

École nationale supérieure des Arts Décoratifs

EnsadLab, le laboratoire de l'école des Arts Déco
www.ensad.fr

Laser Drawer

Dispositif de projection laser open source

Rapport final public

Antoine Villeret - Ensadlab/Diip 2013
antoine.villeret@gmail.com

20 juin 2013

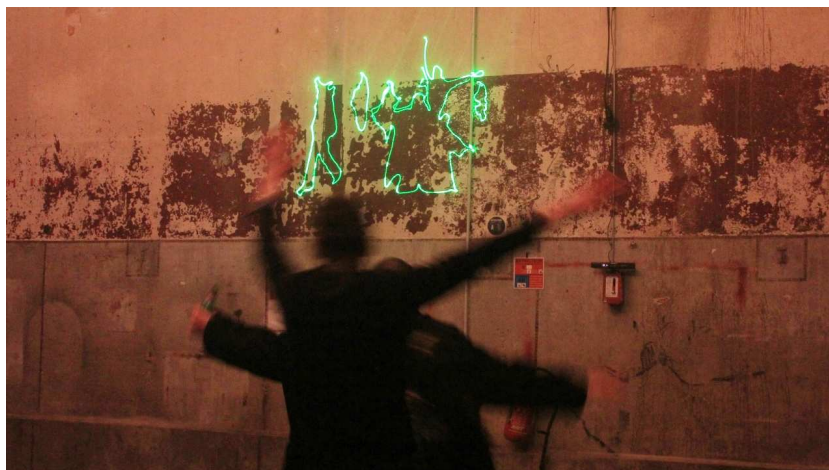


Table des matières

1	État de l'art et des techniques	2
1.1	Sélection de projets artistique	2
1.1.1	Jean-Michel Jarre – La harpe laser – années 80 . .	2
1.1.2	Alvaro Cassinelli – <i>Score Light</i> – 2008	2
1.1.3	Robin Fox – <i>Laser Show</i>	3
1.1.4	UVA – <i>Speed of light</i> – 2010	3
1.1.5	Robert Henke – <i>Fragiles Territoires</i> – 2012	3
1.1.6	Samuel Bianchini – <i>Enseigne</i> – 2012	4
1.1.7	Hyundai and WhiteVoid – <i>Fluidic - Sculpture in motion</i> – 2013	4
1.1.8	Daito Manabe – <i>UV laser fade out</i> – 2010	5
1.1.9	Antoine Villeret – <i>Silhouette</i> – 2013	5
1.1.10	Marshmallow Laser Feast – <i>Laser Forest</i> – 2013 . .	5
1.2	État des techniques	10
1.2.1	Un peu d'histoire	10
1.2.2	Les projecteurs d'animation	10
1.2.3	Les interfaces ILDA	10
2	Le projet <i>Laser Drawer</i>	13
2.1	Cahier des charges	13
2.2	Conception	13
2.2.1	Matériel	13
2.2.2	Logiciel	14
2.3	Comparaison avec l'interface Galaxy Laser Show	17
A	Schéma électronique	21
B	Législation sur les lasers	26
C	Crédit image	30

Laser Drawer est un projet de dispositif de projection laser open source. Après un état de l'art et des techniques, ce document présente à la fois le dispositif ainsi que sa réalisation. On trouvera en annexe d'une part le schéma électronique du prototype réalisé ainsi qu'une note sur la réglementation des lasers et les problèmes qui y sont liés.

1 État de l'art et des techniques

Plutôt qu'un état de l'art et des techniques exhaustif, je présente ici tout d'abord quelques projets artistiques qui utilisent le laser et ensuite plusieurs solutions techniques qui permettent de piloter les projecteurs laser depuis un ordinateur.

1.1 Sélection de projets artistique

1.1.1 Jean-Michel Jarre – La harpe laser – années 80

La harpe laser est un instrument de musique visuel imaginé par Jean-Michel Jarre. Plusieurs versions ont vu le jour depuis les années 80, toujours basées sur le même principe : la coupure d'un faisceau laser à l'aide de la main déclenche un synthétiseur.

Selon Jean-Michel Jarre, le laser permet de « pouvoir partager avec le public [qui] se trouve au fond d'une salle [...] le jeu musical d'une manière visible et à la fois sensible ». Ce dispositif a pourtant une expressivité limitée car il n'y a pas de contrôle de vélocité ni d'*aftertouch*¹.

1.1.2 Alvaro Cassinelli – *Score Light* – 2008

Score Light est un projet d'Alvaro Cassinelli dans lequel un petit faisceau laser suit les contours de formes posées sur une table (cf. 1). Il est possible de bouger les formes et d'en ajouter pour modifier la trajectoire du faisceau laser. Ce dispositif s'appuie sur le développement d'un module laser de faible puissance associé à une caméra, dispositif similaire à ce que l'on peut trouver dans les douchettes lasers pour scanner les codes barres. Ce projet préfigure le projet *Laser Game* en cours de développement et où le laser est projeté sur le t-shirt du joueur et rebondit sur les motifs à la manière d'une bille de flipper.

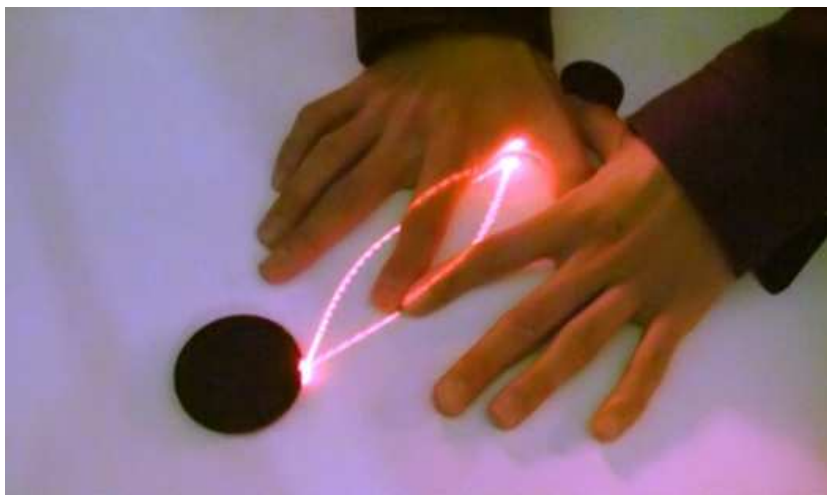


FIGURE 1 – Alvaro Cassinelli – *Score Light*

1. L'*aftertouch* est un terme venant de la norme MIDI et qui qualifie la possibilité de moduler le son en modifiant la pression exercée sur les touches d'un instrument (notamment à clavier).

1.1.3 Robin Fox – *Laser Show*

Robin Fox utilise dans ses shows le laser comme un oscilloscope pour visualiser le signal audio qu'il génère en temps réel avec le logiciel Max/MSP. Il utilise la fumée pour matérialiser le faisceau et faire apparaître des volumes coniques dans l'espace (cf. 2). Le show est impressionnant mais la corrélation systématique du son avec la visualisation le rend vite ennuyeux. Robin Fox utilise une carte son MOTU Traveller et un boîtier d'adaptation pour piloter son laser vert de 350 mW qu'il n'hésite pas envoyer dans les yeux du public.

