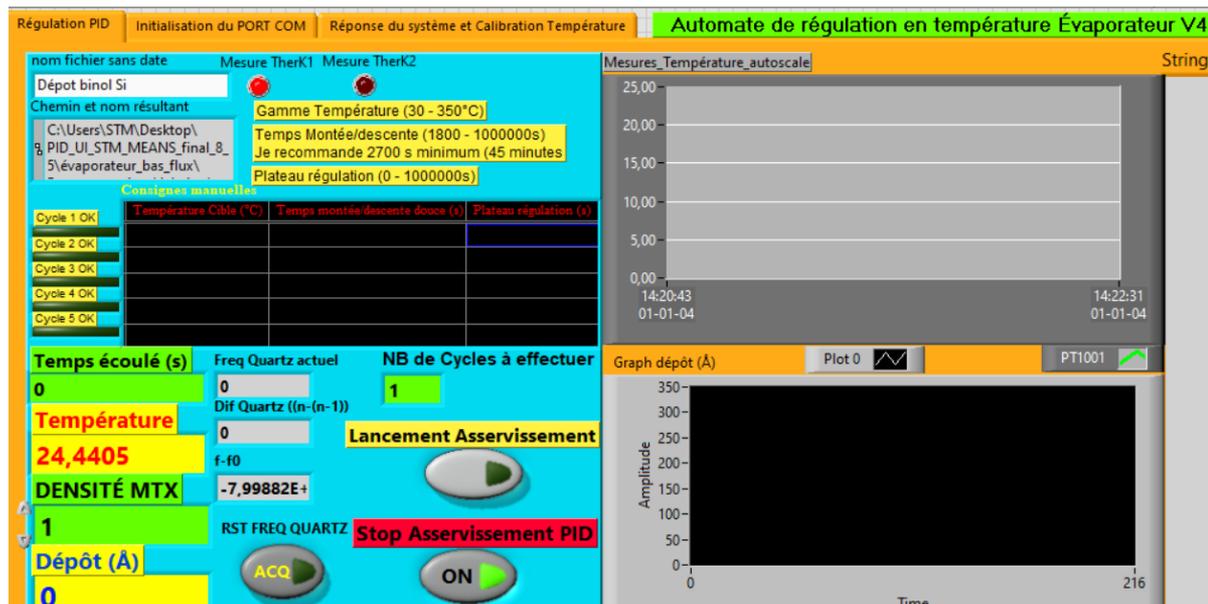


Évaporateur basse température avec Flux Intégré



Électronique de calibration - de régulation en température et de calcul du flux

10/06/2025



IHM LabVIEW

Mise en Œuvre possible sur Carte DEMO V1

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.1 Cahier Des Charges

- Mesure des variations de circonférence des troncs à 1m30 toutes les 10 minutes
- Mesure précise de température via PT100 en mode 4 fils ($\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ dans la gamme $-40 \sim +50^{\circ}\text{C}$)
- Mesure de la température et de l'humidité relative toutes les 10 minutes
- Acquisitions optiques des composantes RGB sous couvert toutes les 10 minutes
- Interruption matérielle toutes les 10 minutes via RTC (dérive inférieure à 10s par semaine)
- Envoi de ces données par modulation RF une fois par semaine (portée > 1000 mètres sans obstacles)

 **Etude Technique**

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.2 Cahier Des Charges Fonctionnel

Référence	Contraintes	Unité de mesure	Mémoire nécessaire (en octets)	Fréquence des mesures	Interface(s)	Coûts	Délais approvisionnement
Potentiomètre	Codé sur 16 bits	Volts	2 octets	Une mesure toute les 10 minutes	A/N	Economique (X € HT)	En STOCK
PT100	Codé sur 16 bits	Volts	2 octets	Une mesure toute les 10 minutes	A/N	Economique (X € HT)	En STOCK
DHT22	RH ±2% (-20/80°C)	%RH	2 octets	Une mesure toute les 10 minutes	UNIWIRES	Economique (X € HT)	1 mois
	T°C ±0.5°C (-20/80°C)	°C	2 octets				
SHT21	RH ±2% (5/+80°C)	%RH	2 octets	Une mesure toute les 10 minutes	I2C	Coûteux (XX e HT)	3 jours
	T°C ±0.5°C (-20/80°C)	°C	2 octets				
TCS230	Codé sur 16 bits	% couleur Rouge, Vert, Bleu, Clear	R 1 octets G 1 octets B 1 octets C 1 octets	Une mesure toute les 10 minutes	4 IO microcontrôleur	Economique (X € HT)	En STOCK
APDS-9950	Codé sur 16 bits	% couleur Rouge, Vert, Bleu, Clear	R 2 octets G 2 octets B 2 octets C 2 octets	Une mesure toute les 10 minutes	I2C	Coûteux (XX e HT)	3 jours
DS3231	Dérive inférieur à 10 secondes par semaine	Date, Heure, minute, seconde	7 octets	Une interruption toute les 10 minutes	I2C	Coûteux (XX e HT)	10 jours
PIC18F26J11	Dérive RTCC dépend du quartz	Date, Heure, minute, seconde	6 octets (adresse + CRC) + 3 octets sécu	Une interruption toute les 10 minutes	DeepSleep - 13nA et 850nA avec RTCC, 2 SPI / I2C, RTCC fonction, 4 IRQ, oscillateur interne,	Coûteux (XX e HT)	2 jours
SI4432	-Taux de transmission > 1600 octets/s -Portée sans obstacle > 1000 mètres	Ko/s Mètres		1 fois par semaine	SPI + 3 IO microcontrôleur	Economique (X € HT)	En STOCK
Total taille buffer capteurs coûteux versus économique		octet	32 octets / 28 octets				
EEPROM 25AA1024	222 jours d'acquisition avec acquisition toutes les 10 minutes	Ko	1024 Ko	Rapatriement des mesures 1 fois par semaine	SPI	Economique (X € HT)	3 jours

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.2 Cahier Des Charges Fonctionnel

- Utiliser de préférence des composants déjà mis en œuvre si ils ne sont pas sous-dimensionnés et/ou obsolètes
- Sinon, effectuer une mise en œuvre (même rapide) des périphériques microcontrôleur à utiliser et les composants interfacés avec ce dernier via un breadboard de prototypage ou carte de démonstration avant de concevoir une carte électronique.
- Faire une étude des coûts et des délais d'approvisionnement (composants, PCB, câblage si sous-traité, programmation microcontrôleur et IHM, câblage et intégration, sérigraphie etc.)

