

Projet : asservissement numérique d'un oscillateur à quartz

É. Carry, J.-M Friedt

`jmfriedt@femto-st.fr`

transparents à `jmfriedt.free.fr`

11 février 2025

Questions ...

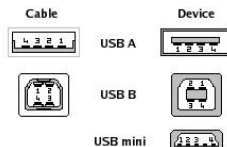
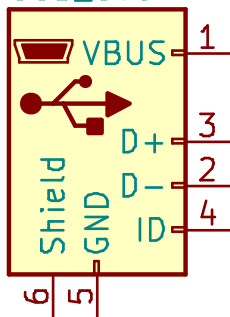
1. Rechercher dans la norme USB quelle broche correspond à quel signal (alimentation, D+ et D-, masse).
2. Effectuer la liste des composants en fournissant leurs caractéristiques (valeur, nature ou technologie), et code commande chez un des fournisseurs (Mouser, RS, Farnell, Digikey ...)
3. Budgéter le coût d'approvisionnement des composants en fonction des volumes.
4. Estimer, au moyen du calculateur du site www.eurocircuits.com, le coût de fabrication du circuit imprimé. Observer l'évolution du coût avec le nombre de couches. Avec la surface. Avec la précision de routage (classe du circuit).
5. Budgéter le coût de fabrication du circuit en fonction des volumes.
6. Comment calculer la valeur d'un condensateur de découplage ? Dans quelle gamme de fréquence agit la forte valeur ? la faible valeur ?
7. Si nous devons bobiner une inductance de valeur équivalente à celle du modèle Butterworth-van Dyke, quelle serait l'ordre de grandeur de sa résistance interne ?
8. Quelle serait la conséquence sur le facteur de qualité du résonateur résultant ? Commenter.

Réponses ...

Rechercher dans la norme USB quelle broche¹ correspond à quel signal (alimentation, D+ et D-, masse).

J?

USB_OTG



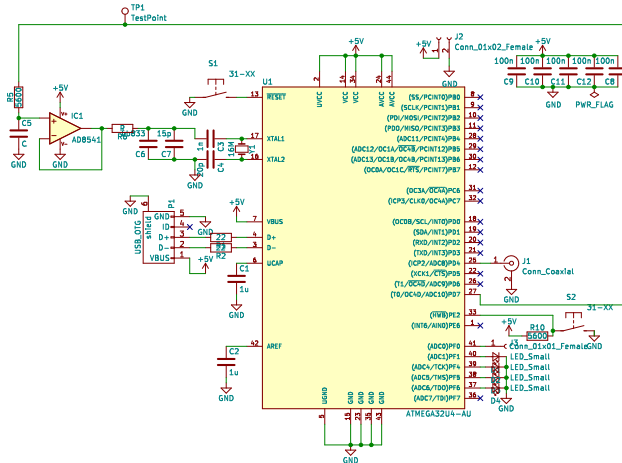
Pin	Signal	Color	Description
1	VCC	Red	+5V
2	D-	White	Data -
3	D+	Green	Data +
4	GND	Black	Ground

Quelle est la tension d'alimentation de l'Atmega32U4 ? Quelle gestion d'alimentation ?

1. www.moddy.com/

Réponses ...

Effectuer la liste des composants en fournissant leurs caractéristiques (valeur, nature du composant ou technologie utilisée), et leur code commande chez un des fournisseurs (Mouser, RS, Farnell, Digikey ...)



Comment faire si l'alimentation du microcontrôleur avait été 3,3 V ?

Réponses ...

Effectuer la liste des composants en fournissant leurs caractéristiques (valeur, nature du composant ou technologie utilisée), et leur code commande chez un des fournisseurs (Mouser, RS, Farnell, Digikey ...)

Sous KiCAD

- ▶ PCBNew → File ⇒ Fabrication Outputs → BOM File : fichier CSV
- ▶ scripts pour Eschema dans /usr/share/kicad/plugins/bom* : Eschema → Generate Bill of Materials → “+” pour ajouter script puis Generate

Part	Value	Package	Farnell	Cost
C1	1u	C0805	2470435	0.118
C2	100n	C0805	2470437	0.0665
C3	20p	C0805	1885436	0.189
C4	bb833	C0805	2432690	0.23
C5	1n	C0805	7568665	0.375
C6		C0805		
C7	100n	C0805	2470437	0.0665
C8	100n	C0805	2470437	0.0665
C9	100n	C0805	2470437	0.0665
C10	100n	C0805	2470437	0.0665
C11	100n	C0805	2470437	0.0665
C12	15p	C0805	1885434	0.175
IC2	FT230XS	SSOP16	2081321	1.94
IC3	AD8541RJ	SOT23-5	1333254	0.787
LED1		LED_SML0603	2112121	0.166
LED2		LED_SML0603	2099221	0.102
LED3		LED_SML0603	2099227	0.0996
LED4		LED_SML0603	2099222	0.116

Q1	16M	SM49	1640900	2.79
R1	22	R0805	9334122	0.0371
R2	22	R0805	9334122	0.0371
R3	5k6	R0805	1750764RL	0.00624
R4	5k6	R0805	1750764RL	0.00624
R5		R0805		
R6	22	R0805	9334122	0.0371
R7	22	R0805	9334122	0.0371
R8	0	R1206	9240276	0.024
R9	0	R1206	9240276	0.024
R10	5k6	R0805	1750764RL	0.00624
R11	5k6	R0805	1750764RL	0.00624
R12	0	R1206	9240276	0.024
S1		B3F-31XX	2468742	0.176 ???
S2		B3F-31XX	2468742	0.176
U1	ATMEGA32U4-AU		1748525	4.75
X1	MINI-USB-32005-201		2112367	0.541
X2	BU-SMA-V		1248990	1.61
X3	MINI-USB-32005-201		2112367	0.541

Réponses ...

