

Conception du système  
« Open Cue »

Simon Turcotte-Langevin



## REMERCIEMENTS

L'analyse des systèmes de mise à feu commerciaux actuels n'aurait pu être aussi détaillée sans les apports de MM. Alain Carbonneau, président de Feux d'artifices Apogée (système FireMaster), François Léger, artificier sénior à l'International des Feux Loto-Québec (système FireOne), Michael Korbylo, concepteur du système Automated Timed Fire, et Yanick Roy, président de Royal Pyrotechnie (système Pyrodigital), qui ont pris le temps de discuter des forces et des faiblesses des systèmes qu'ils utilisent.

De plus, l'analyse expérimentale des allumettes électriques n'aurait pu être effectuée sans la participation d'Yves Robitaille et de Jorge Rojas Abad, techniciens du département de génie électrique de l'ÉTS, qui ont contribué à la conception du banc de test et à la réalisation des tests.

Par ailleurs, ce projet n'aurait pas été aussi avancé au niveau technique sans la participation des artificiers de FAE Pyrotechnie, notamment Jean-Pierre Gagné, Jean-Sébastien Gagné et Sylvain Trudel, qui ont pris le temps de discuter du système FireOne et de préparer le test des allumettes électriques et des mèches rapides capté en vidéo pour la présentation finale.



# CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE MISE À FEU D'EFFETS PYROTECHNIQUES LIBRE, LE « OPEN CUE »

TURCOTTE-LANGEVIN, Simon

## RÉSUMÉ

Le rapport technique vise à décrire la méthodologie de conception du système de mise à feu d'effets pyrotechniques libres, le « Open Cue ». Actuellement, les spectacles pyrotechniques sont mis à feu au moyen de systèmes commerciaux qui sont très dispendieux à acquérir et qui sont très peu personnalisables par leurs acquéreurs.

Le système « Open Cue » vise à démocratiser la mise à feu électronique au moyen d'un système abordable dont les plans techniques et le code source sont placés sous licence libre afin de faciliter la personnalisation du système par des tiers. Ce rapport s'adresse aux artificiers et aux ingénieurs et techniciens en génie électrique qui s'intéressent à la pyrotechnie.

Ce projet vise par ailleurs à concevoir les sous-modules qui composent le système afin de pouvoir réaliser un prototype dans une phase ultérieure du projet.

Pour ce faire, les systèmes de mise à feu actuels les plus populaires sont étudiés afin de déterminer leurs caractéristiques. De plus, les caractéristiques techniques d'une allumette électrique commune sont déterminées expérimentalement afin de pouvoir en déterminer le modèle mathématique.

Par ailleurs, les normes et les lois applicables aux pièces pyrotechniques et aux systèmes de mise à feu sont passées en revue afin de s'assurer que la conception en tienne compte.

Finalement, les spécifications finales du système sont établies une fois que certaines composantes importantes ont été sélectionnées, ce qui permet de réaliser un prototype dans une phase ultérieure du projet.

Mots clés : feu d'artifice, pyrotechnie, mise à feu, pyromusical

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	11
<b>CHAPITRE 1 OBJECTIFS DU PROJET</b>	<b>13</b>
1.1 Avant-propos : Mise à feu électrique des effets pyrotechniques	13
1.1.1 Description de la mise à feu électrique	13
1.1.2 Avantages et inconvénients de la mise à feu électrique	14
1.2 Inconvénients associés aux systèmes actuels	17
1.2.1 Coûts d'acquisition élevés	17
1.2.2 Personnalisation impossible par l'utilisateur	19
1.2.3 Obsolescence programmée	20
1.3 Différences entre « Open Cue » et les systèmes actuels	20
1.3.1 Réduction des coûts de fabrication	21
1.3.2 Utilisation de licences libres	21
1.3.3 Mise à jour facile des modules	22
1.4 Contraintes des systèmes de mise à feu	22
1.4.1 Résistance aux intempéries	23
1.4.2 Résistance aux écarts de température importants	24
1.4.3 Protection contre les mises à feu intempestives	24
1.4.4 Lois et normes applicables	25
<b>CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION</b>	<b>27</b>
2.1 Étude des systèmes de mise à feu actuels	27
2.1.1 Description du système FireOne (™)	27
2.1.2 Description du système Pyrodigital (™)	29
2.1.3 Description du système Parente FireMaster IV (™)	30
2.1.4 Description du système Advanced Timed Fire (™)	31
2.1.5 Comparaison des quatre systèmes	32
2.2 Caractérisation d'une allumette électrique	33
2.2.1 Description du banc de test	33
2.2.2 Caractéristiques d'une allumette électrique	35
2.2.3 Modélisation mathématique d'une allumette électrique	36
2.2.4 Analyse transitoire d'un circuit d'allumette électrique	37
2.3 Étude des systèmes de communication	40
2.3.1 Liaison câblée RS-485	40
2.3.2 Liaison câblée 10BASE-T	42
2.3.3 Liaison sans-fil IEEE 802.15.4	43
2.3.4 Liaison sans-fil 802.11 n (« Wi-fi » en mode ad-hoc)	44
2.3.5 Comparaison des quatre systèmes de communication	45
2.4 Étude des composantes de commutation	47
2.4.1 Relais électromécanique	47
2.4.2 Transistor bipolaire	48
2.4.3 Transistor à effet de champ	49
2.4.4 Thyristor conventionnel	50
2.4.5 Comparaison des quatre solutions de commutation	51
2.5 Étude des microcontrôleurs (modules de mise à feu)	53
2.5.1 Microcontrôleurs AVR 8 bits	53
2.5.2 Microcontrôleurs AVR 32 bits	54

2.5.3	Microcontrôleurs PIC 16 bits	55
2.5.4	Comparaison des trois familles de microcontrôleurs	55
<b>CHAPITRE 3 SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME « OPEN CUE »</b>		<b>59</b>
3.1	Cadence de tir	59
3.2	Courant de sortie par circuit	60
3.3	Distance maximale entre les modules de tir	61
3.4	Latence de la mise à feu	62
<b>CHAPITRE 4 COMPOSANTES DU SYSTÈME</b>		<b>65</b>
4.1	Système de communication	65
4.1.1	Protocole logiciel	65
4.1.2	Implémentation matérielle	68
4.2	Module de mise à feu	69
4.2.1	Alimentation CC-CC dynamique	69
4.2.2	Système de test de continuité	70
4.2.3	Système de mise à feu	70
4.2.4	Interface homme-machine	71
4.3	Console de tir	71
4.3.1	Décodage des trames	72
4.3.2	Changement de protocole de communication	72
4.3.3	Système de verrouillage à deux étapes	72
<b>CONCLUSION</b>		<b>73</b>
ANNEXE I Analyse des résultats des tests d'allumettes électriques		75
ANNEXE II Instructions supportées par le système de communication		79
ANNEXE III Schémas électriques du module de mise à feu		83
ANNEXE IV Schéma électrique de la console de tir		91
ANNEXE V Présentation du projet		93
ANNEXE VI Résultat d'évaluation du rapport final		107
ANNEXE VII Résultat d'évaluation de la présentation finale		109
<b>LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>		<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		<b>115</b>

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACNOR	Association canadienne de normalisation
ALU	Unité arithmétique et logique
ANSI	American National Standards Institute
AWG	American Wired Gauge
ATF	Automated Timed Fire (système de mise à feu)
CC	Courant continu
CIM	Computer Interface Module
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Ingress Protection
LCD	Affichage à cristaux liquides
MOSFET	Transistor à effet de champ
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
OSI	Open Systems Interconnection
PVC	Chlorure de polyvinyle
RJ	Registered Jack
TTL	Transistor-Transistor Logic
UART	Récepteur/transmetteur asynchrone universel
UL	Underwriters Laboratories
USB	Port série universel



# LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

## UNITÉS DE TEMPS

s	seconde
ms	milliseconde
$\mu$ s	microseconde
Hz	hertz
kHz	kilohertz
MHz	mégahertz

## UNITÉS ÉLECTRIQUES

V	volt
A	ampère
mA	milliampère

## Résistance électrique

$\Omega$	ohm
k $\Omega$	kilo-ohm
m $\Omega$	milli-ohm

## Capacité électrique

F	farad
$\mu$ F	microfarad
nF	nanofarad
pF	picofarad

## **Inductance électrique**

H      henry

mH     millihenry

$\mu$ H    microhenry

## **UNITÉS CALORIFIQUES**

$^{\circ}$ C    degré celsius

## **UNITÉS DE DISTANCE**

m      mètre

mm     millimètre

pi      pied (environ 0.3048 m)

## **UNITÉS INFORMATIQUES**

b/s     bits par seconde

kb/s    kilobits par seconde

Mb/s    mégabits par seconde

## INTRODUCTION

Grâce aux compétitions internationales d'art pyrotechnique comme l'International des Feux Loto-Québec, le niveau de sophistication des feux d'artifices a augmenté de manière significative depuis les deux dernières décennies. Ainsi, on retrouve de plus en plus de spectacles pyromusicaux, c'est-à-dire dont les explosions sont synchronisées aux moments forts d'une trame sonore.

Cependant, les systèmes de mise à feu disponibles sur le marché sont très dispendieux et leurs spécifications techniques sont gardées secrètes par leurs manufacturiers. Conséquemment, les utilisateurs ne peuvent aisément modifier le système pour qu'il réponde mieux à leurs besoins.

Pour cette raison, ce projet a comme objectif de concevoir un système de mise à feu abordable placé sous licence libre, le « Open Cue ». Ce système doit avoir des caractéristiques similaires aux systèmes commerciaux les plus populaires.

Ainsi, les caractéristiques des systèmes les plus populaires seront étudiées et les lois et normes applicables à la pyrotechnie seront déterminées. Par la suite, les composantes du système seront sélectionnées parmi plusieurs technologies de nature différente. Ensuite, les caractéristiques globales du système seront définies de manière à permettre la réalisation ultérieure d'un prototype.



# CHAPITRE 1

## OBJECTIFS DU PROJET

### 1.1 Avant-propos : Mise à feu électrique des effets pyrotechniques

Alors que la mise à feu des feux d'artifices et des effets pyrotechniques se faisait traditionnellement à la main (au moyen d'une torche au gaz ou d'un feu de Bengale tenu au bout d'un bâton), l'avancement de la technologie des semi-conducteurs a permis de développer des systèmes de mise à feu électroniques plus performants au niveau de la synchronisation et plus sécuritaires pour les artificiers.