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.3 Dimensionnement microcontrôleurs : MICROCHIP / MAPS

The screenshot displays the Microchip Advanced Part Selector interface. On the left, the 'Parameter Search' section is active, showing filters for Family, Part Family, CPU Type, Max CPU Speed, CPU Speed, ARM Neon, Math Accelerator, Voltage, Temperature, Packages, and Memory Data. The search criteria are set to 'Match ALL (AND)'. The 'Search Results' section on the right shows 2202 MCHP parts found, with the SAM9X60D1G-I/LZB selected. A table of specifications is visible, including Family (32-bit MPU), CPU Type (ARM926), Max CPU Speed (600 MHz), FPU, Operation Voltage (3V-5.5V), Temp Range (40 to +85), Pin Count (152), Program Memory Size (512000), Error Correction Code Program Flash, SRAM (125000 KB), Data EEPROM/HEF (Bytes), Internal DRAM Type (DDR2), Internal DRAM Amount (128), Low Power, ADC Input (0), Max ADC Resolution (Bits), DAC Outputs, Number of Op Amps, Hardware Touch Peripheral (PTC), UART, SPI, I2C, I2S, and SSC.

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.3 Dimensionnement microcontrôleurs : MICROCHIP / MAPS

Parameter Search Match ALL (AND) Match ANY (OR) Collapse

Family	32-bit MCU	<input type="checkbox"/> 8-bit	--- Product Status ---
Part Family	PIC32MZEF	<input type="checkbox"/> 16-bit	<input checked="" type="checkbox"/> Current
CPU Type	32-bit MIPS MCU	<input checked="" type="checkbox"/> 32-bit	<input checked="" type="checkbox"/> Future <input type="checkbox"/> Mature
Max CPU Speed (MHz)	252 MHz	-All-	
CPU Speed (MIPS/DMIPS)	-All-	-All-	
<input type="checkbox"/> ARM Neon		<input type="checkbox"/> FPU	
<input type="checkbox"/> Math Accelerator			
Voltage			
Operation Voltage	-All-	-All-	
Temperature			
Temp Range	-All-	-All-	
Packages			
Pin Count	64	-All-	
Max I/O Pins	45	-All-	
Memory Data			
Program Memory Size (KB)	1024	2048	Internal DRAM Type -All-
Program Memory Size (KWords)	-All-	-All-	External Memory Bus Interface -All-
Auxiliary Flash (KB)	-All-	-All-	DRAM Interface -All-
SRAM (KB)	64	-All-	<input type="checkbox"/> Multiple Flash Panels

Architecture 32 bits
Fréquence de cadencement

Nombre de broches boîtier
Nombre de GPIO

Taille de la FLASH

Taille de la RAM

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.3 Dimensionnement microcontrôleurs : MICROCHIP / MAPS

Nombre de CAN



Nbre d'échantillons / s



Nbre de périphérique UART



Nbre de périphérique SPI



Analog Peripherals

ADC Input: 7

Max ADC Resolution (Bits): -All-

DAC Outputs: -All-

Number of Op Amps: -All-

Max ADC Sampling Rate (ksps): 18000

Max ADC Sample/Hold: -All-

Diff ADC Inputs: -All-

Number of DACs: -All-

Max DAC Resolution (Bits): -All-

Number of Comparators: -All-

Comparator max speed (ns): -All-

Programmable Gain Amp: -All-

Slope Compensation / Programmable Ramp Generator: -All-

Temp Sensor

CTMU

Zero Cross Detect

Touch

Hardware Direct Touch Channel Buttons: -All-

Hardware Touch Matrix Nodes: -All-

Hardware Touch Peripheral: -All-

Hardware Cap Voltage Divider

Touch Library Support

Resistive Touch Controller

Communication

UART: 4

SPI: 4

I2C: -All-

I2S: -All-

SSC: -All-

Références match



Spécifications techniques



Search Results 3 MCHP parts found

PIC32MZ2048EFH144

PIC32MZ2048EFH100

PIC32MZ2048EFH064

Reset Search

Sort Results by: Memory Size

Add PIC32MZ2048EFH144

Go to side-by-side

Automotive Capable:

PIC32MZ2048EFH144		In Production
Specifications	Dev Tools	Budgetary Pricing
Family		32-bit MCU
CPU Type		32-bit MIPS MCU
Max CPU Speed (MHz)		252 MHz
FPU		Yes
Operation Voltage		(2.2V-3.6V)
Temp Range		(-40 to +125)
Pin Count		144
Program Memory Size (KB)		2048
Error Correction Code Program Flash		
SRAM		512 KB
Data EEPROM/HEF (Bytes)		
Internal DRAM Type		
Internal DRAM Amount (MB)		
Low Power		
ADC Input		48
Max ADC Resolution (Bits)		12
DAC Outputs		
Number of Op Amps		
Hardware Touch Peripheral		HCVD
UART		6
SPI		6
I2C		5
I2S		6
SSC		
Number of USB Modules		1
USB Interface		High Speed
Number of CAN Modules		2
Type of CAN module		CAN
Ethernet		10/100 Base-TX Mac
Max 8-Bit Digital Timers		
Max 16-Bit Digital Timers		9
Max 32-Bit Digital Timers		4
Hardware RTCC/RTC		RTCC
Max PWM outputs (including complementary)		
Number of PWM Time Bases		
Crypto Engine		
ARM Trust Zone		
Segmented LCD		
Graphics Controller/GPU		
Video Decoder		

Show Other Features

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.3 Dimensionnement microcontrôleurs : MICROCHIP / ATMEL / ARDUINO

The screenshot shows the Arduino.cc website. The browser address bar displays 'arduino.cc/en/hardware'. The navigation menu includes 'PROFESSIONAL', 'EDUCATION', 'STORE', 'HARDWARE', 'SOFTWARE', 'CLOUD', 'DOCUMENTATION', 'COMMUNITY', 'BLOG', and 'ABOUT'. A search bar is located in the top right corner. The main content area features a 'TABLE OF CONTENTS' sidebar with links to 'Kits', 'Nano Family', 'MKR Family', 'Boards', 'Shields', 'Classic Family', 'Boards', 'Shields', 'Mega Family', and 'Retired'. The main text area is titled 'Arduino Hardware' and contains the following text: 'Arduino has over the years released over 100 hardware products: boards, shields, carriers, kits and other accessories. In this page, you will find an overview of all active Arduino hardware, including the Nano, MKR and Classic families.' Below the text is a large image of an Arduino Pro board with the text 'Arduino Pro' overlaid.