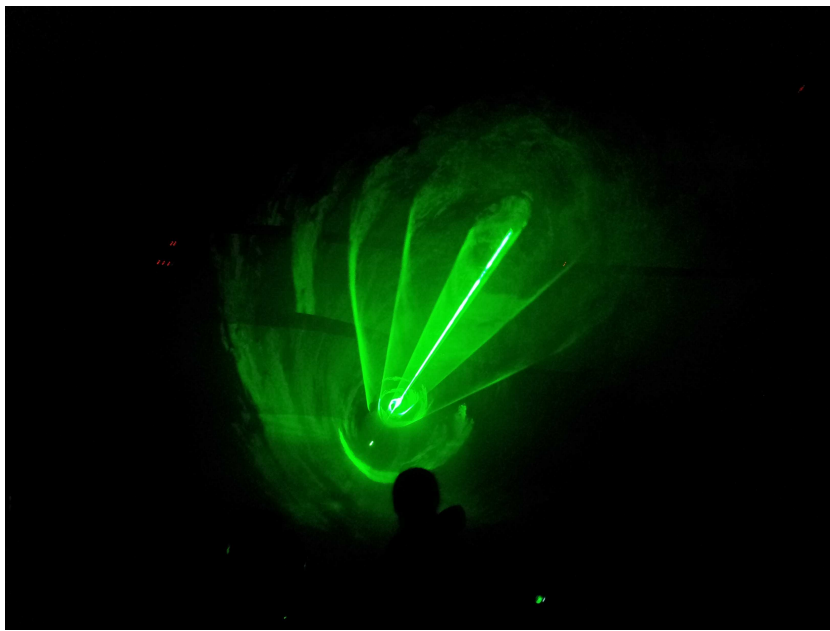


FIGURE 2 – Robin Fox – *Laser Show*

1.1.4 UVA – *Speed of light* – 2010

Speed of light est un labyrinthe d'installations laser dans lequel les spectateurs sont invités à déambuler. Plusieurs installations présentent des formes géométriques tissées à partir de quelques faisceaux lasers déviés par des miroirs fixes. Une autre affiche un texte de manière interactive. Dans une interview on les voit travailler avec le logiciel Max/MSP, il est fort probable qu'ils l'aient utilisé pour piloter les lasers mais je n'ai pas pu le vérifier.

1.1.5 Robert Henke – *Fragiles Territoires* – 2012

Fragiles territoires est une installation interactive et générative de Robert Henke qui représente un réseau animé. Le public influe sur les algorithmes générant les formes géométriques et le son. Cette installation a été présentée à l'espace LU de Nantes. Robert Henke utilise une carte son MOTU Traveller et quatre lasers bleu-jaunes de 5 W. Face à la dangerosité de ces lasers et au fait de leur utilisation en intérieur, des mesures spéciales de sécurité ont été prises (cf. B).

1.1.6 Samuel Bianchini – *Enseigne* – 2012

Enseigne est une installation générative de Samuel Bianchini. Des mots issus du lexique scientifique et tirés des sites internet des lieux d'enseignement supérieur sont projetés à l'aide d'un laser sur la façade d'un bâtiment. Les mots sont écrits dynamiquement avec une calligraphie manuscrite, des ratures, des hésitations, des barrés comme si quelqu'un était entrain d'écrire en temps réel. Cette installation utilise un laser vert de 10 W piloté par une interface Galaxy Laser Show. Un logiciel a spécialement été développé pour pouvoir piloter cette interface depuis Puredata (cf. 1.2.3 et figure 5).

1.1.7 Hyundai and WhiteVoid – *Fluidic - Sculpture in motion* – 2013

Pour la semaine du design de Milan, Hyundai a présenté au musée temporaire du nouveau design l'installation *Fluidic - Sculpture in motion*. Cette installation interactive utilise un système de captation tridimensionnel du mouvement pour que les spectateurs interagissent avec un nuage de milliers de balles de ping-pong illuminé par de puissants lasers bleus (cf. figure 6).

1.1.8 Daito Manabe – *UV laser fade out* – 2010

Daito Manabe utilise le laser dans plusieurs de ces projets. *UV laser fade out* utilise un laser ultra-violet pour dessiner sur un support phosphorescent. Le laser charge des petites surfaces successivement, la décharge progressive crée des niveaux de luminosité différents et fait apparaître une image (cf. figure 7).

Dans *Pulse*, Daito Manabe utilise des lasers montés sur des bras robotisés et des miroirs placés dans tout l'espace pour dévier les trajectoires et créer un jeu de lumière.

1.1.9 Antoine Villeret – *Silhouette* – 2013

Silhouette est une installation interactive dans laquelle un projecteur laser dessine les silhouettes animées des spectateurs. Lorsqu'un spectateur passe devant la caméra un trait vert apparaît au mur. S'il avance, le

trait devient forme et le spectateur se reconnaît alors. Lorsqu'un spectateur passe devant la caméra un trait vert apparaît au mur. S'il avance, le trait devient forme et le spectateur se reconnaît alors. Le dispositif attire les visiteurs qui sont curieux des formes animées projetées au mur (cf. 8). Lorsque le public est trop nombreux, les silhouettes s'entremêlent et deviennent abstraites, à tel point que certains ne rendent pas compte que c'est eux qui sont représentés. Lorsqu'il y a moins de monde, les silhouettes deviennent plus nettes. Pour autant, le spectateur ne réalise pas forcément qu'il est représenté en temps réel. Souvent, lorsqu'il s'en rend compte, un jeu avec le dispositif débute. Les spectateurs dansent, sautent, font des grimaces pour tester le dispositif et chercher ses limites. Cette installation utilise un capteur Kinect pour extraire les silhouettes ainsi que l'interface décrite dans la suite de ce document pour piloter le laser.

1.1.10 Marshmallow Laser Feast – *Laser Forest* – 2013

Laser Forest utilise 150 lasers placés en haut de mâts d'environ 3 m constituant ainsi une « forêt ». La souplesse naturelle des mâts fait osciller les lasers dès lors qu'on les touche (cf. 9). Ces lasers dessinent des formes mouvantes dans l'espace et à chaque « arbre » est associé un son.