#### 1.1.1 Description de la mise à feu électrique

Chaque effet pyrotechnique de classe professionnelle dispose d'une mèche dite « rapide » qui est constituée de cordons recouverts de poudre noire enveloppés dans un tube de papier ou de plastique. Au moment de l'allumage, les gaz de combustion de la poudre noire sont confinés dans l'enveloppe de la mèche et propagent la flamme vers l'autre extrémité à une vitesse de 30 à 100 mètres par seconde (Division de la réglementation sur les explosifs, 2010).

Pour allumer des pièces pyrotechniques avec cette technique, on insère une allumette électrique dans l'extrémité libre de la mèche rapide et on applique un courant électrique de faible intensité (1 à 2 A) aux bornes de l'allumette au moment de la mise à feu (Pyromate, 2005).

Ce courant provoque l'échauffement du filament de nichrome de l'allumette électrique, ce qui provoque l'allumage de la composition pyrotechnique inflammable qui la recouvre. Une fois que la tête de l'allumette est embrasée, la mèche rapide propage la flamme résultante à la charge de poudre de l'effet pyrotechnique, qui se déploie alors quasi-instantanément.

### 1.1.2 Avantages et inconvénients de la mise à feu électrique

La mise à feu électrique permet d'allumer instantanément des effets situés à une distance importante les uns des autres. Si l'allumage se faisait au moyen de la méthode traditionnelle, plusieurs artificiers devraient être présents sur les rampes de lancement, et la synchronisation des mises à feu serait très imprécise (Marriott, 2003).

Par ailleurs, cette technique de mise à feu permet de synchroniser le déploiement des effets pyrotechniques à une trame sonore. En effet, les artificiers peuvent préparer le script du spectacle à l'avance en tenant compte des délais de mise à feu propres à chaque pièce pyrotechnique – par exemple, le temps d'ascension d'une pièce aérienne – et en synchroniser l'explosion avec un moment fort de la trame sonore.

De plus, ce type de mise à feu permet aux artificiers de travailler de façon sécuritaire, car ils ne sont pas obligés d'être à proximité des pièces pyrotechniques pendant le spectacle.

En effet, les pièces aériennes peuvent connaître un dysfonctionnement et éclater alors qu'elles sont encore dans leurs mortiers, ce qui projette des étoiles incandescentes et des débris autour du site de mise à feu. Cette situation est extrêmement dangereuse pour les artificiers, qui peuvent être blessés grièvement ou tués (Division sur la réglementation sur les explosifs, 2011).

Hors, lorsque les artificiers utilisent un système de mise à feu électrique, ils peuvent s'éloigner des rampes de lancement, ce qui réduit grandement les risques de blessure en cas de mauvais fonctionnement des effets pyrotechniques.

Cette technique d'allumage leur permet ainsi d'encourir un niveau de risque similaire à celui du public qui assiste au spectacle.

Cependant, le faible courant requis pour provoquer la mise à feu des allumettes électriques les rend susceptibles aux allumages intempestifs lorsqu'elles sont soumises à un champ électromagnétique intense (Division de la réglementation sur les explosifs, 2010).

Pour cette raison, les artificiers ne doivent pas travailler à proximité de transmetteurs de radiofréquences. L'Institute of Makers of Explosives a publié une table de référence qui indique la distance de sécurité à respecter lors de l'installation d'allumettes électriques à proximité de transmetteurs en fonction de leur puissance et de leur fréquence d'opération (Institute of Makers of Explosives, 2009).

De plus, les artificiers doivent cesser de travailler et se rendre à une distance sécuritaire des rampes de lancement si une cellule orageuse passe à proximité du site de mise à feu. En effet, Paul Csukassy, directeur technique de l'International des Feux Loto-Québec, une compétition majeure d'art pyrotechnique, affirme avoir déjà assisté à la mise à feu intempesive de pièces pyrotechniques dans des conditions orageuses, qu'un éclair frappe directement le site de lancement ou qu'il frappe le sol au loin (Turcotte-Langevin, 2009).

Par ailleurs, les allumettes électriques sont particulièrement sensibles au choc et au frottement. Pour cette raison, Ressources Naturelles Canada, l'organisme fédéral qui régleme la pyrotechnie, interdit le transport de pièces pyrotechniques pourvues d'allumettes électriques. De plus, chaque allumette dispose d'un capuchon protecteur qui recouvre la composition pyrotechnique et l'empêche de s'allumer spontanément en cas de choc (Pyromate, 2011).

Dans un autre ordre d'idées, chaque allumette électrique contribue au coût total d'un spectacle pyrotechnique. Ainsi, un feu d'artifice mis à feu de manière électrique est plus dispendieux qu'un spectacle traditionnel en fonction du nombre d'allumettes électriques qui sont utilisées (Marriott, 2003).

## 1.2 Inconvénients associés aux systèmes actuels

La mise à feu électrique peut s'effectuer au moyen d'une console de tir à commutateurs manuels, où l'artificier active chaque circuit au moment opportun, ou au moyen d'un système électronique comparable à un ordinateur qui active automatiquement chaque circuit selon une séquence préprogrammée.

Cette section s'intéresse aux inconvénients des systèmes électroniques les plus répandus dans l'industrie, soit FireOne, Pyrodigital, Parente FireMaster IV et Advanced Timed Fire.

### 1.2.1 Coûts d'acquisition élevés

Les systèmes électroniques les plus sophistiqués disponibles sur le marché sont très dispendieux.

Ainsi, le coût d'acquisition de l'équipement nécessaire pour un feu d'artifice contenant 300 mises à feu distinctes – un nombre typique pour un feu de calibre municipal moyen – et utilisant 300 mètres de câbles lorsque applicable, est indiqué dans le Tableau 1.1.

Dans ce tableau, on voit que le coût par mise à feu, calculé selon le nombre de sorties total de chaque configuration étudiée, s'échelonne de 26.21 \$ à 110.08 \$. Malgré le fait qu'il ne requière pas de câbles, le système sans-fil Parente FireMaster IV demeure le plus dispendieux. L'économie présumée qui peut être effectuée avec les systèmes sans-fil est donc douteuse.

Tableau 1.1 - Grille des coûts de quatre systèmes de mise à feu commerciaux

	FireOne	Pyrodigital	FireMaster IV	ATF
<b>Modules requis</b>	10 @ 32 sorties/ch.	19 @ 16 sorties/ch.	7 @ 48 sorties/ch.	10 @ 32 sorties/ch.
<b>Coût des modules</b>	9 * 1100 \$ 9900 \$	19 * 1015 \$ 19285 \$	7 * 3200 € <sup>1</sup> 31622 \$	10 * 695 \$ 6950 \$
<b>Coût de la console de tir</b>	5195 \$	9395 \$	3800 € 5365 \$	895 \$ <sup>2</sup>
<b>Coût des câbles</b>	225 \$	1396 \$	S/O (sans-fil)	440 \$
<b>Total</b>	15170 \$	30076 \$	36987 \$	8390 \$
<b>Nombre de mises à feu</b>	10 * 32 320	19 * 16 304	7 * 48 336	10 * 32 320
<b>Total par mise à feu</b>	47.40 \$	98.93 \$	110.08 \$	26.21 \$

---

<sup>1</sup> Taux de change utilisé : 1 € = 1.41170 \$ US (Source : [www.xe.com](http://www.xe.com), en date du 17 juillet 2011)

<sup>2</sup> Un ordinateur portable doit être utilisé en conjonction avec la console de tir. Ses coûts ne sont pas comptabilisés dans ce tableau.

### 1.2.2 Personnalisation impossible par l'utilisateur

La documentation technique des systèmes de mise à feu professionnels est un secret bien gardé de leurs fabricants. Ainsi, l'acheteur doit se contenter des guides d'utilisation et n'a pas accès aux spécifications techniques du système de mise à feu qu'il a acheté.

Conséquemment, il ne peut pas personnaliser le système afin qu'il réponde mieux à ses besoins. Pour y parvenir, il doit employer la rétro-ingénierie afin de déterminer expérimentalement les spécifications du système. Cette méthode n'est pas cautionnée par le fabricant, et celui-ci peut changer les spécifications à sa guise dans une prochaine révision du logiciel embarqué pour déjouer ces modifications non-autorisées.

Ainsi, les utilisateurs des systèmes de mise à feu commerciaux doivent généralement s'en remettre au fabricant pour qu'il implémente de nouvelles fonctionnalités.

En pratique, le fabricant effectuera une étude de marché afin de voir si l'implémentation de nouvelles fonctions suggérées par le client donnera lieu à des ventes accrues de son système. Dans le cas échéant, le client devra s'en passer et se contenter d'utiliser le système de mise à feu qu'il a acquis sans qu'il réponde complètement à ses besoins.

### 1.2.3 Obsolescence programmée

Afin de mousser leurs ventes, les manufacturiers proposent régulièrement de nouvelles versions de leurs systèmes de mise à feu. Hors, ces nouveaux systèmes ne sont généralement pas compatibles avec les anciennes versions qui sont encore utilisés massivement dans l'industrie.

Ainsi, malgré leurs coûts d'acquisition élevés, les systèmes de mise à feu commerciaux ont une durée de vie limitée. Les artificiers doivent donc utiliser d'anciennes versions du système qui ne sont plus supportées par le manufacturier afin d'en rentabiliser le coût d'achat sur une plus longue période.

### 1.3 Différences entre « Open Cue » et les systèmes actuels

Le système « Open Cue » vise à rendre la mise à feu électronique plus accessible et à permettre et même encourager la modification des composantes du système par les usagers. Pour y parvenir, les schémas électriques et le code source de chaque composante du système seront placés sous licence libre. De plus, le processus de conception privilégie l'utilisation de standards reconnus par des organismes internationaux lorsque possible, par opposition à des méthodes propriétaires.

### 1.3.1 Réduction des coûts de fabrication

L'utilisation de technologies éprouvées et de standards internationaux permettra d'effectuer des économies au moment de la fabrication en série des sous-modules du système.