Budgéter le coût d'approvisionnement des composants en fonction des volumes.

```
cat bom.txt | cut -c 40-100 | cut -d -f1 | tail -n +2
```

puis effectuer la somme de la colonne dans GNU/Octave : 15.526 euros de composants

2443182   ● Oui	ATMEGA3 2U4-AUR	ATMEL Microcontrôleur 8 bits, Low Power High Performance, ATmega, 16 MHz, 32 KB, 2.5 KB, 44, TQFP	455	Prix pour : Bande découpée 1 1+ 6,30 € 10+ 5,23 € 25+ 4,84 € 50+ 4,19 € Plus...	1 Commander	ATmega	16MHz	32KB	2.5KB
				455 en stock pour une livraison le jour ouvrable suivant (UK stock) Voir heures limites ► Vérifier les quantités en stock					

2443182RL   ● Oui	ATMEGA3 2U4-AUR	ATMEL Microcontrôleur 8 bits, Low Power High Performance, ATmega, 16 MHz, 32 KB, 2.5 KB, 44, TQFP	455	Prix pour : Bande découpée 1 100+ 3,78 € 500+ 3,32 €	150 Commander	ATmega	16MHz	32KB	2.5KB
				455 en stock pour une livraison le jour ouvrable suivant (UK stock)					

“Changer de colonne” : passer d'un volume moindre à un volume important peut réduire le coût de chaque composant ! (reel) : $9 \times 6,3 > 10 \times 5.23$

Réponses ...

Budgéter le coût de fabrication du circuit en fonction des volumes. Estimer, au moyen du calculateur du site www.eurocircuits.com, le coût de fabrication du circuit imprimé. Observer l'évolution du coût avec le nombre de couches. Avec la surface. Avec la précision de routage (classe du circuit).

STANDARD pool



Delivery format

Single PCB

PCB quantity

10

Delivery term

7 working days

Number of layers

2

PCB width (X) (mm)

42.00

PCB height (Y) (mm)

28.00

eC-registration compatible PCB

☐

► Stencils

▼ Material

Board thickness

1.55 mm

Material Tg

145-150 °C

Outer layer copper foil

18 µm (end +/-35 µm)

▼ Technology

Outer layer trackwidth (OL-TW)

0.150 mm

Outer layer isolation distance (OL-TT-TP-PP)

0.150 mm

Outer layer annular ring (OAR)

0.125 mm

Smallest final hole

0.25 mm

Hole density

< 1000/dm²

Technology class

6C

Holes <= may be reduced

0.45 mm

▼ PCB definition

Top soldermask

Green

Bottom soldermask

Green

Top legend

White

Bottom legend

None

Surface finish

Any lead free finish

Milling

No

Bare Board Testing

☒

► Advanced options

Summary

Business customer? Select here. ☐

Service

STANDARD pool

Delivery term

7 working days

Estimated shipment date

13-11-2015

Quantity

10 PCBs

Board surface / Order surface

0.12 dm² / 1.18 dm²

Prices

Net

Gross*

Single PCB

€ 5.86

€ 7.04

Total boards

€ 58.63

€ 70.35

Express transport

€ 0.00

€ 0.00

Total

€ 58.63

€ 70.35

* The gross prices include 20.00% VAT.

 Add to basket

Alternatives

Customized matrix

10 PCBs

7 working days

Net

Gross*

€ 5.86

€ 7.04

€ 58.63

€ 70.35

Select

20 PCBs

7 working days

Net

Gross*

€ 3.48

€ 4.17

€ 69.57

€ 83.48

Select

30 PCBs

7 working days

Net

Gross*

€ 2.68

€ 3.22

€ 80.49

€ 96.59

Select

10 PCBs

6 working days

Net

Gross*

€ 7.26

€ 8.71

€ 72.56

€ 87.08

Select

20 PCBs

6 working days

Net

Gross*

€ 4.30

€ 5.16

€ 86.04

€ 103.25

Select

30 PCBs

6 working days

Net

Gross*

€ 3.32

€ 3.98

€ 99.49

€ 119.39

Select

* The gross prices include 20.00% VAT.
The transport costs and total price are calculated and shown in the summary according to the selection.

Useful documents

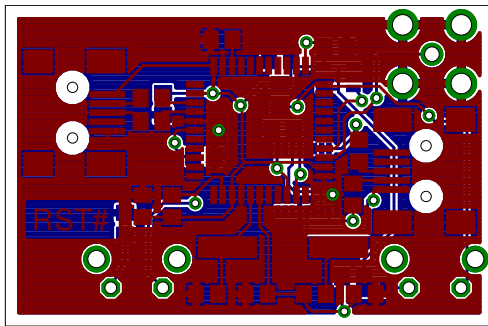
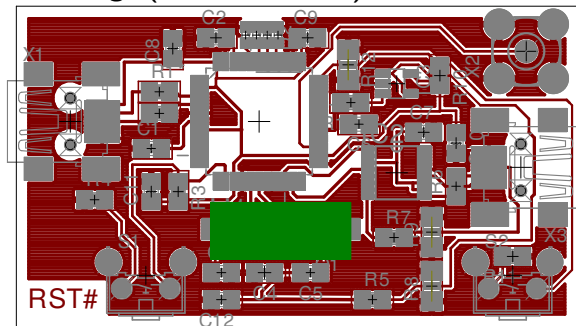
 → PCB Calculator user guide

Read more...

Réponses ...

Budgéter le coût de fabrication du circuit en fonction des volumes. Estimer, au moyen du calculateur du site www.eurocircuits.com, le coût de fabrication du circuit imprimé.

Observer l'évolution du coût avec le nombre de couches. Avec la surface. Avec la précision de routage (classe du circuit).



1,55 mm PCB, 35 μm Cu, sérigraphie et vernis

Volume	5	10	100
DL 42 mm×28 mm, 6C (150 μm)	12.51/p=62.56	7.09/p=70.94	1.81/p=180.77
DL 42 mm×28 mm, 9C (90 μm)	115.23/p=576	57.68/p=577	5.88/p=588
SL 52 mm×30 mm, 6C (150 μm)	11.57/p=57.85	6.70/p=67.03	1.82/p=182.19
SL 52 mm×30 mm, 7C (125 μm)	14.63/p=73.13	8.32/p=83.20	2.0/p=200.21

Budgéter le coût de fabrication du circuit en fonction des volumes. Estimer, au moyen du calculateur du site www.eurocircuits.com, le coût de fabrication du circuit imprimé. Observer l'évolution du coût avec le nombre de couches. Avec la surface. Avec la précision de routage (classe du circuit).