FIGURE 3 – UVA – *Speed of light*

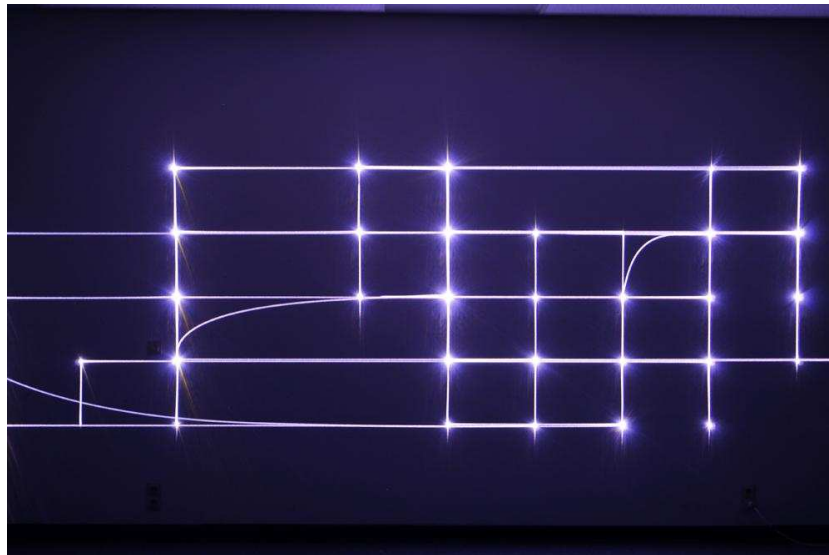


FIGURE 4 – Robert Henke – *Fragiles Territoires*

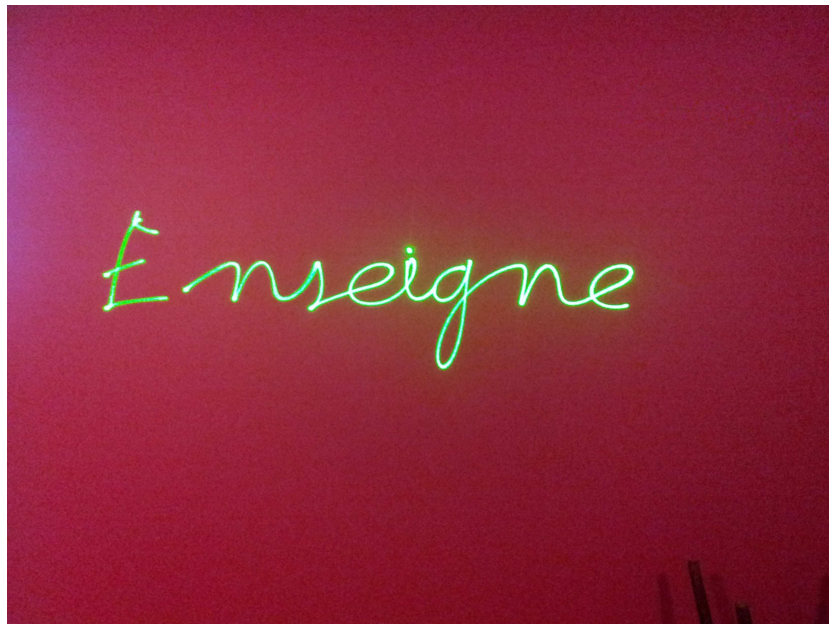


FIGURE 5 – Samuel Bianchini – *Enseigne*



FIGURE 6 – Hyundai and WhiteVoid – *Fluidic - Sculpture in motion*



FIGURE 7 – Daito Manabe – *UV laser fade out*

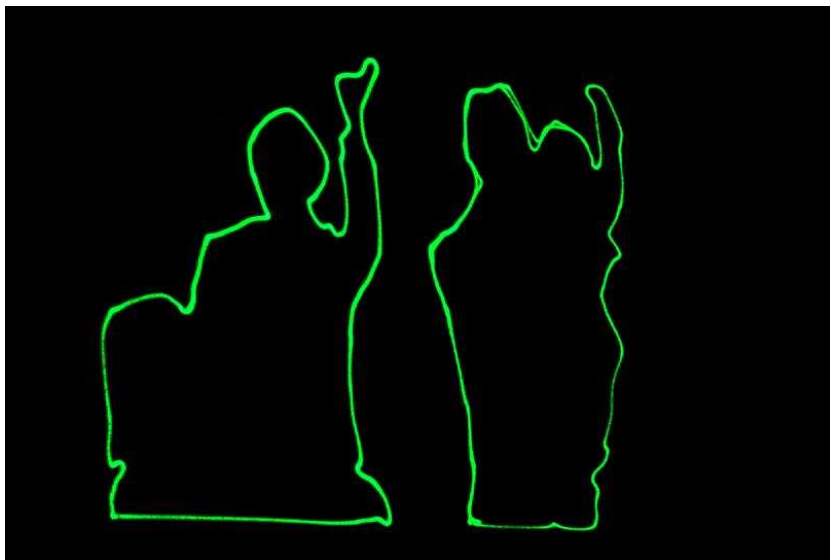


FIGURE 8 – Antoine Villeret – *Silhouette*

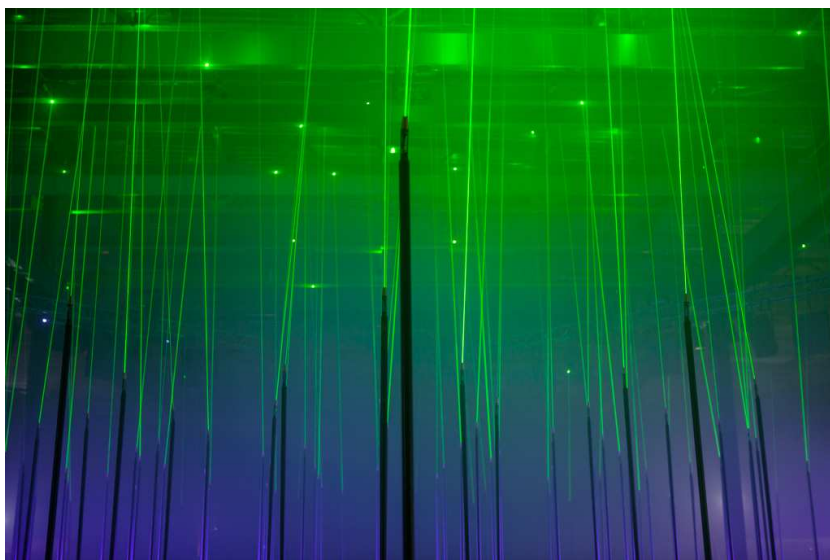


FIGURE 9 – Marshmallow Laser Feast – *Laser Forest*

1.2 État des techniques

1.2.1 Un peu d'histoire

Le laser a été conceptualisé par Albert Einstein vers 1917. Le premier laser a été construit en 1958. Son utilisation industrielle (découpe notamment) commence à la fin des années 70, depuis il est extrêmement utilisé : lecteur disque optique (CD, DVD...), lecteur de code barre, découpe de matériaux, arme de détection, capteur de distance. . . Jean-Michel Jarre fut, à ma connaissance, le premier à utiliser le laser dans un but artistique avec sa harpe laser.

1.2.2 Les projecteurs d'animation

Dans les projecteurs d'animation, le faisceau laser est dévié par des miroirs mobiles très rapides effectuant un balayage permanent. La persistance rétinienne permet de voir la trace du laser. Certains projecteurs sont dotés d'une entrée DMX qui permet de choisir le motif parmi une bibliothèque intégrée au projecteur et d'en modifier certains paramètres comme l'échelle ou la position. En revanche, le protocole DMX ne permet pas de dessiner des formes arbitraires. Pour cela, certains projecteurs sont équipés d'une entrée ILDA. Ce protocole analogique permet de contrôler directement les scanners et l'intensité des sources. On peut donc dessiner des formes arbitraires.

1.2.3 Les interfaces ILDA

Bien que le protocole ILDA soit assez répandu sur les projecteurs d'animation à partir du milieu de gamme, il existe peu d'interfaces sur le marché permettant de les contrôler depuis un ordinateur.

Pangolin Le leader du marché dans ce domaine est Pangolin qui propose une suite logicielle et matérielle complète pour contrôler les laser. Au niveau logiciel, ils proposent des solutions pour réaliser de petits show laser (Quick Show) intégrant un séquenceur d'animation. Il propose également un SDK pour développer des applications spécifiques et des utilitaires de vectorisation pour convertir des images fixes. Au niveau matériel, Pangolin a développé une chaîne technique très complète. On trouve des interfaces ILDA USB, réseau, OEM mais également des matrices permettant de distribuer le signal à différents projecteurs et aussi des optiques spécifiques (pour projeter à 360° par exemple).

Malheureusement tout ceci est uniquement disponible pour Windows. Les solutions Pangolin sont assez onéreuses puisque l'interface avec le logiciel de base est commercialisée au prix de 650€ et les versions professionnelles dépassent les 4 000 €.

Electro-concept Electro-concept² a développé deux interfaces USB ILDA, Miniilda et Maxiilda commercialisées respectivement au prix de 219€ et 349€. Ces deux interfaces fonctionnent sous Windows uniquement. J'ai pu testé l'interface Miniilda et j'ai développé un contrôleur avec Puredata. Mais l'interface manque de stabilité et Electro-concept est trop peu réactif à mes questions pour ce genre développement. J'ai donc abandonné cette piste assez tôt.

Galaxy Laser Show Pour le projet *Enseigne* de Samuel Bianchini (cf. 5), nous avons travaillé avec la société qui édite l'interface Galaxy Laser Show au développement d'un serveur cross-plateforme. Ceci constituait une bonne initiative, même si le logiciel n'est pas open source, c'était la première interface qui fonctionne sous tous les systèmes d'exploitation que je connaisse. L'interface est basé sur un serveur UDP programmé en C# sur la plateforme .NET³ qui communique avec l'interface USB qui contient un FPGA. Potentiellement, n'importe quel logiciel capable d'envoyer des données en UDP peut donc dessiner avec un laser et cette interface.

J'ai testé les versions 2 et 3 de l'interface Galaxy. Avec la version 2, le serveur cesse de répondre lorsqu'on envoie des trames réseau trop petites ou lorsque la fréquence est trop élevée (au delà de 20 kpps). Malgré ce problème, cette interface a été utilisée à plusieurs reprises pour la présentation d'*Enseigne* et de la première version de mon installation *Laser Drawer*. Le modèle 3 que j'ai eu en test semble défectueux : l'interface n'est plus reconnue dès lors que quelque chose est reliée au connecteur SUB-D25.