En effet, le respect des standards internationaux permet d'avoir une indépendance par rapport aux manufacturiers des composantes du système, car la substitution d'une pièce par celle provenant d'un autre manufacturier qui respecte le même standard permettra de minimiser les modifications éventuelles au design initial du système.

### 1.3.2 Utilisation de licences libres

Dans le but de faciliter et d'encourager la modification de composantes du système par l'utilisateur (ou par un spécialiste mandaté par l'utilisateur), les schémas électriques et le code source du système « Open Cue » sont placés sous licence libre.

Ainsi, les plans électriques et les plans des circuits imprimés, lorsque applicable, sont placés sous licence Creative Commons Paternité - Partage à l'identique. Cette licence, reconnue à travers le monde, permet à l'utilisateur de modifier le système et de partager ses ajouts avec la communauté en autant qu'il place ses modifications sous une licence identique et qu'il indique la provenance des plans originaux (Creative Commons, 2011).

Par ailleurs, le code source des logiciels embarqués du système sont placés sous la General Public Licence, publiée par la Free Software Foundation. Cette licence permet encore une fois à la communauté de modifier et de redistribuer le code source, en autant que leurs modifications soient placés sous la même licence lors de la redistribution (Free Software Foundation, 2007).

### 1.3.3 Mise à jour facile des modules

Contrairement aux systèmes commerciaux, dont la mise à jour est généralement effectuée par le manufacturier aux frais de l'utilisateur, les modules du système « Open Cue » disposeront tous d'un port USB et d'un micro-logiciel permettant de modifier leur logiciel embarqué.

Ainsi, les utilisateurs pourront mettre à jour les modules eux-mêmes, que ce soit avec de nouvelles versions officielles ou encore des versions personnalisées. Ces mises à jour pourront notamment garantir la compatibilité de modules d'une ancienne génération avec la nouvelle, ou encore ajouter de nouvelles fonctionnalités compatibles avec le matériel du système initial.

## 1.4 Contraintes des systèmes de mise à feu

Comme les systèmes de mise à feu d'effets pyrotechniques sont généralement utilisés à l'extérieur dans des conditions météorologiques parfois difficiles, leur conception doit tenir compte des conditions typiques d'utilisation ainsi que des situations extrêmes auxquelles peut être soumis le matériel.

#### 1.4.1 Résistance aux intempéries

Les modules de mise à feu sont généralement installés sur le terrain la journée même du feu, mais il peut arriver que l'installation de pièces pyrotechniques s'effectue plusieurs jours à l'avance dans le cas d'un événement d'envergure comme l'International des Feux Loto-Québec (Turcotte-Langevin, 2009).

Conséquemment, les modules sont potentiellement exposés aux éléments pendant plusieurs jours. Ils doivent donc être étanches aux liquides et aux solides afin de pouvoir supporter la pluie, le verglas ou la neige pendant de longues périodes.

Ils doivent aussi être étanches aux gaz afin que les circuits électroniques ne soient pas affectés par un taux d'humidité ambiant important, qui peut diminuer la résistance diélectrique des matériaux isolants et augmenter le risque d'arcs électriques spontanés (Turcotte-Langevin, 2011).

Les boîtes de montage et les connecteurs extérieurs doivent donc disposer d'un indice de protection (« Ingress Protection Rating ») IP-65 ou plus, ce qui indique qu'ils sont étanches à la poussière et peuvent résister à un jet d'eau direct.

Le niveau de protection NEMA 4X, utilisé en Amérique du Nord, est équivalent au niveau de protection IP-65, et des pièces qui détiennent cette homologation peuvent aussi être utilisées.

#### 1.4.2 Résistance aux écarts de température importants

Les modules doivent résister à la fois à la chaleur intense (40°C en période de canicule) et au froid (-30°C au cœur de l'hiver). Il est donc primordial de sélectionner des pièces électroniques qui peuvent tolérer des écarts de températures minimaux de -40°C à 70°C.

Il faut aussi considérer la courbe de résistance interne en fonction de la température des batteries utilisées afin de garder les pertes par effet Joule attribuables à la source d'alimentation dans des limites acceptables.

#### 1.4.3 Protection contre les mises à feu intempestives

Les modules de mise à feu doivent garder en court-circuit (« shuntées ») les allumettes électriques qui y sont raccordées jusqu'au moment de la mise à feu. Ainsi, la présence d'un champ électromagnétique intense sur les rampes de lancement affectera moins les allumettes électriques, car la tension induite à leurs bornes sera minimale.

De plus, la mise à feu ne doit pas être déclenchée accidentellement à la suite d'un bogue dans le logiciel embarqué ou d'un fonctionnement non-commandé du circuit de mise à feu. Conséquemment, la polarisation des semi-conducteurs doit les forcer à un état ouvert en l'absence d'une commande, et le code source doit être validé au moyen de simulations ou de tests automatisés afin de s'assurer que la mise à feu est déclenchée uniquement au bon moment.

#### 1.4.4 Lois et normes applicables

Ressources Naturelles Canada publie le Manuel de l'artificier, qui décrit les bonnes pratiques à respecter lors de la manipulation de pièces pyrotechniques de calibre professionnel.

Ce manuel indique notamment que les systèmes de mise à feu électroniques doivent disposer d'un système de verrouillage à deux étapes et que l'artificier responsable du spectacle doit contrôler en tout temps le fonctionnement du système de tir, du montage au nettoyage. Le système de mise à feu peut respecter cette exigence s'il dispose d'un système de verrouillage à clé et un interrupteur conventionnel de mise en marche (Division de la réglementation sur les explosifs, 2010).

Le Manuel de l'artificier indique aussi que le système de mise à feu doit tester les allumettes électriques avec un courant de moins de 20% du courant seuil (ou courant de non-déclenchement) fourni par le fabricant.

De plus, Pierre Michaud, inspecteur principal des explosifs pour Ressources Naturelles Canada, apporte quelques précisions aux normes du Manuel de l'artificier.

Ainsi, le système de communication entre la console et les modules de mise à feu doit utiliser au moins deux fréquences différentes et transmettre un signal de manière périodique dans le cas d'un système sans-fil. De plus, la transmission par ondes infrarouges est interdite.

Par ailleurs, l'alimentation principale de la console de tir doit être de moins de 36 volts. L'utilisation d'une alimentation à découpage ou d'un transformateur à l'intérieur de la console sont autorisés pour convertir une tension d'alimentation de 120 V à 36 V ou moins.

Enfin, le système de tir doit être accrédité par Underwriters Laboratories (UL) ou par l'Association canadienne de normalisation (ACNOR) pour pouvoir être mis sur le marché.

## CHAPITRE 2

### MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION

#### 2.1 Étude des systèmes de mise à feu actuels

Afin de se positionner favorablement par rapport aux systèmes de mise à feu électroniques les plus populaires, le système « Open Cue » doit posséder des performances similaires.

##### 2.1.1 Description du système FireOne (™)

Selon son fabricant, le système FireOne est le plus utilisé dans l'industrie. Il est constitué de modules de tir à 32 sorties individuellement adressables à l'épreuve des intempéries, de rails de sortie (version compacte ou longue) et de trois modèles de consoles de tir. Ce système supporte jusqu'à 100 événements de mise à feu distincts (« cues ») par seconde (FireOne Pyrotechnics Management, 2010).

Les modules de mise à feu chargent un condensateur à 24 V pour chacune des sorties avant le spectacle, puis déchargent l'énergie accumulée dans les allumettes électriques lorsqu'ils reçoivent le signal approprié de la console de tir. Chaque condensateur peut fournir un courant de 5 A pendant 12.5 ms.

L'utilisation d'un condensateur pour stocker l'énergie utilisée pour déclencher les allumettes électriques permet de placer les modules à une grande distance de la console de tir. En effet, la chute de tension

attribuable aux fils placés entre le module de tir et l'allumette électrique est minimisée du fait de la faible longueur de ces conducteurs (5 m en moyenne).

De plus, FireOne dispose de deux modes d'adressage pour effectuer la mise à feu. Le premier mode consiste à envoyer l'adresse du module de tir et du numéro de la sortie à activer au module de tir au fur et à mesure, ce qui ne permet d'activer qu'un circuit à la fois.

Le deuxième mode consiste quant à lui à stocker dans la mémoire de chaque module de tir le moment précis où chaque sortie doit être activée. Pendant le spectacle, la console de tir transmet un code temporel aux modules. Ainsi, chaque module détermine lui-même quand il doit activer ses sorties en fonction de la valeur du code temporel, ce qui lui permet théoriquement de toutes les mettre à feu simultanément.

Par ailleurs, FireOne utilise un système de communication bifilaire et il a été conçu de façon à pouvoir être utilisé avec des paires de fils conventionnels de calibre 18 AWG. Cette paire de fils est aussi utilisée pour alimenter les modules de tir à une tension de 24 V et pour charger les condensateurs. Conséquemment, les signaux de communication sont composés d'une tension alternative superposée à la tension continue d'alimentation.

Selon Jean-Pierre Gagné, président de la firme FAE Pyrotechnie, la grande popularité de FireOne dans l'industrie est rassurante pour les

artificiers, car ils peuvent participer à des compétitions d'art pyrotechnique à travers le monde tout en sachant qu'ils pourront louer de l'équipement supplémentaire une fois à destination, car au moins une firme locale utilisera ce système.

Toutefois, selon François Léger, artificier sénior à l'International des Feux Loto-Québec, les modules de tir FireOne ont de la difficulté à communiquer avec la console de tir sur de longues distances, alors que la communication en sens inverse s'effectue correctement. Conséquemment, les modules de tir ne peuvent confirmer à la console que les allumettes électriques fonctionnent correctement, ce qui oblige les artificiers à « tirer à l'aveuglette », c'est-à-dire sans savoir si les allumettes électriques sont toutes en bonne condition avant le spectacle.

### 2.1.2 Description du système Pyrodigital (™)

Le système Pyrodigital est le deuxième système le plus utilisé de l'industrie. Il peut lui aussi effectuer jusqu'à 100 mises à feu par seconde (Pyrodigital Consultants Electronic Firing System, 2011).