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.3 Dimensionnement microcontrôleurs : STMicroelectronics

<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>

STM32 MCUs
 32-bit Arm® Cortex®-M

 High Performance	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32F2</div> <div style="font-size: 8px;">398 CoreMark 120 MHz Cortex-M3</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32F4</div> <div style="font-size: 8px;">608 CoreMark 180 MHz Cortex-M4</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32H5</div> <div style="font-size: 8px;">Up to 1023 CoreMark 250 MHz Cortex-M33</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32F7</div> <div style="font-size: 8px;">1082 CoreMark 216 MHz Cortex-M7</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32H7</div> <div style="font-size: 8px;">Up to 3224 CoreMark Up to 550 MHz Cortex-M7 240 MHz Cortex-M4</div>
 Mainstream	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32C0</div> <div style="font-size: 8px;">114 CoreMark 48 MHz Cortex-M0+</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32F0</div> <div style="font-size: 8px;">106 CoreMark 48 MHz Cortex-M0</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32F1</div> <div style="font-size: 8px;">177 CoreMark 72 MHz Cortex-M3</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32G4</div> <div style="font-size: 8px;">569 CoreMark 170 MHz Cortex-M4</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32F3</div> <div style="font-size: 8px;">245 CoreMark 72 MHz Cortex-M4</div>
 Ultra-low-power	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32L0</div> <div style="font-size: 8px;">75 CoreMark 32 MHz Cortex-M0+</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32L4</div> <div style="font-size: 8px;">273 CoreMark 80 MHz Cortex-M4</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32L5</div> <div style="font-size: 8px;">443 CoreMark 110 MHz Cortex-M33</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32L4+</div> <div style="font-size: 8px;">409 CoreMark 120 MHz Cortex-M4</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32U5</div> <div style="font-size: 8px;">651 CoreMark 160 MHz Cortex-M33</div>
 Wireless	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32WL</div> <div style="font-size: 8px;">162 CoreMark 48 MHz Cortex-M4 48 MHz Cortex-M0+</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32WB0</div> <div style="font-size: 8px;">64 MHz Cortex-M0+</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32WB</div> <div style="font-size: 8px;">216 CoreMark 64 MHz Cortex-M4 32 MHz Cortex-M0+</div>	<div style="background-color: #ffff00; padding: 2px; font-size: 8px; margin-bottom: 2px;">STM32WBA</div> <div style="font-size: 8px;">407 CoreMark 100 MHz Cortex-M33</div>	<div style="font-size: 8px;">Optimized for mixed-signal applications</div>

● Cortex-M0+ Radio co-processor

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.3 Dimensionnement microcontrôleurs : Analog Devices

<https://www.analog.com/en/parametricsearch/10984#/>

Microcontrollers

Part Number	Analog.com Inventory	MCU Core Technology	Clock Max Speeds	Memory SRAM on chip	GPIO pins	1ku List Price \$ US	Package
<input type="checkbox"/> ADUCM356 NEW	40	ARM Cortex-M3	26 MHz	64 kB	-	\$12.08 (ADUCM356BCCZ)	72-Terminal 6 x 5 mm Land Grid Array [LGA]
<input type="checkbox"/> ADUCM342 NEW		ARM Cortex M3	16.384 MHz	6 kB	6	\$6.48 (ADUCM342WFSBCPZ-RL)	32-Lead LFCSP (6mm x 6mm x 0.95mm w/ EP)
<input type="checkbox"/> MAX32662 NEW	10773	ARM Cortex M4F	100MHz	80 kB	21	\$2.50 (MAX32662GTJ+)	32-LFCSP-5X5X0.75
<input type="checkbox"/> MAX32690 NEW	3751	ARM Cortex M4F	120MHz	1024 kB	104	\$9.18 (MAX32690GWE+T)	68-LFCSP-8X8X0.75,140-WLCSP-N/A
<input type="checkbox"/> MAX78002	4683	ARM Cortex-M4F	120MHz	384 kB	60	\$37.45 (MAX78002GXE+)	144-CSP_BGA-12X12X1.3
<input type="checkbox"/> MAX32672	17324	ARM Cortex-M4F	100MHz	200 kB	42	\$4.01 (MAX32672GTL+)	Thin Quad Flatpack, No Leads,56-LFCSP-7X7X0.75
<input type="checkbox"/> MAX32675		ARM Cortex-M4F	100MHz	160 kB	23	\$5.24 (MAX32675ATK+)	68-LFCSP-8X8X0.75
<input type="checkbox"/> MAX32680		ARM Cortex-M4F	100MHz	128 kB	36	\$8.09 (MAX32680GLR+)	88-LGA-10X10X0.91
<input type="checkbox"/> ADUCM410	871	ARM Cortex-M33	160 MHz	128 kB	46	\$18.83 (ADUCM410BBCZ)	81-Ball CSP-BGA (5mm x 5mm x 0.85mm),64-Ball LFCWLCSP (3.46mm x 3.46mm x 0.5mm)
<input type="checkbox"/> ADUCM420	Check Distributor Inventory	ARM Cortex-M33	160 MHz	64 kB	28	\$9.42 (ADUCM420BCBZ-RL)	64-Ball LFCWLCSP (3.46mm x 3.46mm x 0.5mm)
<input type="checkbox"/> MAX32663A	16934	ARM Cortex-M4F	96MHz	96 kB	-	\$8.98 (MAX32663AGTGFS+)	Thin Quad Flatpack, No Leads
<input type="checkbox"/> MAX32655	3613	ARM Cortex-M4F	100MHz	128 kB	52	\$4.87 (MAX32655GXG+)	81-CSP_BGA-8X8X1.17