Le projet bILDA⁴ bILDA est un projet d'interface laser open source constitué d'une interface électronique USB et d'un logiciel pour l'utiliser. Ce projet est actuellement obsolète : le micro-contrôleur AN2135SC de Cypress Semiconductor, élément principal de la carte électronique, n'est plus fabriqué. De plus, ses performances étaient assez modeste : les convertisseurs analogique-numérique DAC0830 ont une quantification de 8 bit seulement.

Etherdream⁵ Etherdream est une interface ILDA Open Source extrêmement polyvalente. Elle possède une interface Ethernet permettant d'envoyer des trames ILDA jusqu'à 100 kpps. Son slot pour carte MicroSD permet de sauvegarder la configuration et de jouer des animations de manière autonome. Elle est entièrement configurable en OSC et intègre une correction de perspective. Je n'ai malheureusement découvert

2. <http://www.boutique-electroconcept.com/boutique/>

3. .NET est une technologie de Microsoft qui est disponible sur Mac OS X et Linux à travers le framework open source Mono.

4.

5. <http://ether-dream.com/>

cette interface qu'après avoir conçu la mienne. Elles sont extrêmement similaires dans les fonctions disponibles. L'interface Etherdream est vendue 249 \$.

Les interfaces alternatives Comme évoqué dans la partie 1.1, plusieurs artistes utilisent des cartes sons pour piloter les lasers. On retrouve à plusieurs reprises notamment la MOTU Traveller qui ne possède pas de filtres continus en sortie, ce qui permet d'envoyer un signal non symétrique par rapport à la masse et donc de décaler verticalement et horizontalement le dessin du laser par rapport au centre de la projection. Ces artistes utilisent leur propre logiciel (souvent conçu à partir de Max/MSP) et leur propre interface d'adaptation du signal électrique.

2 Le projet *Laser Drawer*

2.1 Cahier des charges

Versatilité La première contrainte du dispositif est sa compatibilité avec les lasers d’animation du commerce. La norme ILDA définit un protocole analogique pour piloter ces lasers. Le dispositif doit donc être conforme à cette norme.

Prix Les solutions (pack interface + logiciel) du commerce coûtent plusieurs centaines d’euros, *Laser Drawer* est conçu à partir de matériel peu cher et d’un logiciel open source gratuit.

Compatibilité *Laser Drawer* est compatible avec la plupart des systèmes d’exploitation (Microsoft Windows, Apple Mac OS X, et les distributions Linux, notamment Debian et ses dérivés Ubuntu et Raspbian).

2.2 Conception

Le dispositif *Laser Drawer* se compose d’une partie matérielle et d’un logiciel pour la piloter.

2.2.1 Matériel

L’interface matériel de *Laser Drawer* est basée sur une carte son et un étage d’adaptation à la norme ILDA.

Interface son La carte son ESI UDJ-6 a été choisie car elle est conforme à la norme USB Audio Class 1.0 et donc de fait compatible avec la plupart des systèmes (notamment Linux). Elle possède 6 sorties analogiques et aucune entrée, idéal pour piloter un laser tricolore. Elle fonctionne à une fréquence de 48 kHz en 24 bit, ce qui permet de piloter des scanners jusqu’à 48 kpps avec une grande précision.

Cette carte son possède des filtres de courant continu en sortie (DC filter) qu’il convient de supprimer pour pouvoir décaler le dessin par rapport à la position d’origine du laser. Pour ce faire, on court-circuite les condensateurs en soudant des fils comme indiqué en rouge sur la figure 10.

Étage d’adaptation La carte son fournit un signal de 0,6 V crête à crête alors que la norme ILDA utilise des signaux de 10 V crête à crête. Un étage d’adaptation est donc nécessaire pour amplifier le signal. Pour des raisons pratiques, j’ai choisi d’alimenter cet étage d’adaptation directement depuis l’alimentation USB de la carte son (cela évite d’ajouter une alimentation externe). J’ai donc choisi un amplificateur opérationnel rail-to-rail permettant d’atteindre en sortie la valeur de la tension d’alimentation (ici 5 V). De plus le laser que j’avais à disposition pour réaliser

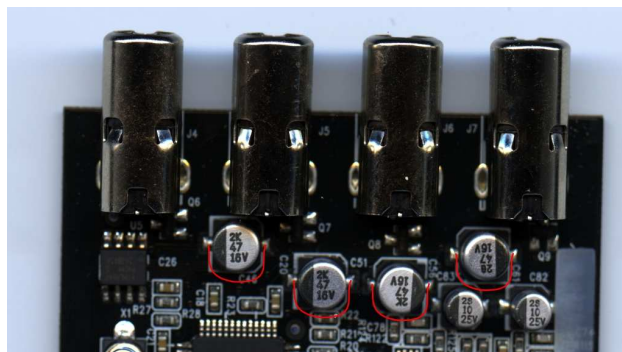


FIGURE 10 – Filtre DC à court-circuiter

ces développements n'est pas conforme à la norme ILDA, notamment l'entrée du signal ILDA n'est pas symétrisée. Pour que l'interface soit compatible avec ce laser, j'ai décidé de ne pas me conformer à la norme (pour la réalisation du prototype) et d'avoir des sorties asymétriques.

Ce choix a plusieurs conséquences. D'une part, le signal est plus sensible aux interférences, et donc il est nécessaire de réduire autant que possible les longueurs de câbles entre l'interface et le laser. D'autre part, seule la partie positive du signal a été gardée et donc au lieu d'avoir une tension crête-à-crête de 10 V comme préconisé par la norme, nous avons seulement 5 V. L'aire de balayage du laser est donc réduite de moitié. A contrario, ce choix simplifie le montage électronique.

2.2.2 Logiciel

Le logiciel qui pilote l'interface est un serveur OSC. Il reçoit les points sous forme de blobs⁶ envoyés en un seul message. Tous les blobs doivent avoir la même taille. Les blobs correspondent respectivement aux canaux X, Y, rouge, vert et bleu. Trois, quatre ou cinq blobs peuvent être envoyés simultanément, pour mettre à jour autant de tables. Les paramètres de projection (échelle, taille, translation, vitesse...) sont quant à eux envoyés séparément avec un message OSC par paramètre. Le tableau 1 donne les différents types de messages supportés par le serveur. Les points sont stockés dans plusieurs tables qui sont ensuite lues, transformées selon les paramètres de la projection et envoyées à la carte son.

La correction de fin de ligne décale la lecture de la table d'intensité pour anticiper la latence d'allumage et d'extinction du laser. Ceci considère toutefois que cette latence est constante, ce qui n'est pas vérifié.

Ce serveur, ainsi que le client associé, sont programmés en Puredata. Tous deux dépendent de la bibliothèque ILDA de Puredata qui contient

⁶. `blob` est un type de données OSC, un conteneur pour un bloc de données arbitraires

Message	Paramètre b : blob f : float	Effet
/arrays	bbb{b}{b}	Mise à jour des tables avec les données des blobs
/setting/offset	fff	Décalage des canaux, respectivement X, Y et intensité
/setting/scale	fff	Échelle respectivement en X, Y et intensité
/setting/invert	fff	Inversion des canaux, respectivement X, Y et intensité
/setting/intensity	fff	Intensité des canaux de couleur, respectivement R, G et B
/setting/blanking_off	f	Désactive le contrôle de l'intensité du laser
/setting/angle_correction	f	Paramètre de correction d'angle (non implémentée pour le moment)
/setting/end_line_correction	f	Paramètre de correction de fin de ligne
/setting/scan_freq	f	Fréquence en kHz des scanners
/setting/perspective_correction	f	Active la correction de perspective
/setting/dst_point	ffffffff	Points définissant l'espace de projection pour corriger la perspective

TABLE 1 – Messages OSC supportés par le serveur

trois objets externes spécifiques à ce projet. `ildasend` et `ildareceive` servent, respectivement, à envoyer et à recevoir les paquets OSC. Ils dépendent de la bibliothèque `liblo`⁷. L'objet `ildafile`, basé sur `binfile` de Martin Peach, lit les fichiers d'animation `.ild` et charge leur contenu, trame par trame, dans une table que l'on peut ensuite envoyer au serveur.