Cependant, contrairement au système FireOne, Pyrodigital ne stocke pas le courant d'alimentation à même le module de mise à feu, mais le transmet plutôt à partir de la console. Les artificiers doivent donc tenir compte de la résistance du câble de communication entre la console et chaque module de tir pour savoir combien d'allumettes électriques peuvent être déclenchées simultanément à leur courant nominal de mise à feu.

De plus, le système Pyrodigital utilise un câble de communication à trois conducteurs pourvu d'un blindage et qui dispose d'un connecteur XLR à trois broches à chaque extrémité.

Par ailleurs, le fabricant du système Pyrodigital se targue de ne pas utiliser de microcontrôleurs dans ses modules de tir, ce qui contribue selon lui à la fiabilité de ce système.

Toutefois, contrairement à FireOne, les modules de tir Pyrodigital ne sont pas à l'épreuve des intempéries. Dans le cadre de l'International des Feux Loto-Québec, il est arrivé à plusieurs reprises que des modules de tir Pyrodigital appartenant aux concurrents soient endommagés par des précipitations importantes pendant la préparation du spectacle.

### 2.1.3 Description du système Parente FireMaster IV (™)

Le système Parente FireMaster IV dispose de deux systèmes de communication : un lien bifilaire utilisant le protocole RS-485 et un lien à radiofréquences à 40.865 MHz pour la communication de la console aux modules et à 40.665 MHz pour la communication en sens inverse. L'utilisateur détermine quel mode utiliser, et le système active ou désactive alors le lien RF en fonction du mode choisi (Parente Fireworks, 2011).

Pour assurer une compatibilité descendante avec les systèmes FireMaster II et FireMaster III, le module de tir à 48 sorties du système FireMaster IV est en fait constitué de deux modules à 24 sorties compatibles avec les anciennes versions du système.

Chaque module de tir dispose de deux batteries de 12 V en série. Comme FireOne, le courant de tir est donc maximisé du fait de la proximité entre la source d'énergie et les allumettes électriques.

Contrairement aux systèmes FireOne et Pyrodigital, la console transmet un code de séquence encodé dans les fréquences audio, et les modules de tir associent ce code à un événement dans leur table de mise à feu. Cette méthode est similaire au mode de transfert de code temporel du système FireOne. La cadence de tir de FireMaster IV est de 100 mises à feu par seconde.

Par ailleurs, les modules de tir sont à l'épreuve des intempéries. Selon Alain Carbonneau, président de Feux d'Artifices Apogée et propriétaire de modules FireMaster III, le système est aussi très robuste aux chocs en cas d'explosion accidentelle au sol. De plus, l'utilisation d'un lien sans-fil entre les modules et la console permet selon lui à son équipe de gagner un temps considérable pendant le montage du feu d'artifice.

#### 2.1.4 Description du système Advanced Timed Fire (™)

Le système Advanced Timed Fire (ATF) utilise des modules de mise à feu à 32 sorties dans sa version la plus récente. Les modules communiquent avec le « Computer Interface Module » (CIM), qui fait le pont entre un ordinateur portable qui agit comme console de tir et les câbles de communication (Advanced Technique Fireworks, 2011).

Ce système utilise le protocole RS-485 en configuration bidirectionnelle. Pour cette raison, les câbles de communication contiennent deux paires

différentielles (quatre conducteurs et un blindage) et sont terminés à chaque extrémité par un connecteur XLR à quatre broches.

Chaque module dispose d'une batterie de 12 V.

Par ailleurs, ce système peut effectuer jusqu'à 30 événements de mise à feu distincts par seconde. Il peut toutefois déclencher plusieurs mises à feu simultanément, que ce soit sur le même module ou sur des modules distincts.

### 2.1.5 Comparaison des quatre systèmes

Les caractéristiques de chaque système sont résumées dans le Tableau 2.1.

**Tableau 2.1 - Caractéristiques techniques de quatre systèmes de mise à feu commerciaux**

	<b>FireOne</b>	<b>Pyrodigital</b>	<b>FireMaster IV</b>	<b>ATF</b>
<b>Cadence de tir maximale</b>	100 / seconde	100 / seconde	100 / seconde	30 / seconde
<b>Source d'alimentation</b>	Condensateur chargé par câble de com.	Console de tir, par les câbles de com.	Batterie de 24 V dans les modules	Batterie de 12 V dans les modules
<b>Résistance aux intempéries</b>	Oui	Non	Oui	Oui
<b>Système de communication</b>	Bifilaire, 18 AWG	Trois conducteurs, XLR 3 broches	RF ou RS-485 bifilaire	RS-485 à 4 conducteurs, XLR 4 broches

Ainsi, on voit que la cadence de tir maximale de trois systèmes sur quatre est de 100 mises à feu par seconde.

De plus, les systèmes FireOne, FireMaster IV et ATF sont résistants aux intempéries et stockent l'énergie utilisée pour déclencher les allumettes électriques directement dans les modules de mise à feu.

## 2.2 Caractérisation d'une allumette électrique

Afin de dimensionner correctement l'étage de sortie des modules de tir, il est important de connaître les caractéristiques électriques d'une allumette électrique typique afin de pouvoir créer son modèle de simulation et de simuler le circuit d'une allumette électrique reliée au module par un câble de 30 mètres de longueur.

### 2.2.1 Description du banc de test

Pour connaître les caractéristiques d'une allumette électrique, il faut effectuer un test destructif. Ce test permet de déterminer la courbe de courant associé à l'allumage et à la destruction de l'allumette électrique lors de la mise à feu.

Pour ce faire, le banc de test retenu est constitué d'une source variable de tension continue, d'un générateur d'onde carrée à ratio variable, d'un circuit de déclenchement à semi-conducteurs et d'une résistance de mesure du courant en série avec l'allumette en test. Le circuit retenu est illustré à la Figure 2.1.

La tension de mise à feu est déterminée au moyen de la source de courant continu. Comme la résistance de mesure du courant a la même résistance que l'allumette électrique (valeur optimale déterminée expérimentalement), il faut que la tension de la source soit le double de la tension d'alimentation cible de l'allumette électrique.

Par la suite, le générateur d'onde carrée est activé au début du test. Sa tension de sortie est appliquée sur la grille d'un transistor à effet de champ, qui permet alors au courant de mise à feu de passer dans l'allumette électrique.

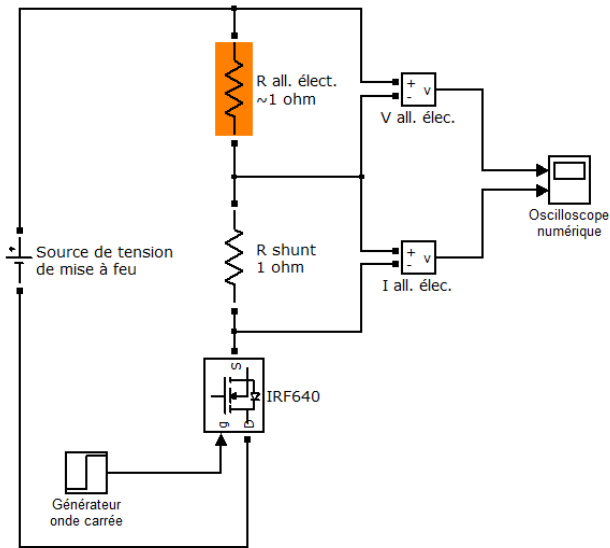


Figure 2.1 - Circuit de test des allumettes électriques

La résistance de mesure du courant convertit le courant consommé par l'allumette électrique en une faible tension qui est mesurée et stockée dans la mémoire d'un oscilloscope numérique. De cette manière, il est

possible de déterminer le courant consommé en fonction du temps et, par intégration de l'aire sous la courbe, l'énergie requise pour effectuer la mise à feu.

Une fois que l'allumette électrique est déclenchée, le filament de nichrome se brise et le circuit est rompu.

### 2.2.2 Caractéristiques d'une allumette électrique

Les allumettes électriques retenues pour le test destructif sont de type J-Tek15 et sont fabriquées par MJG Technologies Inc. Ces allumettes sont pourvues d'un câble d'une longueur de 4.57 m (15 pieds). Leurs caractéristiques théoriques sont indiquées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 - Caractéristique des allumettes électriques J-Tek15  
Source : MJT Technologies Inc, 2011

Résistance nominale ( $\Omega$ )	Courant nominal de mise à feu (A)	Courant minimal de mise à feu (A)	Courant seuil (A)
1 $\pm$ 0.2	1.25	0.75	0.30

En pratique, les tests avec une tension continue de 5 et de 12 V permettent d'établir le temps de mise à feu et l'énergie consommée. Le calcul est détaillé dans l'Annexe I - Analyse des résultats des tests d'allumettes électriques.

Ainsi, la mise à feu d'une allumette électrique prend environ 1 milliseconde (ms) et consomme 4 millijoules (mJ) en moyenne.

### 2.2.3 Modélisation mathématique d'une allumette électrique

Le modèle mathématique de l'allumette électrique J-Tek15 est constitué de la résistance de l'allumette électrique ( $1 \Omega$  d'après la fiche technique) pour  $t$  est inférieur ou égal à  $1 \text{ ms}$ , puis à une résistance infinie pour  $t$  est supérieur à  $1 \text{ ms}$ . Ce modèle permet de tenir compte de la durée de combustion observée expérimentalement.

Ce modèle fait donc passer le courant de tir dans l'allumette simulée pendant le temps de mise à feu observé en pratique, puis ouvre le circuit pour simuler la destruction du filament de nichrome de l'allumette.

Le modèle de simulation de l'allumette électrique dérivé du modèle mathématique est illustré à la Figure 2.2.

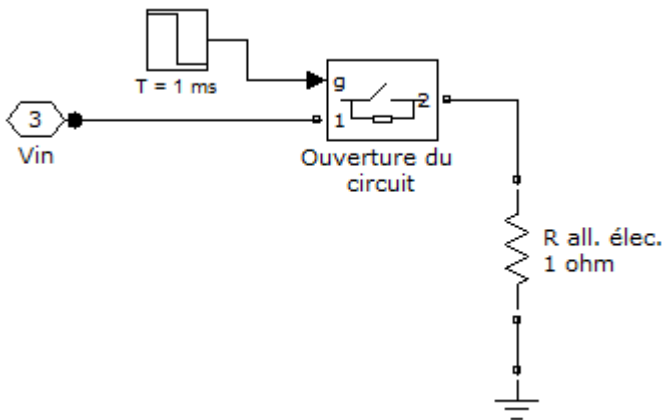


Figure 2.2 - Modèle de simulation d'une allumette électrique

## 2.2.4 Analyse transitoire d'un circuit d'allumette électrique

En pratique, il arrive que certains effets pyrotechniques soient placés à une grande distance du module de mise à feu. Par exemple, des effets au sol comme des fontaines ou des feux de Bengale sont souvent placés près du public alors que le module de mise à feu qui les alimente est positionné près des effets pyrotechniques.