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

II. Dimensionnement du microcontrôleur

2.3 Dimensionnement microcontrôleurs : Texas Instruments

<https://www.ti.com/microcontrollers-mcus-processors/products.html>

Microcontrollers (MCUs) & processors

All filters Columns Reset table 1,213 of 1,213 total products

Email Download Excel Log in to view inventory Log in

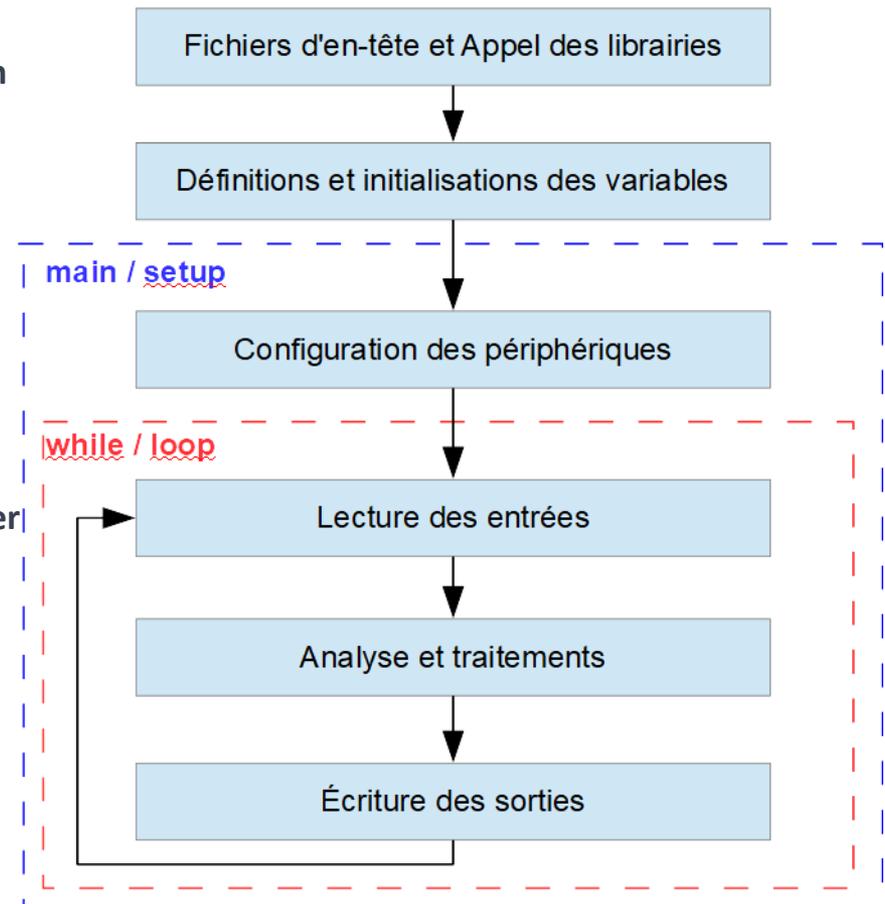
Product number	Images	Subcategory	Rating	TI functional safety category	Operating temperature range (°C)	Package type	Pin count	Package area (mm ²)	Package size (L x W) (mm)	Price/Quantity (USD)	Status
<input type="checkbox"/> MSPM0G1105 – NEW Data sheet: PDF HTML View alternates		Arm Cortex-M0+ MCUs	Catalog	–	-40 to 105	LQFP	48	81	9 x 9	\$0.740 1ku	ACTIVE
<input type="checkbox"/> MSPM0G1107 – NEW Data sheet: PDF HTML		Arm Cortex-M0+ MCUs	Catalog	–	-40 to 105	LQFP, VQFN	24, 48, 64	16, 81, 144	12 x 12, 4 x 4, 9 x 9	\$0.920 1ku	ACTIVE
<input type="checkbox"/> MSPM0G1505 – NEW Data sheet: PDF HTML View alternates		Arm Cortex-M0+ MCUs	Catalog	–	-40 to 125	LQFP, VQFN	24, 48, 64	16, 81, 144	12 x 12, 4 x 4, 9 x 9	\$0.790 1ku	ACTIVE
<input type="checkbox"/> MSPM0G1506 – NEW Data sheet: PDF HTML View alternates		Arm Cortex-M0+ MCUs	Catalog	–	-40 to 125	LQFP, VQFN	24, 48, 64	16, 81, 144	12 x 12, 4 x 4, 9 x 9	\$0.850 1ku	ACTIVE
<input type="checkbox"/> MSPM0G3505 – NEW Data sheet: PDF HTML View alternates		Arm Cortex-M0+ MCUs	Catalog	–	-40 to 125	LQFP, VQFN	32, 48, 64	25, 81, 144	12 x 12, 5 x 5, 9 x 9	\$0.830 1ku	ACTIVE
<input type="checkbox"/> MSPM0G3506 – NEW Data sheet: PDF HTML View alternates		Arm Cortex-M0+ MCUs	Catalog	–	-40 to 125	LQFP, VQFN	32, 48, 64	25, 81, 144	12 x 12, 5 x 5, 9 x 9	\$0.890 1ku	ACTIVE
<input type="checkbox"/> AM625SIP – NEW Data sheet: PDF HTML		Arm-based processors	Catalog	–	-40 to 95	FCCSP	425	169	13 x 13	\$29.950 1ku	PREVIEW

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.1 Architecture générale d'un programme en C pour microcontrôleur

- Les fichiers d'en-tête et les bibliothèques regroupent la définition des registres écrits ou lus durant l'exécution du programme et certaines fonctions spécifiques
- Les variables globales seront positionnées dans la FLASH, il faut donc s'assurer que la capacité mémoire sera suffisante
- La fonction main est la fonction principale du programme. Elle marque le début du programme
- La configuration des périphériques consiste à initialiser des communications séries, configurer les broches en entrées ou sorties etc.
- La boucle while ou loop met en œuvre le programme qui sera être exécuté en continu



Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.2 Les environnements de développement MICROCHIP : MPLAB IDE

The screenshot shows the MPLAB IDE interface with several key elements highlighted by arrows and labels:

- Fichier C**: Points to the source code file in the editor.
- Fenêtre Projet**: Points to the project tree on the left side of the IDE.
- Point d'arrêt Program counter**: Points to the program counter icon in the toolbar.
- Fenêtre Rapport**: Points to the Output window at the bottom left, which shows messages like "Stepping target failed" and "Programming...".
- Opérations de debug**: Points to the Debug menu and the Run, Step Over, Step Into, and Stop buttons in the toolbar.
- Compilation projet**: Points to the Compile button in the toolbar.
- Programmation microcontrôleur**: Points to the Program button in the toolbar.

The code in the editor shows a C program for a PIC18F46K22 microcontroller, including a while loop and a high_isr interrupt service routine.