L'architecture client/serveur OSC du logiciel permet de déporter le serveur sur une machine différente. Le serveur a été testé sur une Raspberry Pi. Malheureusement sur cette carte, le port ethernet est sur le même bus que les ports USB et lorsqu'on envoie des paquets trop grands, il y a des coupures dans la communication avec la carte son. Il en résulte des défauts visibles dans la trajectoire du laser. Il est néanmoins pourtant peut être possible de faire fonctionner correctement cette interface modifiant les paramètres du driver (notamment en désactivant le mode turbo du contrôleur Ethernet) mais ces pistes n'ont pour l'instant pas été explorées.

Les sources du logiciel ainsi que les exemples sont disponibles sur mon github : https://github.com/avilleret/laser_driver.

7. <http://liblo.sourceforge.net/>

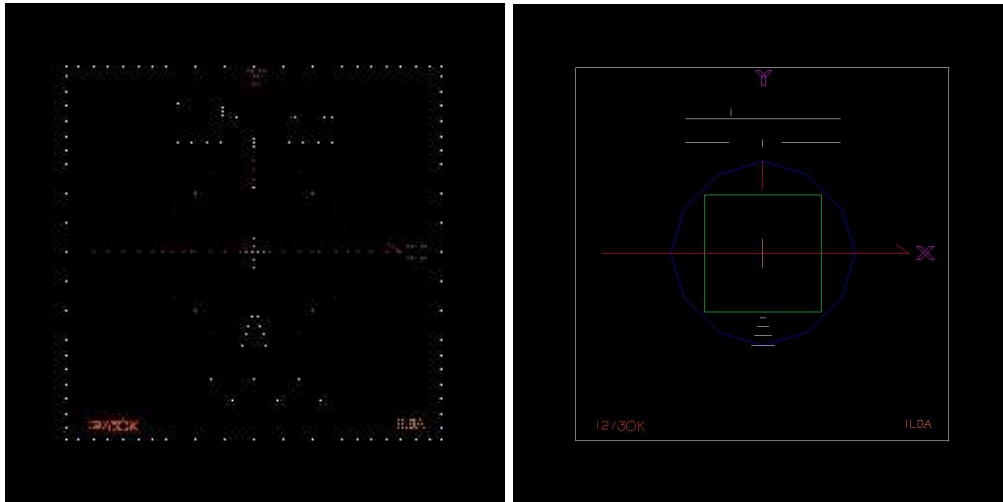
2.3 Comparaison avec l'interface Galaxy Laser Show

Cette partie met en parallèle les performances de l'interface décrite ci-avant et de l'interface Galaxy Laser Show. Pour cela, j'ai utilisé le motif de test et de réglage ILDA (cf. figure 11) que j'ai observé à la fois à l'oscilloscope et projeté par le laser. Ce pattern permet de régler les lasers en corrigeant la vitesse et l'amortissement des galvanomètres. Sur la figure 11c le cercle bleu apparaît projeté à l'intérieur du carré vert alors qu'il est situé à l'extérieur sur le dessin 11b. C'est ainsi qu'un laser bien réglé doit réagir d'après les recommandations de la norme ILDA.

La première constatation est que l'interface Galaxy n'interpole pas de manière continue entre les points. Sur la figure 11a on voit que le cercle bleu est constitué de douze points, sur la figure 12b il en possède trente alors que sur la figure 12a le cercle est continu. Ceci est problématique pour deux raisons. Tout d'abord on verra les points discrets au lieu d'un trait avec une diode extrêmement réactive. De plus, en rajoutant des points le tracé est faussé et le cercle apparaît en dehors du carré avec un laser bien réglé (cf. figure 14b).

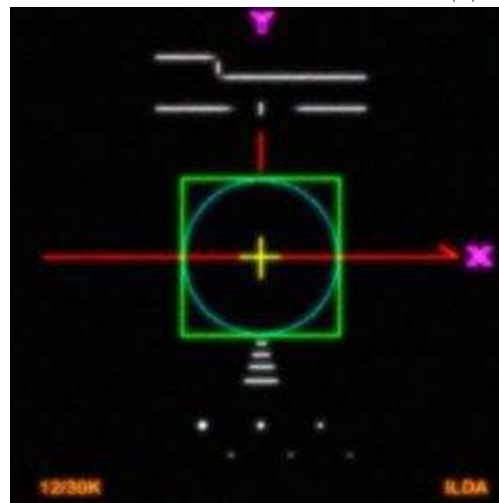
On constate sur la figure 13 que l'interface Galaxy est plus stable que la mienne. Néanmoins, il apparaît des points plus lumineux au fur à mesure que l'on augmente la vitesse.

Les défauts qui apparaissent sur le cercle de la figure 13a sont des non-linéarités des AOP dues à l'utilisation de ceux-ci dans des conditions limites. Lors des tests l'interface était alimentée depuis l'alimentation des scanners en $+15\text{ V}/-15\text{ V}$. Les AOP LM358 en place à ce moment là étaient donc utilisés dans des conditions limites car la tension d'alimentation mesurée de 31 V est proche de la limite théorique de 32 V . L'utilisation d'autres AOP et d'une tension d'alimentation plus faible devrait régler ce problème.



(a) Points

(b) Vecteurs



(c) Projeté avec un laser réglé

FIGURE 11 – Points et vecteurs constituant le pattern de test ILDA

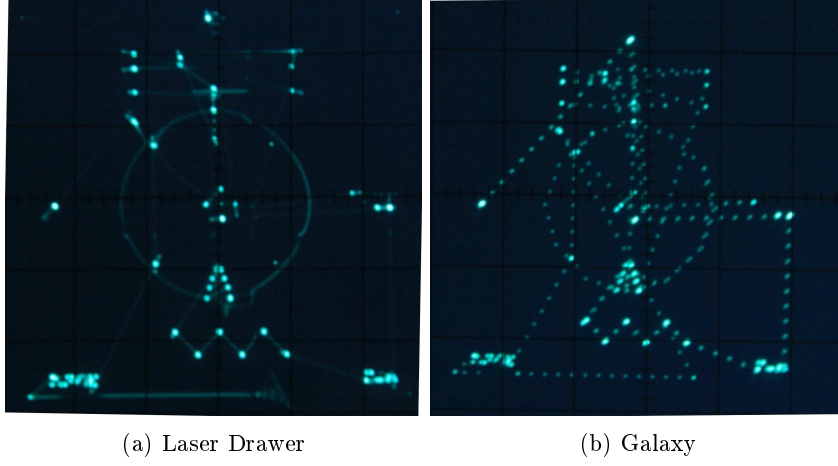


FIGURE 12 – Observation à l’oscilloscope à 12 kpps

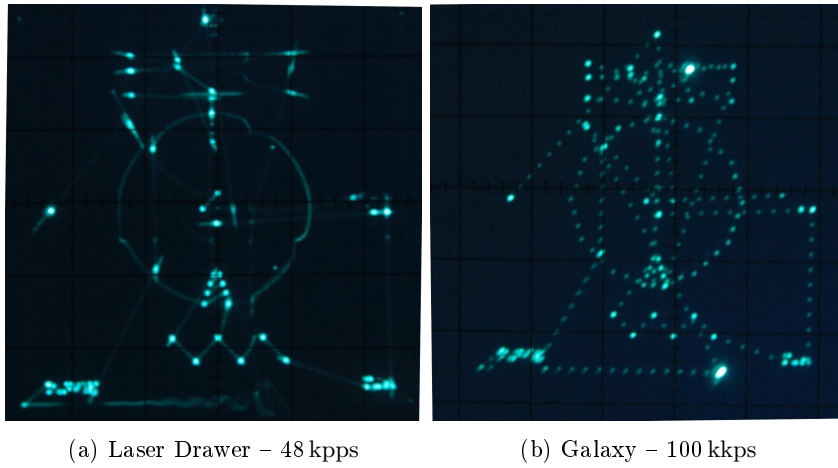
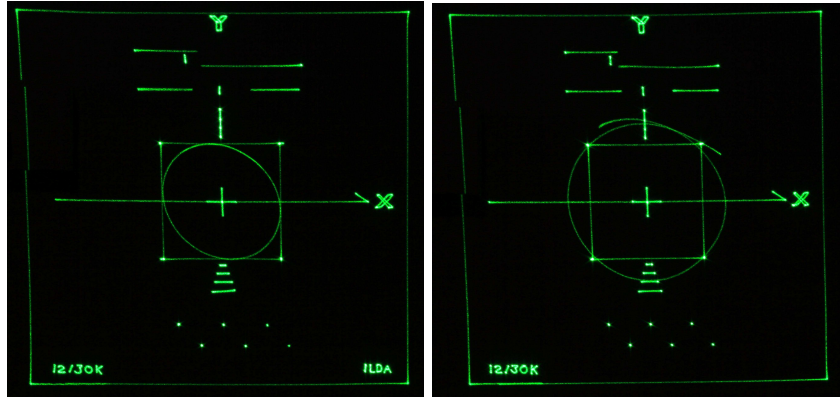