Cette section vise à déterminer si la présence d'une paire torsadée de deux conducteurs de cuivre de calibre 24 AWG de 30 mètres de longueur (environ 100 pieds) isolé en PVC (permittivité de 3.5) entre l'allumette électrique et le circuit de mise à feu modifie la courbe de tension ou de courant en fonction du temps de façon significative et, le cas échéant, si des mesures de protection supplémentaires sont requises à la sortie des modules de tir pour éviter de les endommager.

Le diamètre d'un fil électrique de calibre 24 AWG est de 0.51054 mm. La séparation entre les deux conducteurs de la paire torsadée est estimée à 2 mm. La résistivité du cuivre est de 16.8 nΩ/m.

Pour déterminer le modèle mathématique du circuit, l'impédance du câble est déterminée au moyen des équations 2-1, 2-2 et 2-3 (Juneau, 2010), puis le modèle en PI de la ligne électrique résultante est ajouté au modèle de simulation de l'allumette électrique obtenu dans la section 2.2.3.

(2-1)

$$R = \rho * \frac{L}{\pi * D^2}$$
$$R = 16.8 \frac{\text{n}\Omega}{\text{m}} * \frac{2 * (30 \text{ m})}{\pi * (0.51054 \text{ mm})^2} \approx 1.231 \Omega$$

(2-2)

$$L = 400 * l * \ln\left(\frac{2 * S}{D}\right)$$
$$L = 400 * 30 \text{ m} * \ln\left(\frac{2 * 2 \text{ mm}}{0.51054 \text{ mm}}\right) \approx 24.702 \mu\text{H}$$

(2-3)

$$C \approx 8.85 * l * \epsilon_R * \left(\frac{D}{S}\right)$$
$$C \approx 8.85 * 30 \text{ m} * 3.5 * \left(\frac{0.51054 \text{ mm}}{2 \text{ mm}}\right) \approx 237.21 \text{ pF}$$

En tenant compte de ces valeurs, le modèle en PI résultant du câble de 30 m est illustré à la Figure 2.3.

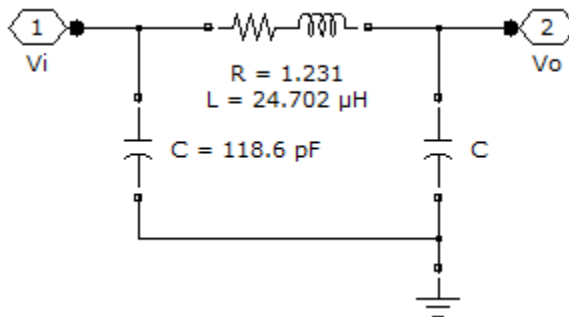


Figure 2.3 - Modèle en PI d'une paire torsadée de 30 m

Pour effectuer la simulation, une tension continue de 12 V est appliquée au modèle combiné à travers une composante de commutation, puis les courbes de la tension et du courant en fonction du temps aux bornes de la composante de commutation sont déterminés au moyen de deux points de mesure. Le résultat de cette simulation est illustré à la Figure 2.4.

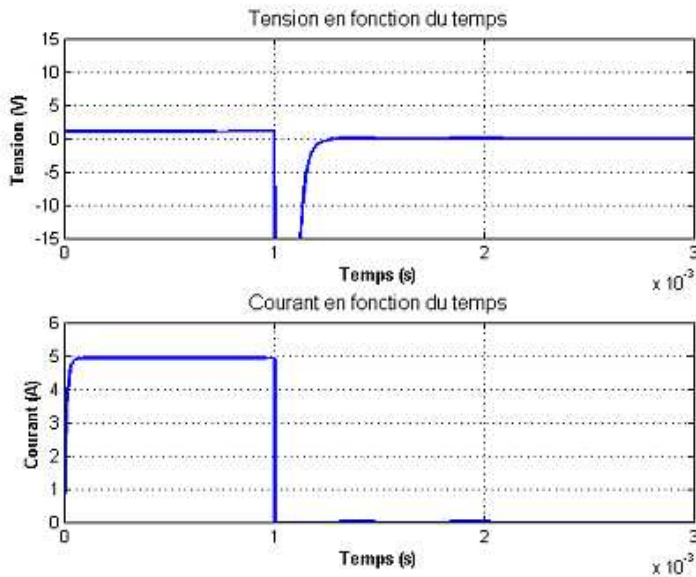


Figure 2.4 - Résultat de la simulation d'une allumette à 30 m du module de tir

Ces résultats démontrent que l'inductance de la ligne est assez importante pour causer un pic fortement négatif après la rupture de l'allumette électrique. L'ajout d'une diode de roue libre aux bornes de la composante de communication retenue ou du circuit de l'allumette électrique permettrait d'éliminer cette tension indésirable en fournissant

un chemin de décharge sécuritaire à l'énergie stockée dans l'inductance de la ligne.

## 2.3 Étude des systèmes de communication

Pour permettre à la console de tir de communiquer avec les modules de mise à feu, il faut utiliser un système de communication qui permet d'obtenir un bon compromis entre le taux de transmission des données, l'immunité au bruit électromagnétique et la distance maximale de la console aux modules. La technologie retenue doit aussi être facile à implémenter. Les systèmes envisagés dans le cadre de ce projet sont les liaisons câblées RS-485 et 10BASE-T et les liaisons à radiofréquences IEEE 802.15.4 et IEEE 802.11 n.

### 2.3.1 Liaison câblée RS-485

La norme RS-485, édictée par l'Electronic Industries Alliance (EIA), une filiale de l'American National Standards Institute (ANSI), permet d'implémenter une communication série en mode différentiel sur une paire torsadée à un taux de transmission maximal de 10 Mbits/s (B&B Electronics, 2010). Cette norme définit uniquement la couche physique du modèle OSI; l'utilisateur doit établir lui-même le format des trames et l'assignation d'un identifiant unique à chaque système faisant partie du réseau.

Ce type de communication est immunisé contre le bruit en mode commun, c'est-à-dire la tension identique induite sur les deux conducteurs de la paire torsadée par un signal indésirable. En effet, le

transmetteur envoie le signal à transmettre sur le conducteur B et le signal inversé sur le conducteur A. Le récepteur soustrait ensuite le signal A au signal B, ce qui reconstitue le signal transmis et élimine le bruit en mode commun.

De plus, l'impédance de sortie du transmetteur est d'environ  $70 \Omega$ . Conséquemment, pour minimiser la réflexion du signal transmis par le transmetteur à l'extrémité « récepteur » de la ligne, il est recommandé de terminer la ligne de communication par une résistance de  $120 \Omega$ .

Il est aussi recommandé de polariser la ligne de communication à une de ses extrémités de manière à garantir un état haut ou un état bas au récepteur si le transmetteur est déconnecté du circuit. Pour ce faire, une résistance tire-haut est typiquement appliquée au conducteur B et une résistance tire-bas est appliquée au conducteur A, ce qui garantit un niveau haut quand le transmetteur est considéré inactif.

La norme spécifie par ailleurs une distance maximale de 4000 pieds (environ 1300 mètres) entre le transmetteur et le récepteur. Une règle approximative pour déterminer le taux de transmission maximal recommandé  $T$  (en bits par seconde) en fonction de la distance  $d$  entre le transmetteur et le récepteur (en mètres) est :

$$T = \frac{10^8 \text{ bits} \cdot \text{m} / \text{s}}{d}$$

Ainsi, l'utilisation d'un câble d'une longueur de 1300 mètres limite en pratique le taux de transmission à :

$$T = \frac{10^8 \text{ bits} \cdot \text{m} / \text{s}}{1300 \text{ m}} = 76.923 \text{ kb/s}$$

De plus, un réseau RS-485 permet de connecter jusqu'à 32 récepteurs dont l'impédance d'entrée est de 12 k $\Omega$  au même transmetteur au moyen de courtes dérivation reliées à la ligne de communication principale. Certains fabricants proposent des récepteurs dont l'impédance d'entrée est supérieure à celle édictée dans la norme, ce qui permet de relier jusqu'à 256 récepteurs au même transmetteur tout en lui présentant une impédance de charge équivalente.

### 2.3.2 Liaison câblée 10BASE-T

La norme 10BASE-T permet d'implémenter une liaison Ethernet uni- ou bidirectionnelle en suivant une topologie en étoile ou en bus entre plusieurs systèmes à un taux de transmission maximal de 10 Mbits/s. La communication s'effectue sur une ligne de transmission d'une longueur maximale de 100 mètres composée d'une paire torsadée par direction et terminée à chaque extrémité par un connecteur modulaire de type RJ-45 à huit broches.

Conséquemment, le câble doit comporter quatre paires de conducteurs même si deux paires au maximum sont utilisées dans le cas d'une communication bidirectionnelle.

Le standard Ethernet définit le format des trames qui sont échangées entre les systèmes. Ainsi, contrairement à la norme RS-485, les trames doivent suivre un format précis et incluent notamment une somme de contrôle CRC-32 qui permet de valider que les données n'ont pas été corrompues dans le transit.

L'implémentation d'un réseau Ethernet sur une couche matérielle 10BASE-T est principalement utilisée en informatique pour permettre à plusieurs ordinateurs de communiquer entre eux à une vitesse de 10 Mb/s. Récemment, deux révisions de la norme ont permis d'implémenter des taux de transmission de 100 et de 1000 Mb/s.

### 2.3.3 Liaison sans-fil IEEE 802.15.4

La norme IEEE 802.15.4 permet d'implémenter un lien sans-fil entre plusieurs modules à un taux de transmission maximal de 250 kb/s et à une distance maximale de 10 m (Wireless Sensors Networks Research Group, 2011). Contrairement aux autres protocoles étudiés, la faible portée de l'IEEE 802.15.4 en limite l'utilisation à la communication entre un module de tir pourvu d'une liaison plus performante avec la console et des modules satellites, qui n'auraient donc pas besoin d'un lien câblé ou RF de forte puissance pour communiquer avec la console.