Eurocircuits - PCB design classification overview										
Pattern Class	class 3	class 4	class 5	class 6	class 7	class 8	class 9	class 10		
Service	P+S+R+	P+S+R+	P+S+R+	P+S+R+	S+R	S+R	S+R	-		
OTW	0.250 10	0.200 8	0.175 7	0.150 6	0.125 5	0.100 4	0.090 3.5	<0.090	<3.5	mm-mil
OTT-OTP-OPP	0.250 10	0.200 8	0.175 7	0.150 6	0.125 5	0.100 4	0.090 3.5	<0.090	<3.5	mm-mil
OAR	0.200 8	0.150 6	0.150 6	0.125 5	0.125 5	0.100 4	0.100 4	<0.100	<4	mm-mil
ITW	0.250 10	0.200 8	0.175 7	0.150 6	0.125 5	0.100 4	0.090 3.5	<0.090	<3.5	mm-mil
ITT-ITP-IPP	0.250 10	0.200 8	0.175 7	0.150 6	0.125 5	0.100 4	0.090 3.5	<0.090	<3.5	mm-mil
IAR	0.200 8	0.150 6	0.150 6	0.125 5	0.125 5	0.125 5	0.125 5	<0.125	<5	mm-mil
IPI	0.275 11	0.225 9	0.225 9	0.200 8	0.200 8	0.200 8	0.200 8	<0.200	<8	mm-mil

Base Cu		min Pattern values			
Base Cu OL		OTT-OTP-OPP		OTW	
12μm	%oz	0.090	3.5	0.090 3.5	mm-mil
18μm	%oz	0.125	5	0.090 3.5	mm-mil
35μm	1oz	0.175	7	0.125 5	mm-mil
70μm	2oz	0.250	10	0.200 8	mm-mil
105μm	3oz	0.300	12	0.250 10	mm-mil
Base Cu IL		ITT-ITP-IPP		ITW	
12μm	%oz	0.090	3.5	0.090 3.5	mm-mil
18μm	%oz	0.100	4	0.090 3.5	mm-mil
35μm	1oz	0.125	5	0.125 5	mm-mil
70μm	2oz	0.250	10	0.200 8	mm-mil
105μm	3oz	0.300	12	0.250 10	mm-mil



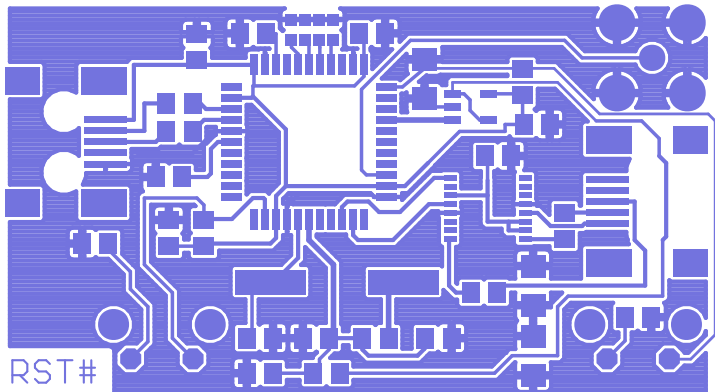
Drill Class	class A	class B	class C	class D	class E	class F	
Service	P+S+R+I	P+S+R	P+S+R	S+R	S+R	-	
min PHD	0.60 0.026	0.45 0.018	0.35 0.014	0.25 0.010	0.20 0.008	<0.20 <0.008	mm-inch
Sponding finished holes sizes							
PTH	0.50 0.022	0.35 0.014	0.25 0.010	0.15 0.006	0.10 0.004	<0.10 <0.004	mm-inch
NPTH	0.60 0.026	0.45 0.018	0.35 0.014	0.25 0.010	0.20 0.008	<0.20 <0.008	mm-inch

Max. PCB thickness to Drill Class	3.20	0.125	3.20	0.125	2.40	0.093	2.00	0.079	1.60	0.062	mm-inch	Aspect ratio is 1 / 8
-----------------------------------	------	-------	------	-------	------	-------	------	-------	------	-------	---------	-----------------------

9 / 26

Respect des conventions

- ▶ Eurocircuits accepte des fichiers au format Kicad²
- ▶ pour plus de “sécurité”, exporter au format Gerber (visualisation par gerbv sous GNU/Linux),
- ▶ respect des dimensions critiques pour garantir la fabrication³

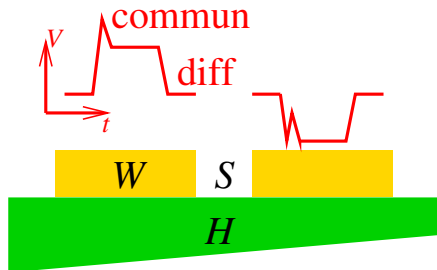


2. <http://www.eurocircuits.com/blog/kicad-eurocircuits-reads-in-native-kicad-data/>

3. <http://www.eurocircuits.com/blog/kicad-design-rules/>

Routage de paires différentielles pour les signaux rapides

- ▶ USB, PCI, SATA : bus à plusieurs dizaines de MHz doivent respecter les conditions d'adaptation d'impédance (cf **Lignes de Transmission**)
- ▶ la norme de chaque bus décrit leur impédance caractéristique : $85\ \Omega$ pour PCI^a (+condensateurs), $90\pm 13.5\ \Omega$ pour USB (+résistances).
- ▶ KiCAD → PCB Calculator → Transline → Coupled Microstrip Line pour décrire deux lignes différentielles au dessus d'un plan de masse, valable pour $0,1 < S/H < 3$ d'après^b
- ▶ Séparation entre les couches H pour une épaisseur de Cu standard $H_t = 35\ \mu\text{m}$: tester diverses W et S en fonction des spécifications techniques de fabrication.



a. <https://resources.altium.com/p/pcie-layout-and-routing-guidelines>

b. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1132616/>

1. Observer l'impact de W (et S) sur Z_{odd} l'impédance du mode différentiel qui doit être égale à la moitié de l'impédance caractéristique de la ligne
2. Comment se compare W avec l'espacement des broches et leur largeur sur un connecteur USB ou PCI pour un double-couche $H = 1,6\ \text{mm}$?
3. Reprendre le calcul pour un circuit 4 couches : quelle est l'épaisseur du diélectrique séparant la couche supérieures et la plan de masse interne ?