FIGURE 13 – Observation à l’oscilloscope à la vitesse limite



(a) Laser Drawer

(b) Galaxy

FIGURE 14 – Projection au laser à 12 kpps

Annexe A Schéma électronique

La figure 15 présente le montage du prototype réalisé. Ce schéma fonctionne, néanmoins il souffre de quelques défauts. Tout d'abord, il n'y a pas de protection contre les court-circuits en sortie. Les AOP risquent donc d'être endommagés lors d'un mauvais branchement ou d'un défaut de l'équipement relié.

Le convertisseur DC/DC 5 V isolé permet d'inverser la tension d'alimentation. Grâce à ce composant et aux AOP rail-to-rail, le montage peut être alimenté par l'USB. Toutefois, l'alimentation prélevée sur la carte son n'est que de 4,85 V et le convertisseur la transforme en -4,95 V, l'alimentation est alors dissymétrique.

Mais ces composants sont assez onéreux. On pourrait réduire les coûts, sans réduire la qualité, en prenant une alimentation ailleurs, sur l'alimentation des scanners à l'intérieur du laser par exemple qui fournit généralement +15 V et -15 V. Dans ce cas, un double régulateur +9 V / -9 V (LM7809 et LM7909) et des AOP types NE5532 (ou équivalents) sont suffisants.

Une autre limitation de ce montage est sa sensibilité à la capacité des longs câbles. Lorsqu'un câble long (> 50 m) est utilisé, il ajoute une charge capacitive non négligeable et des oscillations parasites peuvent apparaître. Il convient dans ce cas de rajouter des condensateurs de 220 pF dans la contre-réaction des AOP, en parallèle des résistances de 10 k Ω .

La figure 16 présente un schéma amélioré permettant de piloter un laser RGB. Les sorties sont symétrisées par des AOP et protégées des courts circuits par des résistances. Des condensateurs dans la contre-réaction des AOP évitent les oscillations spontanées.

Le convertisseur DC/DC XP-POWER IH0509S possède une large plage de tension d'entrée (de 4,5 V à 9 V) et une double tension de sortie régulée +9 V / -9 V ce qui permet d'utiliser des AOP non rail-to-rail et donc moins onéreux et d'obtenir la tension régulée avec l'alimentation USB de 4,85 V. J'ai choisi des NE5532 pour leurs performances audio et leur très bon rapport qualité/prix. Les jumpers JP1 à JP6 sont des fils montés en surface pour faire des liaisons et éviter d'avoir un typon double face. Les liaisons des jumpers sont représentées en jaune sur le schéma de la figure 17 page 24.

La figure 17 page 24 présente le circuit électronique avec les composants pour référence. La figure 18 page 24 présente le typon. Le tableau 2 page 23 liste les composants utilisés.