Conséquemment, la topologie applicable pour ce protocole serait en étoile. En effet, le module « maître » coordonnerait la communication avec les modules satellites et la console.

Pour augmenter la versatilité des modules de tir, il pourrait être envisageable de les doter d'un port câblé qui pourrait être utilisé pour y adjoindre un transmetteur/récepteur de forte puissance pour la communication avec la console de tir. Ainsi, l'artificier pourrait déterminer au moment de disposer ses modules sur le terrain lequel d'entre eux communique directement avec la console et lesquels constituent des modules satellites.

#### 2.3.4 Liaison sans-fil 802.11 n (« Wi-fi » en mode ad-hoc)

La norme IEEE 802.11 n permet d'implémenter un lien sans-fil entre plusieurs systèmes qui permet de transmettre des données jusqu'à 250 mètres à l'extérieur à un taux de transfert maximum de 72.2 Mb/s à une largeur de bande de 20 MHz et de 150 Mb/s à une largeur de bande de 40 MHz (IEEE Computer Society, 2009).

Habituellement, les réseaux 802.11 n sont établis selon une topologie en étoile, où les systèmes communiquent avec un routeur, qui redistribue ensuite les données à un autre routeur où peuvent être connectés d'autres systèmes.

Hors, pour maximiser la distance admissible entre la console et les modules de tir, la topologie ad-hoc s'avère plus appropriée. Dans ce mode, chaque système établit un réseau avec ses voisins et retransmet les données qu'il reçoit. Compte tenu de la grande bande passante de cette version de la norme, la latence entre l'envoi d'un ordre de mise à feu à partir de la console de tir et sa réception par le module de mise à feu le plus éloigné pourrait être considérée négligeable par rapport à

l'utilisation d'un protocole de communication plus lent comme le RS-485 ou l'Ethernet sur un réseau 10BASE-T.

### 2.3.5 Comparaison des quatre systèmes de communication

Pour choisir le système de communication utilisé dans le système « Open Cue » parmi les quatre systèmes étudiés, la matrice de décision décrite par le Tableau 2.3 est utilisée.

Tableau 2.3 - Matrice de décision du système de communication

Critère	Distance maximale	Taux de transmission	Coût d'implémentation	Facilité d'utilisation
Points	10	5	10	10

Comme tous les systèmes étudiés ont un taux de transmission plus que suffisant pour transmettre les paquets requis pour la communication entre la console de tir et les modules, ce critère est évalué sur 5 points. Les autres critères, soit la distance maximale, le coût d'implémentation et la facilité d'utilisation, sont évalués à part égale sur 10 points.

Le résultat de cette démarche est illustré dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 - Matrice de décision appliquée aux quatre systèmes de communication

Critère	RS-485	10BASE-T	IEEE 802.15.4	IEEE 802.11n
Distance maximale	10	5	2	8
Taux de transmission	3	5	3	5
Coût d'implémentation	7	6	8	7
Facilité d'utilisation	10	7	7	5
Total	30	23	20	25

De ce processus, la liaison câblée RS-485 ressort gagnante, car elle permet de couvrir facilement une distance maximale avec un taux de transmission moyen à un prix modique. Une prochaine révision du système pourrait utiliser la liaison sans-fil IEEE 802.11 n pour effectuer la communication entre la console de tir et des modules éloignés, alors que la faible portée de la norme IEEE 802.15.4 pourrait être utilisée pour établir la communication entre plusieurs modules rapprochés les uns des autres.

La norme 10BASE-T couvre une distance trop faible pour s'avérer pertinente dans le cadre de ce projet.

## 2.4 Étude des composantes de commutation

Au niveau des modules de mise à feu, une composante doit effectuer la commutation du courant de mise à feu et du courant de test au bon moment.

Cette composante doit s'activer rapidement pour conserver une latence acceptable entre la réception de la commande de mise à feu et l'allumage de la pièce pyrotechnique, pouvoir être désactivée de façon prévisible après un délai donné, pouvoir résister à un courant de tir anormalement élevé pendant toute la durée de son activation, consommer un courant d'activation minimal et minimiser la chute de tension à ses bornes.

Cependant, la composante sélectionnée ne doit pas demander une maintenance fréquente ou donner lieu à des mises à feu non commandées.

### 2.4.1 Relais électromécanique

Le relais électromécanique est composé d'un électroaimant, de contacts métalliques qui se ferment en présence d'un champ magnétique et d'un ressort pour ramener les contacts à leur position initiale lors de la désactivation.

Pour commander la fermeture des contacts et les maintenir dans cette position, on fait passer un courant électrique suffisant dans l'électroaimant. Au moment de la désactivation, les contacts s'ouvrent,

ce qui crée un arc électrique de courte durée et contribue à en détériorer la surface de contact.

Comme les contacts ont une très faible résistance, la chute de tension à leurs bornes est très faible.

En cas de surcharge du circuit, les contacts peuvent s'échauffer et fusionner. Dans ce cas, ils demeurent en position fermée même après la désactivation.

De plus, la faible force de rappel du ressort peut donner lieu à un déplacement involontaire des contacts si le relais est soumis à un important choc mécanique. Il serait donc envisageable que toutes les sorties d'un module de mise à feu s'activent accidentellement si une pièce pyrotechnique voisine connaît une défaillance violente, comme une explosion dans le mortier.

#### 2.4.2 Transistor bipolaire

Le transistor bipolaire est une composante de commutation à semi-conducteurs. Il est composé de trois terminaux, soit la base, l'émetteur et le collecteur, et se décline en deux variantes, soit NPN et PNP.

Dans le cas du transistor NPN, un faible courant de commande est injecté dans la base et ressort par l'émetteur. Ce courant provoque l'activation du transistor, ce qui permet à un fort courant de passer entre le collecteur et l'émetteur.

Le transistor bipolaire dispose de deux modes d'activation : le mode linéaire, où le courant qui circule entre le collecteur et l'émetteur est proportionnel au courant de commande, et le mode de commutation, où la présence du courant de commande active complètement le transistor et provoque une chute de tension d'environ 200 millivolts (mV) entre le collecteur et l'émetteur peu importe le courant qui les traverse.

Le transistor bipolaire peut tolérer un courant de surcharge beaucoup plus important que son courant moyen pendant de très courtes périodes, en autant que l'échauffement résultant demeure dans des limites sécuritaires.

### 2.4.3 Transistor à effet de champ

Le transistor à effet de champ (MOSFET) s'apparente au transistor bipolaire, dans la mesure où il dispose lui aussi de trois terminaux, soit la grille, la source et le drain, de deux types, soit le type N et le type P, et de deux modes d'opération, soit le mode linéaire et le mode de commutation.

Alors que le transistor bipolaire s'active lorsqu'un courant circule entre la base et l'émetteur, le MOSFET s'active lorsqu'une tension de commande est appliquée entre la grille et la source. Cette tension de commande diminue la résistance entre le drain et la source jusqu'à la résistance d'activation ( $R_{ON}$ ), qui peut typiquement atteindre de  $1\text{ m}\Omega$  à  $1\ \Omega$ .

La chute de tension aux bornes du drain et de la source est proportionnelle au courant qui les traverse ainsi qu'à la résistance  $R_{ON}$ . Cette tension est généralement moindre que celle d'un transistor bipolaire en commutation, soit 0.2 V.

Cependant, le MOSFET peut s'activer de lui-même si la tension entre le drain et la source varie brutalement. Un circuit de limitation du taux de changement (« snubber ») constitué d'une résistance et d'un condensateur en série peut être ajouté entre le drain et la source pour diminuer le taux de variation de la tension à leurs bornes, ce qui permet d'éliminer cette situation potentiellement dangereuse au prix d'un temps d'activation un peu plus long.

#### 2.4.4 Thyristor conventionnel

Le thyristor est une composante de commutation qui est composée de trois terminaux : la gâchette, l'anode et la cathode. Lorsqu'une tension est appliquée entre la gâchette et la cathode, le thyristor va entrer en conduction tant que la tension et le courant anode-cathode vont demeurer positifs.

Contrairement aux autres composantes de commutation, le thyristor ne peut être désactivé en retirant le courant ou la tension de commande. Sa désactivation dépend uniquement des paramètres du circuit dans lequel il se trouve.

L'analyse expérimentale d'une allumette électrique a permis de constater que la mise à feu provoque l'ouverture du circuit après environ 1 000  $\mu$ s, ce qui va permettre au thyristor de se désactiver de lui-même.

Hors, une sortie du module de mise à feu peut avoir été placée en court-circuit à cause d'une défaillance d'une pièce pyrotechnique, qui pourrait par exemple brûler une partie de l'isolation du câble qui achemine le courant de mise à feu à l'allumette électrique. Dans ce cas, le thyristor alimenterait un court-circuit, et il serait impossible de le désactiver. Le circuit s'ouvrirait alors uniquement lorsque la température interne du thyristor provoquerait sa destruction.

De plus, la chute de tension aux bornes du thyristor est de 1 à 2 V lorsqu'il est activé, ce qui est excessif en comparaison des autres composantes étudiées.

#### 2.4.5 Comparaison des quatre solutions de commutation

La matrice de décision illustrée dans le Tableau 2.5 est utilisée pour choisir une solution de commutation.

Tableau 2.5 - Matrice de décision de la technologie de commutation

Critère	Chute de tension	Maintenance	Prévisibilité	Facilité d'utilisation
Points	15	10	10	5

Comme les allumettes électriques ont une faible résistance et que l'intérêt du projet consiste à maximiser le courant disponible pour les

mettre à feu, le critère de la chute de tension aux bornes de la composante de commutation est évalué sur 15 points. La maintenance requise par la composante ainsi que sa prévisibilité, soit le fait que son activation et sa désactivation sont prévisibles, sont évalués sur 10 points. Finalement, la facilité d'utilisation, soit le nombre de composantes supplémentaires requises entre le microcontrôleur et la solution choisie, est évaluée sur 5 points.