Routage de paires différentielles pour les signaux rapides

- ▶ USB, PCI, SATA : bus à plusieurs dizaines de MHz doivent respecter les conditions d'adaptation d'impédance (cf **Lignes de Transmission**)
- ▶ la norme de chaque bus décrit leur impédance caractéristique : $85\ \Omega$ pour PCI^a (+condensateurs), $90\pm 13.5\ \Omega$ pour USB (+résistances).
- ▶ KiCAD → PCB Calculator → TransLine → Coupled Microstrip Line pour décrire deux lignes différentielles au dessus d'un plan de masse, valable pour $0,1 < S/H < 3$ d'après^b
- ▶ Séparation entre les couches H pour une épaisseur de Cu standard $H_t = 35\ \mu\text{m}$: tester diverses W et S en fonction des spécifications techniques de fabrication.

a. <https://resources.altium.com/p/pcie-layout-and-routing-guidelines>

b. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1132616/>

1. Observer l'impact de W (et S) sur Z_{odd} l'impédance du mode différentiel qui doit être égale à la moitié de l'impédance caractéristique de la ligne
2. Comment se compare W avec l'espace des broches et leur largeur sur un connecteur USB ou PCI pour un double-couche $H = 1,6\ \text{mm}$?
3. Reprendre le calcul pour un circuit 4 couches : quelle est l'épaisseur du diélectrique séparant la couche supérieures et la plan de masse interne ?

PCB Calculator

Regulators Track Width Electrical Spacing **TransLine** RF Attenuators Color Code Board Classes

Transmission Line Type:

- ☐ Microstrip Line
- ☐ Coplanar wave guide
- ☐ Coplanar wave guide with ground plane
- ☐ Rectangular Waveguide
- ☐ Coaxial Line
- ☒ Coupled Microstrip Line
- ☐ Stripline
- ☐ Twisted Pair

Substrate Parameters:

Er: 4.6

TanD: 0.02

Rho: 1.72e-08

H: 1.6 mm

H_t: 1e+20 mm

T: 0.035 mm

Rough: 0 mm

mu Rel C: 1

Physical Parameters:

W: 0.409955 mm

S: 0.0902304 mm

L: 11841.9 mm

Analyze Synthesize

Electrical Parameters:

Zeven: 180 Ω

Zodd: 45 Ω

Ang. L: 21.4664 Radian

Results:

ErEff Even: 3.17402

ErEff Odd: 2.82112

Conductor Losses Even: 1.19478 dB

Conductor Losses Odd: 4.77872 dB

Dielectric Losses Even: 1.6806 dB

Dielectric Losses Odd: 1.49331 dB

Skin Depth: 9.33468 μm

Routeage de paires différentielles pour les signaux rapides

- ▶ USB, PCI, SATA : bus à plusieurs dizaines de MHz doivent respecter les conditions d'adaptation d'impédance (cf **Lignes de Transmission**)
- ▶ la norme de chaque bus décrit leur impédance caractéristique : $85\ \Omega$ pour PCI^a (+condensateurs), $90\pm 13.5\ \Omega$ pour USB (+résistances).
- ▶ KiCAD → PCB Calculator → TransLine → Coupled Microstrip Line pour décrire deux lignes différentielles au dessus d'un plan de masse, valable pour $0,1 < S/H < 3$ d'après^b
- ▶ Séparation entre les couches H pour une épaisseur de Cu standard $H_t = 35\ \mu\text{m}$: tester diverses W et S en fonction des spécifications techniques de fabrication.

a. <https://resources.altium.com/p/pcie-layout-and-routing-guidelines>

b. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1132616/>

1. Observer l'impact de W (et S) sur Z_{odd} l'impédance du mode différentiel qui doit être égale à la moitié de l'impédance caractéristique de la ligne
2. Comment se compare W avec l'espace des broches et leur largeur sur un connecteur USB ou PCI pour un double-couche $H = 1,6\ \text{mm}$?
3. Reprendre le calcul pour un circuit 4 couches : quelle est l'épaisseur du diélectrique séparant la couche supérieures et la plan de masse interne ?

PCB Calculator

Regulators Track Width Electrical Spacing **TransLine** RF Attenuators Color Code Board Classes

Transmission Line Type:

- ☐ Microstrip Line
- ☐ Coplanar wave guide
- ☐ Coplanar wave guide with ground plane
- ☐ Rectangular Waveguide
- ☐ Coaxial Line
- ☒ Coupled Microstrip Line
- ☐ Stripline
- ☐ Twisted Pair

Substrate Parameters:

Er: 4.6

TanD: 0.02

Rho: 1.72e-08

H: 1.6 mm

H_t: 1e+20 mm

T: 0.035 mm

Rough: 0 mm

mu Rel C: 1

Physical Parameters:

W: 0.41 mm

S: 0.1 mm

L: 11840.1 mm

Analyze Synthesize

Electrical Parameters:

Zeven: 179.416 Ω

Zodd: 46.2239 Ω

Ang_L: 21.4664 Radian

Results:

ErEff Even: 3.17588

ErEff Odd: 2.82123

Conductor Losses Even: 1.19656 dB

Conductor Losses Odd: 4.64396 dB

Dielectric Losses Even: 1.68128 dB

Dielectric Losses Odd: 1.49314 dB

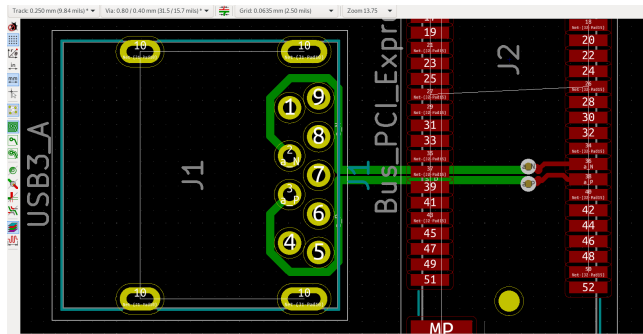
Skin Depth: 9.33468 μm

Routage de paires différentielles pour les signaux rapides

- ▶ USB, PCI, SATA : bus à plusieurs dizaines de MHz doivent respecter les conditions d'adaptation d'impédance
- ▶ la norme de chaque bus décrit leur impédance caractéristique : $85\ \Omega$ pour PCI (+ condensateurs), $90 \pm 13.5\ \Omega$ pour USB.
- ▶ KiCAD → PCB Calculator → Transline → Coupled Microstrip Line pour décrire deux lignes différentielles au dessus d'un plan de masse
- ▶ Séparation entre les couches H pour une épaisseur de Cu standard $H_t = 35\ \mu\text{m}$: tester diverses W et S en fonction des spécifications techniques de fabrication.
- ▶ *Odd mode* : les deux lignes sont polarisées par des signaux de signe opposé
- ▶ *Even mode* : les deux lignes sont polarisées par des signaux de même signe
- ▶ Spécification $Z_{diff} = 2 \times Z_{odd}$ et $Z_{single} = Z_{even}/2$

1. $H = 1,6\ \text{mm} \Rightarrow$ difficulté à router entre les broches du connecteur USB

Eeschema : nommer les signaux XXX_P et XXX_N, puis Pcbnew → File → Board Setup... → dPair Width et dPair Gap → Route : Differential Pair



Routage de paires différentielles pour les signaux rapides

- ▶ USB, PCI, SATA : bus à plusieurs dizaines de MHz doivent respecter les conditions d'adaptation d'impédance
- ▶ la norme de chaque bus décrit leur impédance caractéristique : $85\ \Omega$ pour PCI (+ condensateurs), $90 \pm 13.5\ \Omega$ pour USB.
- ▶ KiCAD → PCB Calculator → Transline → Coupled Microstrip Line pour décrire deux lignes différentielles au dessus d'un plan de masse
- ▶ Séparation entre les couches H pour une épaisseur de Cu standard $H_t = 35\ \mu\text{m}$: tester diverses W et S en fonction des spécifications techniques de fabrication.
- ▶ *Odd mode* : les deux lignes sont polarisées par des signaux de signe opposé
- ▶ *Even mode* : les deux lignes sont polarisées par des signaux de même signe
- ▶ Spécification $Z_{diff} = 2 \times Z_{odd}$ et $Z_{single} = Z_{even}/2$

1. $H = 1,6\ \text{mm} \Rightarrow$ difficulté à router entre les broches du connecteur USB

2. $H = 0,12\ \text{mm} \Rightarrow$ pistes suffisamment fines pour passer entre les broches du connecteur USB

PCB Calculator

Regulators Track Width Electrical Spacing **TransLine** RF Attenuators Color Code Board Classes

Transmission Line Type:

- ☐ Microstrip Line
- ☐ Coplanar wave guide
- ☐ Coplanar wave guide with ground plane
- ☐ Rectangular Waveguide
- ☐ Coaxial Line
- ☒ Coupled Microstrip Line
- ☐ Stripline
- ☐ Twisted Pair

Substrate Parameters

Er: 4.6

TanD: 0.02

Rho: 1.72e-08

H: 0.12

H_t: 1e+20

T: 0.035

Rough: 0

mu Rel C: 1

Physical Parameters:

W: 0.17

S: 0.1

L: 11202.2

Analyze Synthesize

Electrical Parameters:

Zeven: 68.5684 Ω

Zodd: 47.0513 Ω

Ang_l: 21.4631 Radian

Results:

ErEff Even: 3.56933

ErEff Odd: 3.13077

Conductor Losses Even: 9.3733 dB

Conductor Losses Odd: 13.6594 dB

Dielectric Losses Even: 1.77186 dB

Dielectric Losses Odd: 1.56897 dB

Skin Depth: 9.33468 μm

Component Parameters:

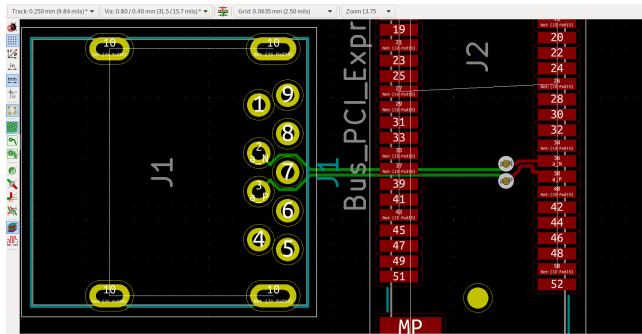
Frequency: 50 MHz

Zodd **Zeven**

Routage de paires différentielles pour les signaux rapides

- ▶ USB, PCI, SATA : bus à plusieurs dizaines de MHz doivent respecter les conditions d'adaptation d'impédance
- ▶ la norme de chaque bus décrit leur impédance caractéristique : $85\ \Omega$ pour PCI (+ condensateurs), $90 \pm 13.5\ \Omega$ pour USB.
- ▶ KiCAD → PCB Calculator → Transline → Coupled Microstrip Line pour décrire deux lignes différentielles au dessus d'un plan de masse
- ▶ Séparation entre les couches H pour une épaisseur de Cu standard $H_t = 35\ \mu\text{m}$: tester diverses W et S en fonction des spécifications techniques de fabrication.
- ▶ *Odd mode* : les deux lignes sont polarisées par des signaux de signe opposé
- ▶ *Even mode* : les deux lignes sont polarisées par des signaux de même signe
- ▶ Spécification $Z_{diff} = 2 \times Z_{odd}$ et $Z_{single} = Z_{even}/2$