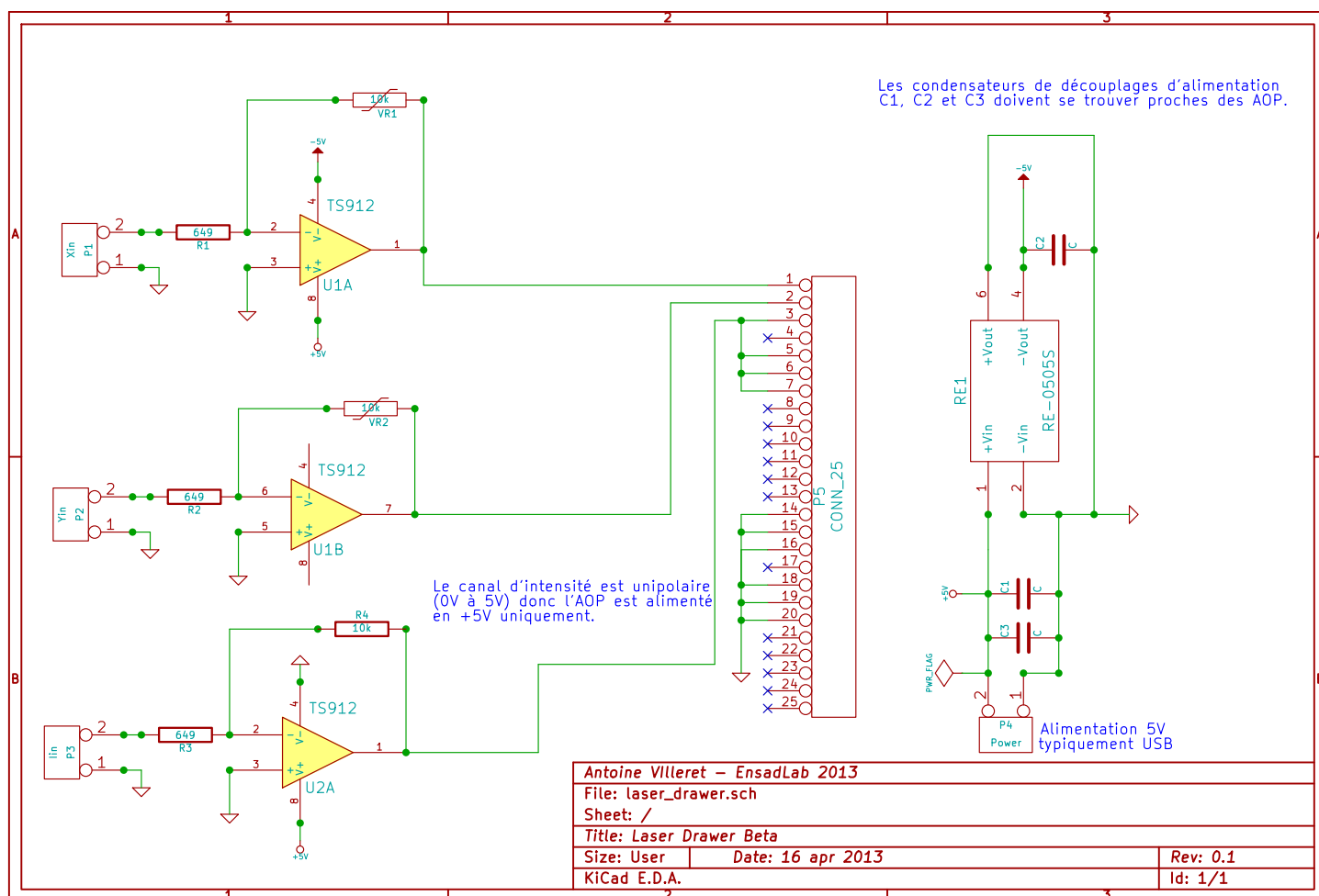


FIGURE 15 – Schéma du prototype réalisé

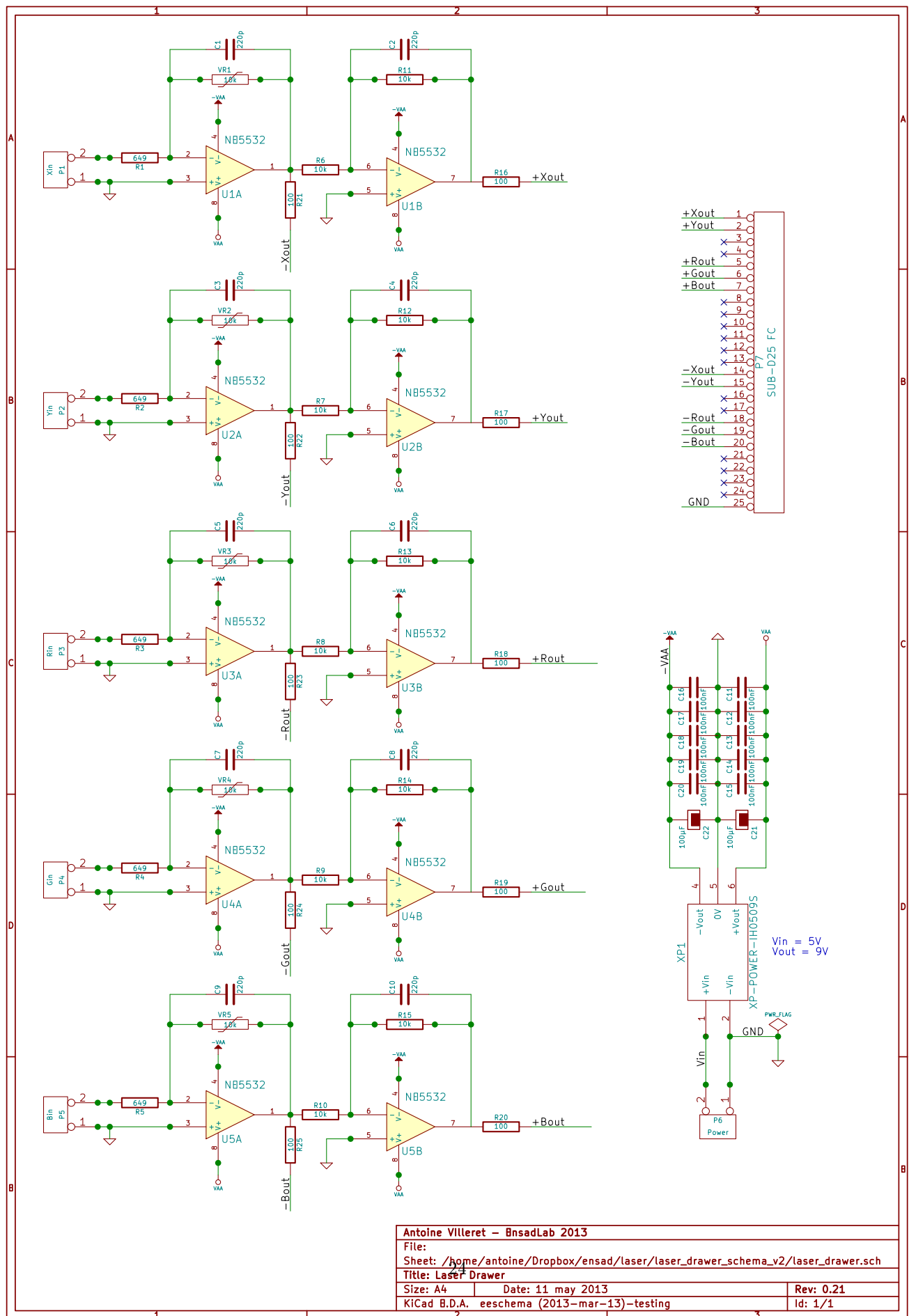


FIGURE 16 – Schéma de la version RGB symétrisée

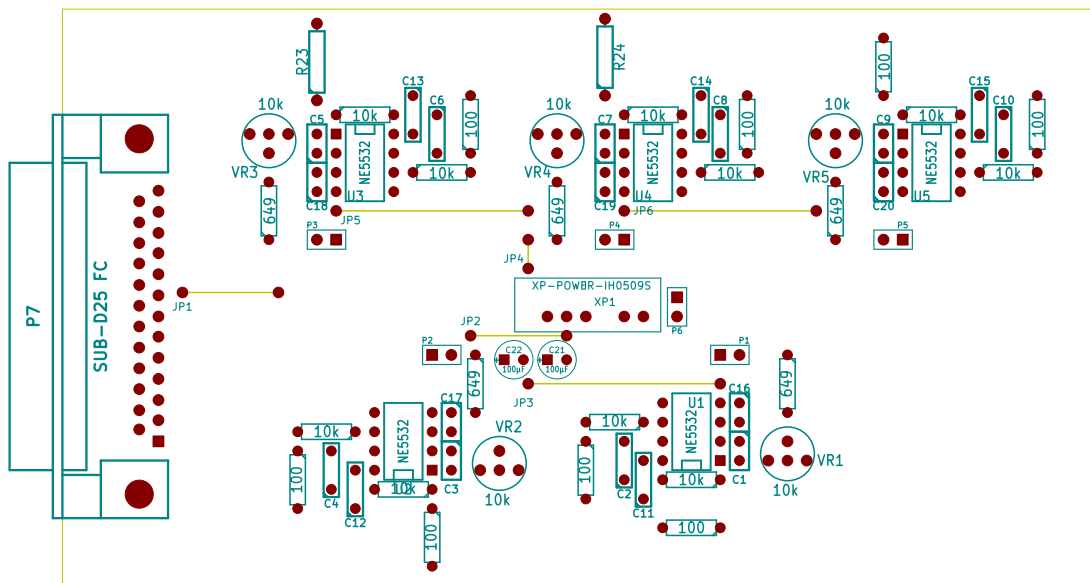


FIGURE 17 – Implantation des composants

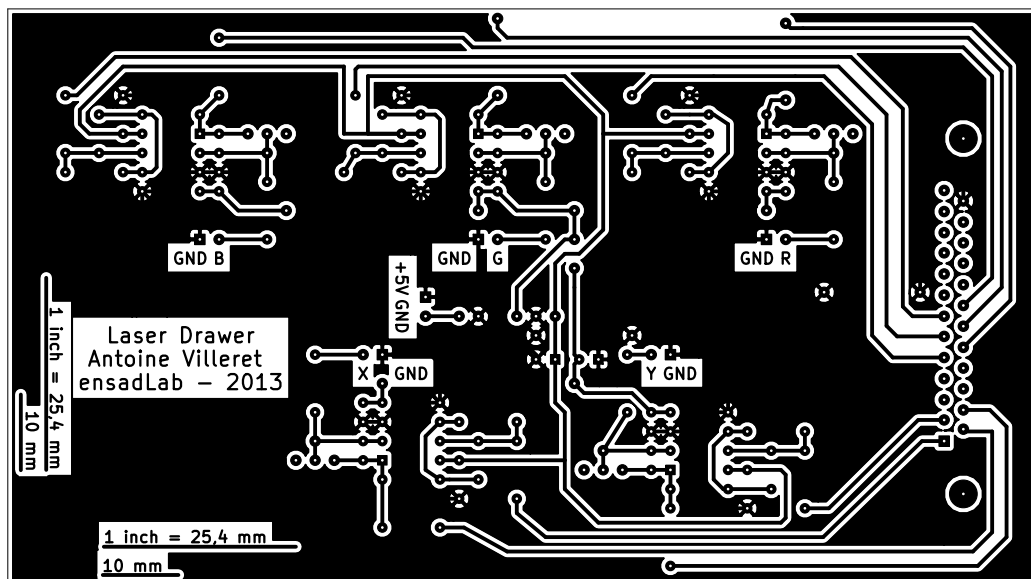


FIGURE 18 – Typon

Ref.	Valeur	Quantité	ref. Farnell
C1 à C10	220 pF	10	
C11 à C20	100 nF	10	
C21, C22	100 μ F	2	
JP1 à JP6	JUMPER	6	
P1 à P6	2x1 PIN HEADER	6	9731148
P7	SUB-D25 FC	1	1099296
R1 à R5	649 Ω	5	
R6 à R15	10 k Ω	10	
R16 à R25	100 Ω	10	
U1 à U5	NE5532	5	1106091
VR1 à VR5	10 k Ω trimer	5	9354301
XP1	XP-POWER IH0509S	1	8727880

TABLE 2 – Liste des composants utilisés dans le circuit

Annexe B Législation sur les lasers

Les lasers peuvent être dangereux. Une forte quantité de lumière cohérente concentrée sur une petite surface fait monter ponctuellement la température. C'est pour cela que les lasers sont utilisés pour découper des matériaux. Mais cette propriété représente un danger potentiel, à la fois pour les personnes mais aussi pour les biens. On peut être brûlé par un laser et les yeux sont également très sensibles. Par exemple, il est possible d'allumer une cigarette avec un faisceau laser de 5 W. Il est donc nécessaire de prendre des précautions dans la mise en œuvre d'un laser. Tout cela est encadré par des lois et décrets qui parfois sont difficiles à appliquer.