Le résultat de cette démarche est présenté dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6 - Matrice de décision appliquée aux quatre solutions de commutation

Critère	Relais électromécanique	Transistor bipolaire	Transistor à effet de champ	Thyristor
Chute de tension	13	10	15	5
Maintenance	3	9	9	8
Prévisibilité	8	10	8	3
Facilité d'utilisation	2	4	4	4
Total	26	33	36	20

De ce processus, le transistor à effet de champ représente le meilleur compromis du fait de sa faible résistance d'activation, donc de la faible chute de tension à ses bornes, ainsi que de sa faible maintenance (comme toutes les solutions à base de semi-conducteurs) et de sa prévisibilité, qui est cependant entachée par la possibilité d'une

activation intempestive à cause d'un transitoire en tension au taux de changement trop rapide.

Ainsi, la mise à feu des allumettes électriques peut s'effectuer de manière prévisible au moyen d'une composante de commutation qui minimise la chute de tension à ses bornes.

## 2.5 Étude des microcontrôleurs (modules de mise à feu)

Alors que la logique de contrôle de la console de tir est effectuée par un ordinateur portable, les modules de mise à feu dépendent d'un microcontrôleur pour communiquer et pour activer les sorties

### 2.5.1 Microcontrôleurs AVR 8 bits

Les microcontrôleurs AVR 8 bits sont fabriqués par Atmel et disposent d'un bus et d'une unité arithmétique et logique (ALU) pouvant traiter des mots d'une longueur de 8 bits à chaque cycle (Atmel, 2011). Malgré le fait que ces microcontrôleurs ont été introduits en 1996 et peuvent donc s'avérer désuets par rapport aux microcontrôleurs modernes, leur faible coût d'acquisition et leur faible complexité les rendent encore très populaires pour les applications qui ne requièrent pas une très grande performance.

La plateforme de développement rapide Arduino, qui a été introduite en 2005, est basée sur cette famille de microcontrôleurs et a donc permis d'augmenter sa popularité. Conséquemment, une grande

quantité de tutoriels et de ressources d'aide sont disponibles pour ces microcontrôleurs.

Le microcontrôleur à la connectique la plus évoluée de cette famille est l'AVR Atmega 2560, qui dispose de 85 ports bidirectionnels, parmi lesquels se trouve notamment 4 ports série universels (UART), 16 sorties avec modulation de largeur d'impulsion et de 16 entrées pour un convertisseur analogique-numérique 10 bits multiplexé.

### 2.5.2 Microcontrôleurs AVR 32 bits

Les microcontrôleurs AVR 32 bits sont une révision complète des processeurs AVR 8 bits introduite en 2006 par Atmel et peuvent traiter des mots d'une largeur de 32 bits (Atmel, 2011). Ces microcontrôleurs disposent de ports série universels, de ports Ethernet et de ports USB On-the-Go.

Le microcontrôleur AVR32 à la connectique la plus évoluée est l'AT32AP7000, qui dispose de 160 ports d'entrée/sortie et peut être cadencé à 150 MHz.

Cependant, cette famille de microcontrôleurs est encore dispendieuse par rapport à la famille 8 bits, dont les performances sont supposées être suffisantes pour la logique de contrôle des modules de tir. De plus, la tension d'alimentation des ports de sortie est limitée à 3.6 V, ce qui peut s'avérer insuffisant pour activer directement les transistors à effet de champ utilisés dans l'étage de sortie.

L'utilisation d'un processeur de 32 bits s'avèrerait cependant appropriée pour une version autonome de la console de tir.

### 2.5.3 Microcontrôleurs PIC 16 bits

Les microcontrôleurs PIC 16 bits sont fabriqués par Microchip et peuvent traiter des mots de 16 bits (Microchip, 2011).

Le microcontrôleur à la connectique la plus évoluée est le PIC24FJ192GA110, qui se compare à l'AVR Atmega 2560 avec ses 85 ports bidirectionnels, ses quatre ports série universels et son convertisseur analogique-numérique de 10 bits à 16 entrées multiplexées.

Cependant, comme les processeurs AVR 32 bits, la tension d'alimentation des sorties est limitée à 3.3 V.

### 2.5.4 Comparaison des trois familles de microcontrôleurs

Pour sélectionner le microcontrôleur qui gèrera la logique de contrôle des modules de mise à feu, la matrice de décision illustrée dans le Tableau 2.7 est utilisée.

Tableau 2.7 - Matrice de décision de la famille de microcontrôleurs

Critère	Tension de sortie	Rapidité	Coût d'acquisition	Popularité
Points	10	5	15	15

Comme le système « Open Cue » vise à démocratiser la mise à feu électronique en réduisant le coût d'achat des modules de tir, le coût d'acquisition des microcontrôleurs est fondamental. Pour cette raison, ce critère est évalué sur 15 points. De plus, comme le code source du logiciel embarqué sera rendu public sous licence libre, il importe de choisir une famille de microcontrôleurs qui bénéficie d'une grande popularité afin de faciliter la prise en main du code source par des tiers. Conséquemment, ce critère est aussi évalué sur 15 points.

Par ailleurs, la tension de grille requise pour activer complètement les transistors à effet de champ est de l'ordre de 5 V pour les transistors compatibles TTL. La tension de sortie maximale des microcontrôleurs est donc évaluée sur 10 points afin de minimiser le nombre d'étages requis pour activer les transistors de sortie.

Par ailleurs, les microcontrôleurs des familles étudiées sont tous assez rapides pour gérer la logique de contrôle des modules de mise à feu. Ce critère est donc évalué sur 5 points.

Le résultat de cette démarche est présenté dans le Tableau 2.8.

Tableau 2.8 - Matrice de décision appliquée aux familles de microcontrôleurs

Critère	AVR 8 bits	AVR 32 bits	PIC 16 bits
Tension de sortie	10	5	5
Rapidité	4	5	5
Coût d'acquisition	13	10	12
Popularité	15	10	13
Total	42	30	40

Ainsi, bien que désuète par rapport au niveau de performance moderne, la famille de microcontrôleurs AVR 8 bits s'avère la plus appropriée, car elle permet d'alimenter les sorties à une tension de 5 V, suffisante pour commuter les transistors à effet de champ, et elle est très populaire du fait du grand succès rencontré par la plateforme de développement rapide Arduino.

Cependant, la famille PIC 16 bits constitue aussi un bon choix, mais un étage d'amplification serait requis entre la sortie du microcontrôleur et la grille du transistor de puissance afin de le commander à sa tension nominale.



## CHAPITRE 3

### SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME « OPEN CUE »

#### 3.1 Cadence de tir

Afin de se comparer favorablement aux systèmes commerciaux actuels, le système « Open Cue » doit pouvoir effectuer jusqu'à 100 mises à feu par seconde.

Hors, le système FireOne permet de traiter jusqu'à 100 événements de mise à feu par seconde, et chaque événement de mise à feu permet d'activer toutes les sorties de tous les modules disponibles simultanément.

Conséquemment, le système « Open Cue » devra aussi implémenter une variante de ce mode de tir simultané. En pratique, ce mode permettra d'activer plusieurs sorties consécutives d'un même module en une seule instruction.

Ainsi, les artificiers pourront commander la mise à feu simultanée d'un éventail de pièces pyrotechniques afin de produire une forme de demi-cercle d'un seul coup. Ce type de regroupement de mises à feu sur plusieurs sorties parallèles est utilisé très souvent dans l'industrie, car le courant de sortie maximal d'une seule sortie n'est pas suffisant pour déclencher les quelques 16 allumettes électriques utilisées dans un éventail typique.

### 3.2 Courant de sortie par circuit

Le système « Open Cue » devra supporter jusqu'à 5 allumettes électriques en configuration série ou parallèle par sortie.

Une majorité d'artificiers raccorde les allumettes électriques en série afin de détecter plus facilement les problèmes de câblage ou une allumette électrique défectueuse, car l'une de ces deux conditions fera échouer le test de continuité du circuit en faute. Cependant, cette méthode est plus sensible aux fluctuations de tension causées par une grande distance entre le module de mise à feu et les effets pyrotechniques, car la résistance du fil s'additionne à celle des cinq allumettes électriques.

Toutefois, certains artificiers sont prêts à tolérer qu'une allumette défectueuse ne soit pas détectée, en autant que le reste des effets soient tout de même mis à feu. Ceux-ci raccordent donc leurs allumettes électriques en parallèle, ce qui augmente le courant consommé par le circuit.

Conséquemment, la capacité en courant maximale de chaque sortie devra pouvoir supporter une configuration parallèle de cinq allumettes électriques.

### 3.3 Distance maximale entre les modules de tir

Si l'on tient pour acquis que les artificiers effectuent leurs mises à feu à la même distance des pièces pyrotechniques que le public, soit à la limite du périmètre de sécurité, la distance maximale entre la console et un module de tir doit être égale ou supérieure à la distance de sécurité qui s'applique aux plus grosses pièces pyrotechniques.

Le tableau 3-1 du Manuel de l'artificier, reproduit à la Figure 3.1, indique les distances de sécurité minimales à observer en fonction du calibre maximal des pièces pyrotechniques et de l'agencement des mortiers.

<b>Site oblong avec mortiers inclinés à 15° ou site circulaire avec mortiers verticaux†</b>						
Pour tout article à projection, (bombes aériennes, chandelles romaines, pétarades, etc.).						
Vent jusqu'à 40 kilomètres /heure (km/h).						
Calibre des mortiers Diamètre intérieur (mm)	Site oblong Mortiers et articles inclinés à 15°††			OU	Site circulaire Mortiers et articles verticaux††	
	Distance par rapport aux spectateurs (m)	Zone de retombée (m)	Total (m)		Rayon par rapport aux spectateurs (m)	Total (m)
Jusqu'à 30	45	35	80		50	100
Jusqu'à 50	65	60	125		75	150
Jusqu'à 60	70	80	150		90	180
Jusqu'à 80	75	95	170		95	190
Jusqu'à 102	80	130	210		115	230
Jusqu'à 127	100	165	265		145	290
Jusqu'à 155	125	200	325		175	350
Jusqu'à 180	145	230	375		205	410
Jusqu'à 205	165	260	425		230	460
Jusqu'à 255	205	330	535		290	580
Jusqu'à 305	250	400	650		350	700

Figure 3.1 : Distances de sécurité en fonction du calibre des pièces pyrotechniques  
Source : Division sur la réglementation sur les explosifs, Manuel de l'artificier, 2010

Ainsi, la distance de sécurité maximale correspond à 350 mètres lorsque des pièces pyrotechniques d'un calibre de 305 mm (12 pouces) sont utilisées sur un site circulaire.