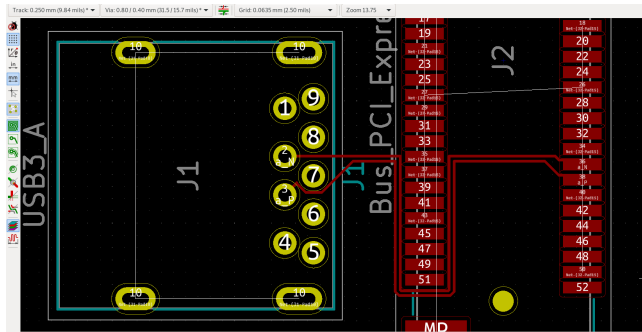
1. $H = 1,6\ \text{mm} \Rightarrow$ difficulté à router entre les broches du connecteur USB
2. $H = 0,12\ \text{mm} \Rightarrow$ pistes suffisamment fines pour passer entre les broches du connecteur USB
3. vias sont sources de pertes et de ruptures d'impédance : à éviter autant que possible



Routage de paires différentielles pour les signaux rapides

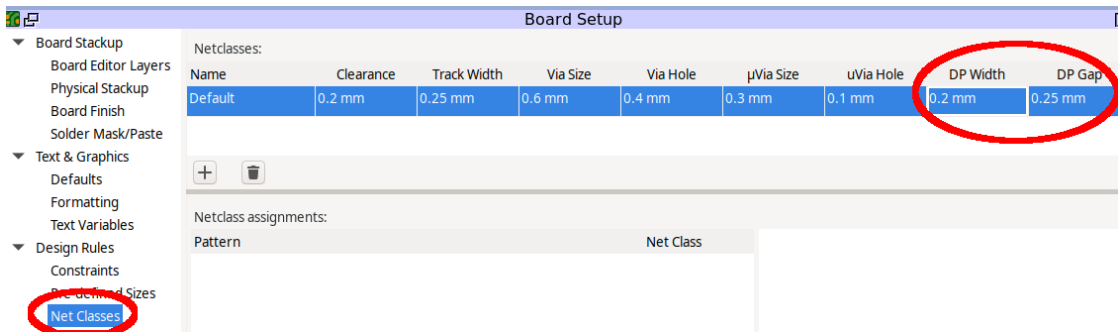
- ▶ USB, PCI, SATA : bus à plusieurs dizaines de MHz doivent respecter les conditions d'adaptation d'impédance
- ▶ la norme de chaque bus décrit leur impédance caractéristique : $85\ \Omega$ pour PCI (+ condensateurs), $90\pm 13.5\ \Omega$ pour USB.
- ▶ KiCAD → PCB Calculator → Transline → Coupled Microstrip Line pour décrire deux lignes différentielles au dessus d'un plan de masse
- ▶ Séparation entre les couches H pour une épaisseur de Cu standard $H_t = 35\ \mu\text{m}$: tester diverses W et S en fonction des spécifications techniques de fabrication.
- ▶ *Odd mode* : les deux lignes sont polarisées par des signaux de signe opposé
- ▶ *Even mode* : les deux lignes sont polarisées par des signaux de même signe
- ▶ Spécification $Z_{diff} = 2 \times Z_{odd}$ et $Z_{single} = Z_{even}/2$

1. $H = 1,6\ \text{mm} \Rightarrow$ difficulté à router entre les broches du connecteur USB
2. $H = 0,12\ \text{mm} \Rightarrow$ pistes suffisamment fines pour passer entre les broches du connecteur USB
3. vias sont sources de pertes et de ruptures d'impédance : à éviter autant que possible



Routage de paires différentielles

1. Dans le schéma, nommer les signaux en finissant par _P et _N ou + et -
2. File → Board Setup → Net Classes : DP Width/DP Gap
3. Dans le PCB : Route Tracks → Route Differential Pair (ou “6”)



Montage du circuit électronique

- La BOM associe la référence de chaque composant à son emplacement $\Rightarrow$ importance de bien renseigner la valeur de chaque composant lors de la création du schéma
- Lors du montage du circuit, nous choisirons un paquet de composants à placer et souder
- greffon (Plugin and Content Manager dans le menu de démarrage) nommé "*Interactive Html Bom*"⁴ pour une interface graphique permettant de sélectionner un type de composant et d'afficher ses emplacements.