<https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/archives/mplab-ecosystem>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

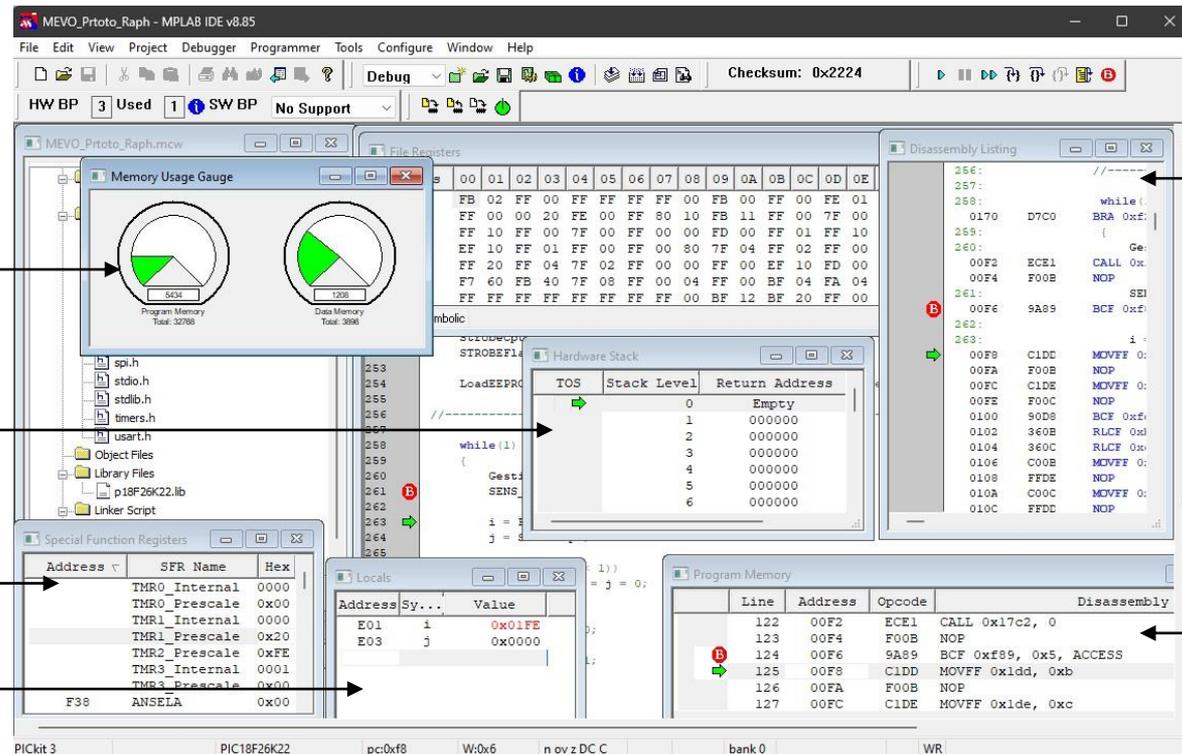
1.2 Les environnements de développement MICROCHIP : MPLAB IDE

Jauge de l'utilisation des mémoires Flash et RAM

Visualisation de la pile matérielle

Lecture / écriture des registres à fonction spéciales

Visualisation des variables locales



Code assembleur généré à partir du C

Affiche le contenu de la Flash où est contenu le programme

<https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/archives/mplab-ecosystem>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.2 Les environnements de développement MICROCHIP : MPLAB X IDE

The screenshot displays the MPLAB X IDE environment for a PIC32 microcontroller project. The main window shows the C source code for a file named `interleaveADC0123_AOP_integrateur.c`. The code includes a loop that checks for a flag `extilFlag` and, if set, processes data based on the `LEFT` bit. It calculates an `iteration` and checks if `nbappuiBT4` is zero. If so, it sets `GX1` to `FALSE`, `GX2` to `TRUE`, and `GX10` to `FALSE`. It then configures `PORTBbits.RFO` and `PORTBbits.RF1` based on the `GX1` and `GX2` values, and sets `LATF` to `0x0001`.

The assembly view on the right shows the corresponding assembly instructions, such as `LBU V0, -32445(GP)`, `ANDI V0, V0, 255`, and `BEQL V1, V1, 255`. The dashboard at the bottom left provides memory usage statistics:

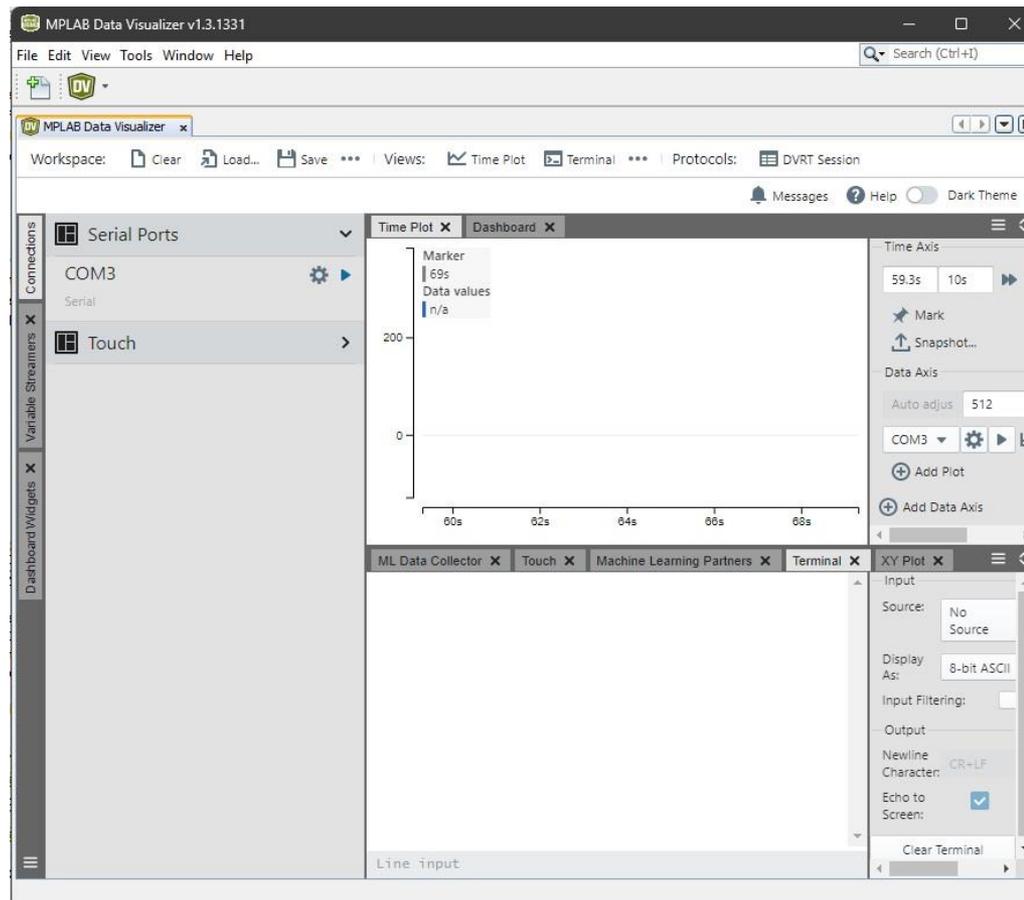
Category	Used (bytes)	Free (bytes)
Data	524288 (0x80000)	5%
Data Used	23656 (0x5C68)	Free: 500632 (0x7A398)
Program	2098304 (0x200480)	7%
Program Used	143516 (0x2309C)	Free: 1954788 (0x1DD3E4)

The dashboard also shows the PIC32 configuration (PIC32M20-48EFH064) and various debug tools. The status bar at the bottom indicates the PIC32 is built and loaded, and the debugger is halted at address 319:25.