Cette annexe tente d'éclaircir les mesures réglementaires et de les relativiser par rapport à l'utilisation que l'on fait des lasers.

Les risques

Les lasers peuvent brûler la peau et surtout la rétine. Les lésions rétinienne sont irréversibles. On peut donc devenir définitivement aveugle en regardant un laser à l'œil nu.

Les lasers de classe 4 peuvent déclencher un incendie. Si le faisceau reste fixe sur une surface inflammable, elle s'enflamme rapidement.

Pour que l'exposition reste sans danger, la quantité d'énergie reçue ne doit pas dépasser le seuil de l'Exposition Maximale Permise (EMP). L'EMP est définie comme le dixième de la dose qui a une chance sur deux de produire une lésion dans les conditions les plus défavorables. Elle est mesurée sur la cornée ou sur la peau pour une longueur d'onde et un temps d'exposition donnés. L'EMP est exprimée en W/cm^2 ou J/cm^2 . Sur la figure 19, on voit que l'exposition continue de la cornée à un laser visible est dangereuse à partir d'1 mW.

Les lasers sont également dangereux pour l'aviation. Si les avions sont toujours suffisamment loin pour que le laser ne les endommage pas il est en revanche possible que les pilotes soient éblouis.

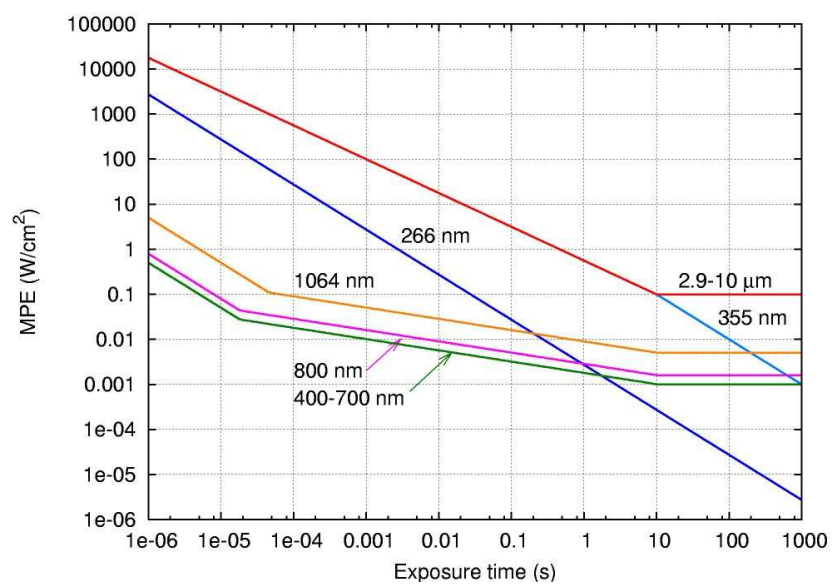


FIGURE 19 – MPE pour différentes longueurs d'onde (source : Wikipedia)

Classe 1	lasers sans danger, à condition de les utiliser dans leurs conditions raisonnables prévisibles (exemples : imprimantes, lecteurs de CD-ROM et lecteurs de DVD).
Classe 1M	lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instrument optiques, peut être dangereuse.
Classe 2	lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueur de 400 à 700 nm. La protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral, clignement de la paupière (par exemple, des lecteurs de code-barres).
Classe 2M	lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueur de 400 à 700 nm. Lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instrument optiques, peut être dangereuse (exemples : loupes et télescopes).
Classe 3A	lasers dont l'exposition directe dépasse l'EMP (Exposition Maximale Permise) pour l'œil, mais dont le niveau d'émission est limité à cinq fois la LEA (Limite d'Émission Accessible) des classes 1 et 2.
Classe 3B	laser dont la vision directe du faisceau est toujours dangereuse. La vision de réflexions diffuses est normalement sans danger.
Classe 4	lasers qui sont aussi capables de produire des réflexions diffuses dangereuses. Ils peuvent causer des dommages sur la peau et peuvent également constituer un danger d'incendie. Leur utilisation requiert des précautions extrêmes.

TABLE 3 – Classification des lasers (source : Wikipedia)

Réglementation

Les lasers sont classés selon leur dangerosité (cf. table 3). Une première classification en chiffre romain ne prenait en compte que la puissance de la source. Cette classification a été révisée en 2007 pour adopter une numérotation en chiffre arabe qui traduit toujours la dangerosité du laser mais elle prend en compte plus de paramètres comme la longueur d'onde ou la divergence (la taille de la tâche en fonction de la distance).

Les lasers de classe 3 et 4, utilisables exclusivement en plein air, sont mis en œuvre par un technicien compétent et formé aux risques spécifiques des lasers.⁸

Face à cette dangerosité, la législation impose des dispositifs de coupure automatique du faisceau en cas de défaillance du système. Sur certains lasers on trouve un système qui coupe la diode si l'aire de balayage n'est pas suffisamment grande. Plus l'air de balayage est grande, moins le faisceau reste longtemps au même endroit et donc moins il est dangereux. Mais ce genre de dispositif est extrêmement contraignant puisqu'il n'est plus possible de dessiner des formes arbitraires même si des précautions sont prises ailleurs (surface de projection ignifugée, cône de projection inaccessible aux personnes. . .).

La pratique

Dans la pratique cette législation est très contraignante et surtout peut faire peur aux personnes responsables. Il est donc nécessaire d'expliquer les risques et les mesures de sécurité mises en œuvre. Dès lors que l'on utilise un laser de classe 3 ou 4, il faut éviter autant que possible de balayer les spectateurs. Si, malgré les risques, on souhaite tout de même balayer une zone où le public est présent, il faut s'assurer que la puissance reçue par le public est inférieure à l'EMP.

Robert Henke pour *Fragiles Territoires* utilise des lasers de classe 4 en intérieur. Pour cela, il a mis en place une barrière physique qui, si elle est franchie, coupe automatiquement les lasers. Les personnes ne peuvent donc jamais entrer dans la zone de balayage. De longues discussions ont été nécessaires avant que le dispositif de sécurité ne soit approuvé.

Pour *Enseigne* de Samuel Bianchini, le laser de 8 W est contraint par une fenêtre noire en aluminium. À travers cette fenêtre, le faisceau ne peut qu'atteindre sa cible : la façade d'un immeuble situé à 250 m. Si le faisceau sort de la fenêtre, il est dissipé par le métal noir qui ne peut fondre même si le faisceau reste fixe longtemps.

Quant à Robin Fox, dans son show il balaye le public qui peut recevoir le laser dans les yeux. Il ne semble pas inconscient des dangers mais ignore que son laser (classe 3, 532 nm 350 mW) est interdit d'utilisation en intérieur, du moins en France.

8. D'après le Journal Officiel de la République Française numéro 0039 du 16 février 2010, text 9

Annexe C Crédit image

L'image 6 est reproduite avec l'aimable autorisation de White Void.

L'image 9 est reproduite avec l'aimable autorisation de Marshmallow Laser Feast.

L'image 4 est reproduite avec l'aimable autorisation de Robert Henke.

J'ai personnellement réalisé les photos 5 et 2.

Les demandes d'autorisation de reproduction pour les autres photos sont restées sans suite. J'ai décidé de tout de même les reproduire pour illustrer mon dossier. Elles peuvent être retirées sur simple demande des auteurs.