Atmega32U4 GPS Rev: v1
L3 EEA 2017-08-04

Ref lookup Filter

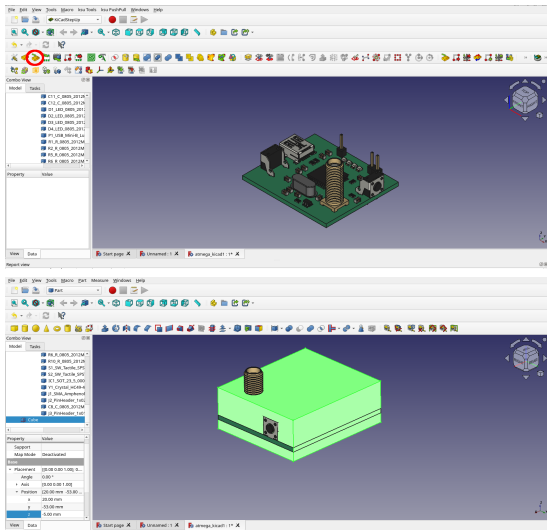
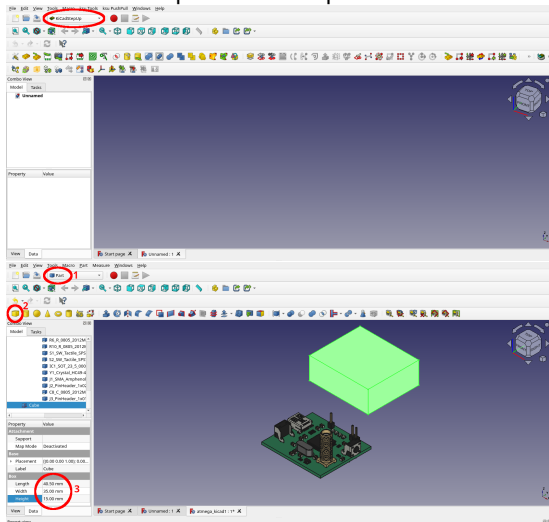
	Sou rce d	Pla ced	References	Value	Footprint	Quantity
1	☒	☐	C8, C9, C10, C11, C12	100n	C 0805 2012Metric Pa d1.18x1.45mm_HandSol der	5
2	☐	☐	C1, C2	1u	C 0805 2012Metric Pa d1.18x1.45mm_HandSol der	2
3	☐	☐	C3	1n	C 0805 2012Metric Pa d1.18x1.45mm_HandSol der	1
4	☐	☐	C4	20p	C 0805 2012Metric Pa d1.18x1.45mm_HandSol der	1
5	☐	☐	C5	C	C 0805 2012Metric Pa d1.18x1.45mm_HandSol der	1
6	☐	☐	C6	bb833	C 0805 2012Metric Pa d1.18x1.45mm_HandSol der	1
7	☐	☐	C7	15p	C 0805 2012Metric Pa d1.18x1.45mm_HandSol der	1
8	☐	☐	R1, R2	22	R 0805 2012Metric Pa d1.15x1.40mm_HandSol der	2
9	☐	☐	R5, R10	5600	R 0805 2012Metric Pa d1.15x1.40mm_HandSol der	2
10	☐	☐	R6	R	R 0805 2012Metric Pa d1.15x1.40mm_HandSol der	1
11	☐	☐	D1, D2, D3, D4	LED_Small	LED 0805 2012Metric Pa d1.15x1.40mm_HandS older	4
12	☐	☐	U1	ATMEGA32U4-AU	TOFP- 44 10x10mm_P0.8mm	1
13	☐	☐	Y1	16M	Crystal HC49- 4H_Verticall	1
14	☐	☐	S1, S2	31-XX	SW Tactile SPST Angl ed_PTS645Vx31-2LFS	2
15	☐	☐	IC1	AD8541	SOT-23- 5_HandSoldering	1

32'000 mm 30'000 mm

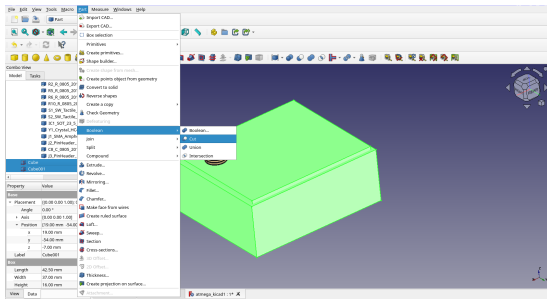
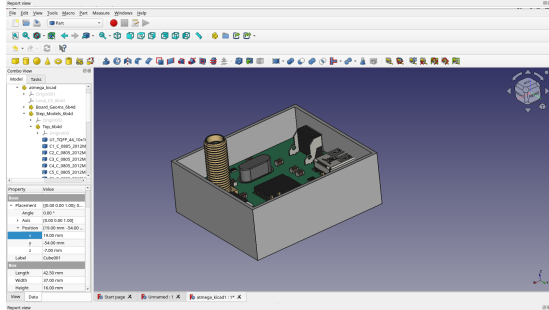
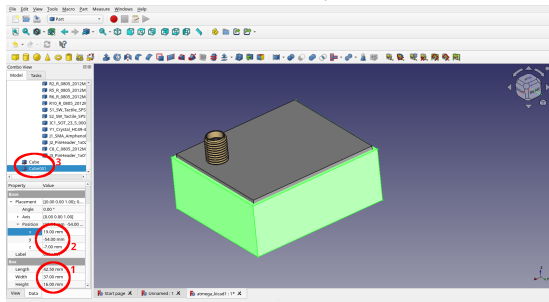
Conception mécanique

► KiCAD StepUp⁵ plugin pour FreeCAD : importer PCB + modèles de composants

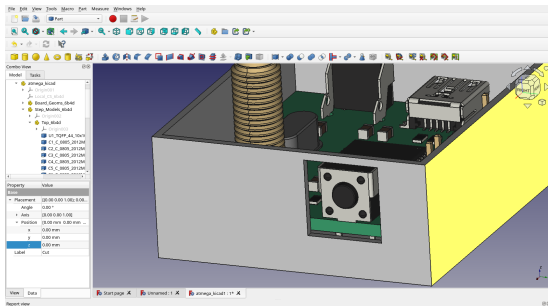
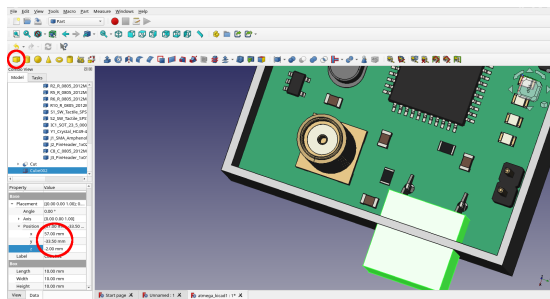
► Part : conception mécanique autour du PCB



- ▶ Réalisation du boîtier par intersection de géométries simples (cube, cylindre, cône ...)
- ▶ Part → Boolean → cut après avoir sélectionné les deux pièces (CTRL-gauche)



Idem pour toutes les ouvertures, connecteurs ...