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.2 Les environnements de développement MICROCHIP : MPLAB X IDE



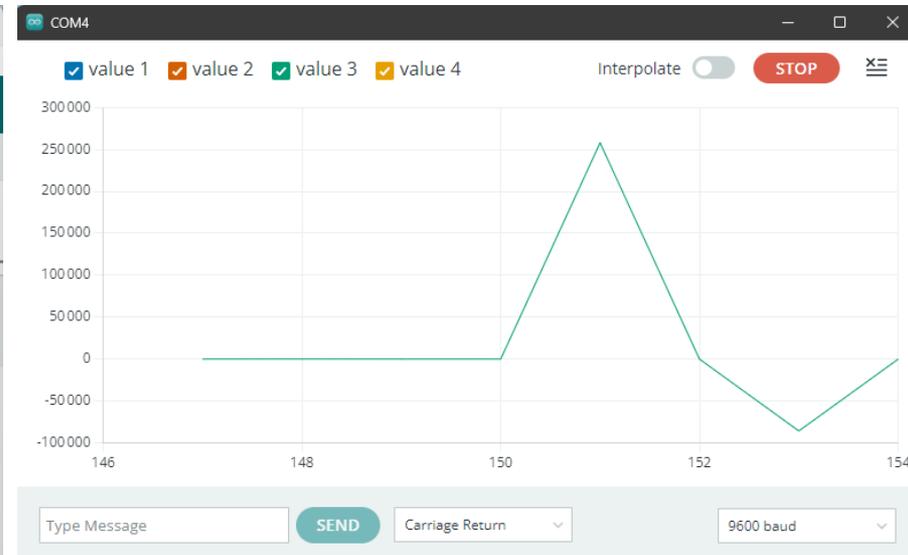
Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.2 Les environnements de développement : Arduino IDE

Téléchargeable => <https://www.arduino.cc/en/software>

```
station_meteo_labview3.0 | Arduino IDE 2.2.1
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Mega or Meg...
station_meteo_labview3.0.ino  Adafruit_Sensor.h
280 Serial.print("TEMPDHT = ");
281 Serial.print(t, 1);
282 Serial.println(" C");
283
Debug Console Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'Arduino Mega or Mega Carriage Return 9600 baud
MESALL? OK
TEMPDHT = 20.8 C
RHDHT = 59.2 PCT
DPDHT = 12.5
TBMP = 0.55 C
PBMP = 257915.92 HPa
VMVENT = 0.01 km/h
altitude = -85685.57 m
PLUVIO = 0 basculements
Ln 291, Col 7 Arduino Mega or Mega 2560 on COM4
```

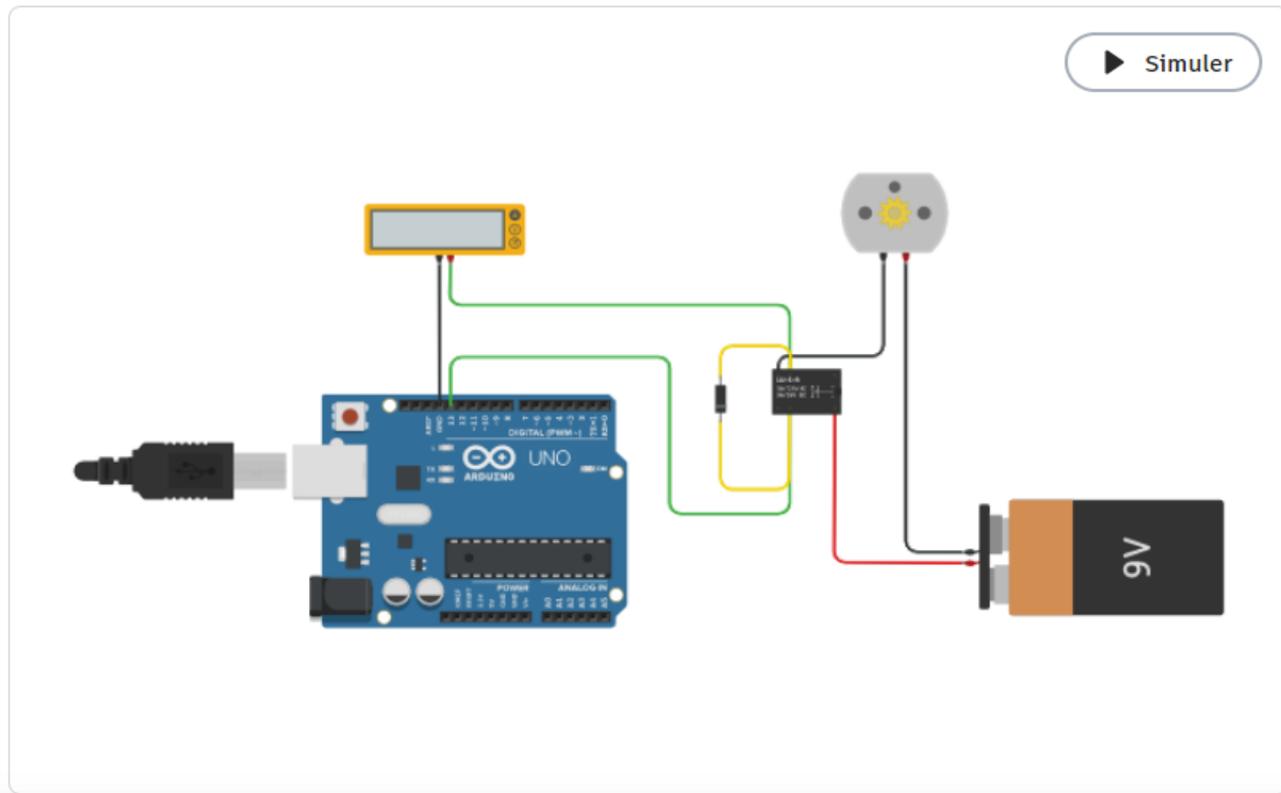


Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.3 Les outils de simulation Arduino: TINKERCAD

Arduino simulator



<https://www.tinkercad.com/things/dEOWWJatCtv-arduino-simulator>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.3 Outils de simulation MICROCHIP : MPLAB X IDE

The screenshot displays the MPLAB X IDE interface for a PIC32 project. The main editor shows the following C code:

```

appuiBT3 = 0;
(extilFlag == true)

if(LEFT == 1)
{
    iteration = 0; // permet de réinitialiser la moyenne de la mesure en fréquence
    if(nbappuiBT4==0) //valide ou non le Gain x1
    {
        if(GX1 == TRUE)
        {
            GX1 = FALSE;
            GX2 = TRUE;
            GX10 = FALSE;
            PORTFbits.RF0 = 1;
            PORTFbits.RF1 = 0;
            LATF = 0x0001;
        }
    }
}
else
{
    GX1 = TRUE;
}
    
```

The interface also includes a Project Explorer on the left, a Dashboard at the bottom left showing memory usage (Data: 524288 bytes, Program: 2098304 bytes), and an Output window at the bottom right showing the results of a simulation or programming process.

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.4 Les instructions : Arduino

The screenshot shows the Arduino.cc website interface. The browser address bar displays 'arduino.cc/reference/en/'. The navigation menu includes 'PROFESSIONAL', 'EDUCATION', 'STORE', 'HARDWARE', 'SOFTWARE', 'CLOUD', 'DOCUMENTATION', 'COMMUNITY', 'BLOG', and 'ABOUT'. A search bar is located in the top right. Below the navigation, there is a language selection dropdown set to 'English'. The main content area is titled 'Language Reference' and contains the following text: 'Arduino programming language can be divided in three main parts: functions, values (variables and constants), and structure.' Below this, there is a section for 'Functions' with the text: 'For controlling the Arduino board and performing computations.' The page also features a sidebar with a table of contents and a footer with licensing information.

LANGUAGE

- FUNCTIONS
- VARIABLES
- STRUCTURE

LIBRARIES

IOT CLOUD API

GLOSSARY

The Arduino Reference text is licensed under a [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 License](#).

Find anything that can be improved? [Suggest corrections and new documentation via GitHub](#).

Doubts on how to use Github? Learn everything you need to know in [this tutorial](#).

Language Reference

Arduino programming language can be divided in three main parts: functions, values (variables and constants), and structure.

Functions

For controlling the Arduino board and performing computations.

Digital I/O	Math	Random Numbers
<code>digitalRead()</code>	<code>abs()</code>	<code>random()</code>
<code>digitalWrite()</code>	<code>constrain()</code>	<code>randomSeed()</code>
<code>pinMode()</code>	<code>map()</code>	
	<code>max()</code>	
	<code>min()</code>	
Analog I/O	<code>pow()</code>	Bits and Bytes
		<code>bit()</code>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

III. Programmation en C de microcontrôleurs

1.5 ChatGPT : une aide à la programmation des microcontrôleurs



You
comment configurer un PIC32MZ2048EFH064 pour mesurer la température du capteur présent dans le microcontrôleur?



ChatGPT
Configurer un microcontrôleur PIC32MZ2048EFH064 pour mesurer la température interne peut être réalisé en utilisant les fonctionnalités intégrées du microcontrôleur. Voici une procédure générale en utilisant le langage de programmation C et le framework MPLAB Harmony pour le PIC32.

Assurez-vous d'avoir installé MPLAB X IDE et Harmony Framework. Vous pouvez télécharger ces outils depuis le site de Microchip.

Voici un exemple de configuration basique pour mesurer la température interne :

```

c
Copy code

#include <stdio.h>
#include <xc.h>
#include "plib.h"

// Configuration des bits de configuration du microcontrôleur
#pragma config FPLLMUL = MUL_20, FPLLIDIV = DIV_2, FPLLODIV = DIV_1, FW
#pragma config POSCMOD = XT, FNOSC = PRIPLL, FPBDIV = DIV_1

int main(void) {
    // Configuration de la fréquence d'horloge
    SYSTEMConfigPerformance(SYS_FREQ);

    // Configuration du module ADC
    PLIB_ADC_Disable(ADC_ID_1);
    PLIB_ADC_MuxChannelIOInput(ADC_ID_1, ADC_MUX_A, ADC_CHO_POS_SAMPLEA);
    PLIB_ADC_SetRefVoltage(ADC_ID_1, ADC_REF_VDD_VDD);
    PLIB_ADC_SetSampleTime(ADC_ID_1, ADC_CHANNEL_0, 31);
    PLIB_ADC_SetIntMode(ADC_ID_1, ADC_INT_SINGLE_END_OF_SCAN);
    PLIB_ADC_Enable(ADC_ID_1);

    // Configuration du module de conversion A/N
    PLIB_ADC_Configure(ADC_ID_1, ADC_REFERENCE_VDD_VDD, ADC_CLOCK_DIV_2);
    PLIB_ADC_SetConfiguration(ADC_ID_1, ADC_CONFIGURATION_DEFAULT);
    PLIB_ADC_SetEnabled(ADC_ID_1);

    // Boucle principale
    while (1) {
        // Démarrez une conversion
        PLIB_ADC_SampleAutoStartEnable(ADC_ID_1);
    }
}
    
```

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

Ressources CARTE DEMO V1 & Bibliographie :

<https://gitlab.in2p3.fr/RdEI/formations/anf-mcu-instrum>

Architecture et fonctionnement microcontrôleur :

Vincent KERHOAS, Professeur agrégé : https://www.enib.fr/~kerhoas/electronique_numerique_architecture.html

IUT Cachan et vidéos Anthony JUTON : <https://tube-sciences-technologies.apps.education.fr/w/o3zg1Sfzr8aMsuX7d741f2>

<https://stm32python.gitlab.io/fr/docs/Microcontrollers/microcontrôleur>

Interfaces Séries :

I2C : <https://passionelectronique.fr/liaisons-series-uart-i2c-spi/#la-liaison-serie-i2c>