Export en STL pour insérer dans le logiciel de production de GCode pour fabrication additive

Conclusion

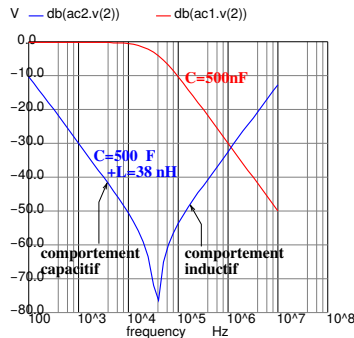
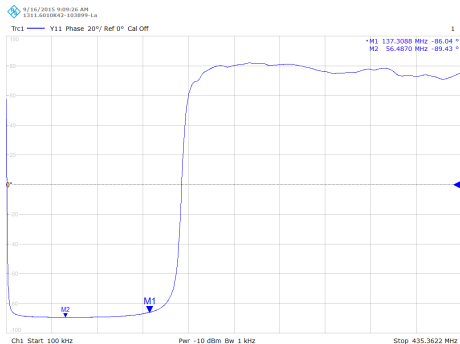
- ▶ chute du coût avec le volume
- ▶ la solution double face n'est pas forcément avantageuse par rapport à la solution simple face (plus grande)
- ▶ choix entre assemblage manuel en prototypage ou sous-traitance complexe ... réaliser un cahier d'assemblage (nomenclature, spécifications ...)
- ▶ **protéger** les composants clés par une inductance ou $R = 0 \Omega$ pour déverminer les erreurs d'assemblage
- ▶ prévoir des pastilles pour connecter une sonde d'oscilloscope lors des **tests**.

Réponses ...

Comment calculer la valeur d'un condensateur de découplage ? Dans quelle gamme de fréquence agit la forte valeur ? la faible valeur ?

$$i = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

ie $dU = \frac{1}{C} i \cdot dt$ dans la limite où le condensateur reste capacitif et ne devient pas inductif ⁶.



6. S.G. Parler Jr., *Improved Spice Models of Aluminum Electrolytic Capacitors for Inverter Applications*, IEEE Trans. on Industry Applications 34 (4) (2003) 929-935, www.vishay.com/capacitors/list/product-28325/ pour les condensateurs électrolytiques Vishay, ou chez Murata article.murata.com/en-global/article/impedance-esr-frequency-characteristics-in-capacitors

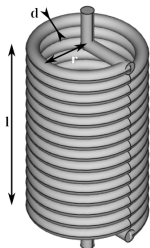
Pourquoi un résonateur à quartz ?

1. Inductance $L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot A / \ell = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \pi r^2 / \ell \Rightarrow N = \frac{1}{r} \times \sqrt{\frac{\ell \cdot L}{\pi \mu_0}}$ (A aire d'une boucle; N nombre de boucles, ℓ longueur, r rayon de la bobine, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). **On veut $\{\ell, 2r\} < 1$ cm**
2. Résistance $R = \rho \cdot 2\pi r \cdot N / S$ avec $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$ pour Cu
3. $N \times d = \ell < 10^{-2}$ m pour des spires en contact et un fil de $\varnothing d$
4. $\Rightarrow R = \rho \cdot 2 \pi r \times N / (\pi d^2 / 4) = \rho \cdot 8r \times N / (\ell^2 / N^2) = \rho \cdot 8r \times N^3 / \ell^2$

$$\Rightarrow R = \frac{8\rho}{r^2 \cdot \ell^2} \times \left(\sqrt{\frac{\ell \cdot L}{\pi \mu_0}} \right)^3$$

5. $A \cdot N^7 : L = 15 \cdot 10^{-3}$ H, $\ell = 10^{-2}$ m, $r = 5 \cdot 10^{-3}$ m implique $R \simeq 13$ k $\Omega \gg 50$ Ω

6. $Q = \frac{\omega L}{R}$ donne ici
 $Q = \frac{2\pi \cdot 16 \cdot 10^6 \times 15 \cdot 10^{-3}}{13000}$
 $\Rightarrow Q=120 \ll 36000$



7. puisque $L = 1/(C\omega^2)$ à 16 MHz et $C_1 \simeq 7$ fF
 $\Rightarrow L \simeq 15$ mH

SPECIFICATIONS

Specifications are typical at 25°C unless otherwise noted.
 Specifications are subject to change without notice.

	10 MHz	32 MHz	155.52 MHz
Motional Resistance R_1 (Ω)	50	20	50
Motional Capacitance C_1 (fF)	5.5	7.8	0.5
Quality Factor Q (k)	80	36	41
Shunt Capacitance C_0 (pF)	2.2	2.6	3.2
Calibration Tolerance*	A $\pm 0.01\%$ (± 100 ppm) B $\pm 0.1\%$ C $\pm 1.0\%$		
Load Capacitance	20 pF (Unless specified by customer)		
Drive Level	500 μ W MAX.		
Frequency-Temperature Stability**	-10°C to +70°C from ± 10 ppm -40°C to +85°C from ± 20 ppm -55°C to +125°C from ± 30 ppm		
Aging, first year	5ppm MAX.		
Shock, survival***	3,000g, .3 msec., 1/2 sine		
Vibration, survival	20g rms, 10-2,000 Hz random		
Operating Temperature Range	-10°C to +70°C Commercial -40°C to +85°C Industrial -55°C to +125°C Military		
Storage Temperature	-55°C to +125°C		

Note: The characteristics of the frequency temperature stability follow that of AT cut thickness, chase model

CIRCUIT DESIGN

A conventional CMOS Pierce Oscillator is shown below. The crystal oscillates at a frequency f_0 above the crystal's series-resonant frequency f_s . The crystal is effectively inductive and, in combination with R_A , C_d and C_g in the feedback loop, provides approximately 180° phase shift necessary to obtain oscillation. Typical component values for a Pierce Oscillator using a 16 MHz crystal with a 74HC04 hex inverter are shown below:

Typical Application as Pierce Oscillator
 Using 74HC04 CMOS Hex Inverter at 5 VDC

CONVENTIONAL CMOS PIERCE OSCILLATOR CIRCUIT