SPI : https://fr.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface

http://projet.eu.org/pedago/sin/term/8-bus_SPI.pdf

UART : <https://fr.wikipedia.org/wiki/UART>

<https://www.espacetechnologie.com/wp-content/uploads/2020/04/Chap4-USART.pdf>

RS232 : https://www.avsaudiovisuel.fr/datafiles/public_data/Articles_general/telechargement/liaison_serie_rs232.pdf

PWM : <https://www.electronicwings.com/pic/pic18f4550-pwm>

Datasheets :

PIC18F4550 : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F26J11 : <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39932c.pdf>

PIC32MZ2048EFH064 : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC32MZ-Embedded-Connectivity-with-Floating-Point-Unit-Family-Data-Sheet-DS60001320H.pdf>

AD7709 : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7709.pdf>

AD8495 : https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8494_8495_8496_8497.pdf

AD5292 : https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5291_5292.pdf

AD9833 : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9833.pdf>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

Bibliographie :

Datasheets :

AD5752 : https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5722_5732_5752.pdf

DHT22 : <https://www.didel.com/DHT22.pdf>

SHT21 : <https://www.farnell.com/datasheets/1780639.pdf>

TCS230 : <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/robocore-lojavirtual/889/TCS230%20Datasheet.pdf>

APDS-9950 : https://www.mouser.fr/datasheet/2/678/av02-3959en_ds_apds-9950_2015-11-13-1828575.pdf

DS3231 : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf>

SI4432 : <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/SI4430-31-32.pdf>

Module approvisionnement chez Ali Express / Amazon etc.

EEPROM 25AA1024 : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001836J.pdf>

PIC18F46K22 : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001412G.pdf>

PIC18F46J50 : <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39931b.pdf>

Tube piezo 4 quadrants :

<https://www.physikinstrumente.com/en/products/piezoelectric-transducers-actuators/tubes>

Alimentations Hautes tensions Piezo :

<https://www.physikinstrumente.com/en/products/controllers-and-drivers/nanopositioning-piezo-controllers/e-610-piezo-amplifier-controller-601000#specification>

<https://www.physikinstrumente.com/en/products/controllers-and-drivers/controllers-drivers-for-piezomotors>

Step Up DC-DC :

<https://www.sdshv.com/wp-content/uploads/2021/05/Fiche-%C2%B5APD-series.pdf>

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max1771.pdf>

<https://www.analog.com/en/design-notes/apd-bias-circuit-has-adjustable-output.html>

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

Bibliographie :

Oscilloscopes à base de microcontrôleur interfaçables avec LabVIEW ou autres :

<https://gabotronics.com/>

<https://www.microchip.com/en-us/application-notes/an2785>

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Worlds-Fastest-Embedded-Interleaved-12-bit-ADC-Using-PIC32MZ-and-PIC32MK-Families-DS00002785A.pdf>

<https://hackaday.io/project/160802-1-square-inch-20msps-oscilloscope>

Table 1-1. PIC32MZ Family Max ADC Throughput Rate Summary

# of Interleaved ADC Possible	ADC TAD ⁽¹⁾ (min) = 20 ns (50 Mhz max spec as of 7/1/18)			
	12-bit (max) msp/s	10-bit (max) msp/s	8-bit (max) msp/s	6-bit (max) msp/s
1	3.125 msp/s	3.57143 msp/s	4.16667 msp/s	5.00 msp/s
2	6.25 msp/s	7.14286 msp/s	8.33333 msp/s	10.00 msp/s
3	8.333333 msp/s	10.00 msp/s	12.50 msp/s	12.50 msp/s
4	12.50 msp/s	14.28571 msp/s	16.66667 msp/s	20.00 msp/s

Table 1-4. PIC32MK Family Max ADC Throughput Rate Summary

# of Interleaved ADC Possible	ADC TAD(min) = 16.667-ns (60-Mhz max)			
	12-bit (max) msp/s	10-bit (max) msp/s	8-bit (max) msp/s	6-bit (max) msp/s
1	3.75 msp/s	4.28571 msp/s	5.00 msp/s	6.00 msp/s
2	7.50 msp/s	8.57143E+6	10.0 msp/s	12.00 msp/s
3	10.00 msp/s	12.00 msp/s	15.00 msp/s	15.00 msp/s
4	15.00 msp/s	17.14286 msp/s	20.00 msp/s	24.00 msp/s
5 ⁽²⁾	--- ⁽¹⁾	20.00 msp/s	--- ⁽¹⁾	30.00 msp/s
6 ⁽³⁾	20.00 msp/s	24.00 msp/s	30.00 msp/s	--- ⁽¹⁾

Introduction aux microcontrôleurs en Instrumentation

Bibliographie :

Environnements de développement Intégrés et outils de simulation gratuits :

ARDUINO : <https://www.arduino.cc/en/software>

MICROCHIP : MPLAB IDE, MPLAB X, MCC => <https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/archives/mplab-ecosystem>

MICROCHIP : MPLAB Harmony => <https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/configure/mplab-harmony>

MICROCHIP : MPLAB Data Visualizer => <https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/debug/mplab-data-visualizer>

<https://www.tinkercad.com/things/dEOWWJatCtv-arduino-simulator>

<https://blog.f8asb.com/2022/12/29/wokwi-simulateur-arduino-en-ligne/>

Outils de design PCB et de simulation microcontrôleur payants :

PROTEUS 8 : https://www.labcenter.com/buy-pcb/?gclid=Cj0KCQiAj_CrBhD-ARIsAlIMxT8hL4hEc4sVINobKZixYbaCOe4VEgeigzdVPqpuBiMYu8qOyVqQSW4aAvr9EALw_wcB

Échantillons gratuits :

MICROCHIP : <https://www.microchipdirect.com/samples>

Analog Devices & MAXIM : <https://www.analog.com/en/support/customer-service-resources/sales/sample-products.html>

Texas Instruments : <https://www.ti.com/ordering-resources/buying-tools/sample-request.html>

NXP : https://www.nxp.com/support/sample-and-buy/order-samples:ORDER_SAMPLES

STMicroelectronics : <https://www.st.com/en/data-converters/adc120.html#sample-buy>

Calcul température PT100 à implémenter dans un microcontrôleur : <https://aviatechno.net/thermo/rtd03.php>

Publication PIXSIC :

https://www.researchgate.net/publication/278626804_Physical_Characterization_of_a_Wireless_Radiotracer_Detection_System_Based_on_Pixelated_Silicon_for_in_Vivo_Brain_Studies_in_Freely_Moving_Rats