Hors, cette approche optimiste considère que les modules sont répartis en ligne droite de la console au module de tir le plus éloigné. En pratique, les modules de mise à feu de petits effets sont généralement répartis parallèlement au public sur une centaine de mètres et les modules dédiés aux pièces pyrotechniques sont répartis perpendiculairement au public jusqu'au mortier du plus gros calibre.

Conséquemment, pour permettre une plus grande versatilité dans l'installation des modules par les artificiers, la distance maximale de la console au module le plus éloigné doit être d'au moins 1000 mètres.

### 3.4 Latence de la mise à feu

Comme la mise à feu d'une allumette électrique s'effectue en 1 000  $\mu$ s et que le système peut supporter jusqu'à 100 mises à feu par seconde, la latence entre la fin de l'envoi de l'ordre de mise à feu et la fin de l'allumage de l'allumette électrique doit être assez rapprochée pour ne pas empiéter sur la mise à feu suivante.

Pour améliorer la latence globale de chaque module, la console mesure le temps requis pour obtenir une réponse à l'instruction `ENUMERATE_MODULE` et stocke cette valeur si le module de tir a répondu avec succès. Par la suite, la latence de la ligne de

communication entre la console et le module est connue, et les temps de mise à feu de chaque sortie du module peuvent être devancés afin que la mise à feu réelle survienne au bon moment.

Cependant, si le nouveau temps de mise à feu entre en conflit avec une autre mise à feu déjà existante, la console incrémente successivement le nouveau temps d'une unité (qui correspond à  $1/100^{\text{ème}}$  de seconde) jusqu'à ce que le conflit soit éliminé.

Par ailleurs, la latence d'activation d'une sortie pourrait être mesurée expérimentalement pour chaque module au moment de la fabrication et stockée dans la mémoire vive persistante du microcontrôleur, ce qui pourrait éventuellement permettre de compenser cette latence supplémentaire de la même manière que celle de la ligne de communication.

Toutefois, il est possible que cette compensation ne soit pas requise en pratique. C'est pour cette raison que la version initiale du système n'en tient pas compte.



# CHAPITRE 4

## COMPOSANTES DU SYSTÈME

### 4.1 Système de communication

Le système de communication retenu consiste en une liaison série half-duplex câblée utilisant le protocole RS-485.

#### 4.1.1 Protocole logiciel

Chaque module de tir dispose d'une adresse unique déterminée par l'utilisateur au moyen de boutons poussoirs permettant d'incrémenter ou de décrémenter l'adresse courante du module. L'adresse 0 est réservée pour envoyer une instruction qui doit être exécutée par tous les modules.

Chaque octet d'une trame est constitué d'un bit de départ (**STA**), d'un bit d'adressage (**ADD**), de sept bits de données (**D[0..6]**), d'un bit de parité (**PAR**) et d'un bit d'arrêt (**STO**). Un octet typique est illustré à la Figure 4.1.



Figure 4.1 - Format d'un octet d'une trame

Si le bit d'adressage est égal à 1, les récepteurs de tous les modules s'activent pour recevoir l'adresse. Si l'adresse reçue et l'adresse du

module correspondent ou si l'adresse reçue est 0, le récepteur du module demeure activé jusqu'à la fin de la trame. Sinon, le récepteur du module ignore les octets dont le bit d'adressage est de 0 (instructions) et s'active uniquement au début de la prochaine trame, qui est identifiée par un bit d'adressage activé. Cette discrimination permet d'éviter de traiter les trames qui ne concernent pas le module, ce qui réduit la consommation d'énergie du microcontrôleur.

Le système « Open Cue » dispose de deux modes d'adressage : le mode normal, où un seul octet de la trame est utilisé pour transmettre l'adresse, et le mode étendu, où deux octets sont utilisés.

Le mode d'adressage normal permet d'avoir des trames plus courtes, ce qui permet d'atteindre la cadence de tir nominale, mais supporte 127 modules au maximum. À l'opposé, le mode d'adressage étendu diminue la cadence de tir maximale, mais supporte 16129 modules distincts. Ce mode peut être sélectionné lorsque le système est utilisé pour effectuer la mise à feu de spectacles contenant plus de 2032 mises à feu distinctes (soit 16 mises à feu pour chacun des 127 modules supportés dans le mode normal).

La totalité des instructions supportées sont décrites dans l'Annexe II - Instructions supportées par le système de communication.

Les instructions qui constituent une réponse du module de mise à feu retournent les valeurs associées à l'instruction envoyée par la console lorsque applicable. Par exemple, si la console envoie l'instruction

<TEST\_CIRCUIT 15> pour tester la continuité du circuit de la sortie 15, le module répond avec l'instruction <CIRCUIT\_CLOSED 15> ou <CIRCUIT\_OPEN 15> pour indiquer que le circuit 15 est respectivement fermé ou ouvert.

Comme la ligne de communication est de type half-duplex, les modules enfilent séquentiellement leurs réponses dans leur mémoire vive. Lorsque la console estime que la prochaine instruction qu'elle doit envoyer survient assez loin dans le temps pour donner le temps au module de répondre, elle envoie l'instruction <MODULE\_SEND\_REPLY> pour indiquer au module d'envoyer la première réponse de sa file.

Les modules sont interrogés de la plus ancienne instruction à la plus récente. Ainsi, si la console a envoyé l'instruction <FIRE\_SINGLE 1> au module 1 et l'instruction <FIRE\_ALL> au module 2, elle enverra l'instruction <MODULE\_SEND\_REPLY> au module 1 en premier, puis au module 2.

L'instruction <ENUMERATE\_MODULE>, qui est utilisée à l'initialisation pour déterminer si un module prévu dans le script est présent, donne implicitement l'autorisation de répondre au module de tir spécifié. S'il n'a pas répondu dans le temps imparti, la console considère que cette adresse n'est pas utilisée et tente de rejoindre le module correspondant à l'adresse suivante dans sa liste.

Chaque trame se termine par une somme de contrôle à redondance cyclique de 16 bits tronquée à 14 bits pour la transmission. Ainsi, toute corruption des données en transit entraîne le rejet de la trame.

#### 4.1.2 Implémentation matérielle

Au niveau matériel, la console et les modules de tir utilisent le circuit intégré MAX3082 de Maxim. Ce circuit intégré permet d'implémenter le protocole RS-485 en mode half-duplex à une vitesse de transmission maximale de 115 kbits/seconde (Maxim, 2011).

Chaque récepteur a une impédance d'entrée de  $96\text{ k}\Omega$ , ce qui permet à un seul transmetteur d'être relié à un maximum de 256 récepteurs. Ainsi, dans le mode d'adressage normal, les 127 modules supportés peuvent être reliés à la même ligne de communication. Hors, dans le mode d'adressage étendu, un multiplicateur de ports doit être utilisé afin de transmettre le même signal sur plusieurs lignes de communication reliées à un maximum de 256 modules par groupe.

Afin d'éviter une situation similaire à celle observée par François Léger avec le système FireOne lorsqu'il est utilisé avec une ligne de communication très longue, le même circuit intégré est utilisé dans la console et dans les modules de tir. De cette manière, la performance devrait être identique dans les deux directions, contrairement au système FireOne, où les modules de tir ont parfois de la difficulté à envoyer des trames à la console.

## 4.2 Module de mise à feu

Les modules de mise à feu sont constitués de sous-modules qui communiquent avec le microcontrôleur, soit l'alimentation CC-CC dynamique, le circuit de test de continuité, le circuit de mise à feu et l'interface homme-machine.

Les schémas électriques de ces sous-modules sont présentés dans l'Annexe III - Schémas électriques du module de mise à feu.

### 4.2.1 Alimentation CC-CC dynamique

Chaque module contient une batterie de 12 V pour alimenter les circuits intégrés et fournir le courant requis pour effectuer la mise à feu des allumettes électriques.

Cependant, le Manuel de l'artificier recommande d'utiliser deux batteries en série pour effectuer les mises à feu à une tension de 24 V.

De plus, pour pouvoir mettre à feu cinq allumettes électriques connectées en série et situées à 30 mètres du module de mise à feu, la tension fournie par la batterie peut s'avérer insuffisante.

Pour ces raisons, chaque module de mise à feu dispose d'une alimentation à découpage variable qui charge un banc de condensateurs à une tension de 12 à 36 V. L'interface de la console de tir permet à l'utilisateur de changer manuellement la tension de sortie des modules en fonction du nombre maximal d'allumettes électriques utilisées.

De cette manière, la tension de sortie variable permet de moduler la puissance que peut fournir le module de mise à feu pour un courant de sortie fixe.

#### 4.2.2 Système de test de continuité

Lorsque le module de mise à feu n'est pas armé, une résistance de sécurité est placée en série avec tous les circuits d'allumettes électriques de manière à limiter le courant total à une valeur inférieure à celle du courant seuil.

Pour tester la continuité des circuits raccordés à chaque sortie, une tension de 12 V est appliquée à chaque circuit composé des allumettes électriques et de la résistance de sécurité. Le convertisseur analogique à numérique du microcontrôleur mesure la chute de tension aux bornes de la résistance de sécurité.

Si le circuit est continu, la chute de tension aux bornes de la résistance de sécurité tend vers la tension d'alimentation. Cependant, si le circuit est ouvert, la valeur lue par le convertisseur analogique à numérique tendra vers zéro en raison de la bande morte du circuit de conversion.

#### 4.2.3 Système de mise à feu

Chaque sortie du module de tir est activée au moyen d'un transistor à effet de champ dont la grille est compatible avec des tensions de niveau TTL. Pour éviter que le transistor ne s'amorce de façon spontanée à cause d'un fort niveau de bruit électromagnétique, la grille est référencée

à la masse au moyen d'une résistance tire-bas et le drain et la source sont reliés au moyen d'un circuit de suppression des transitoires de type résistance-condensateur.

La résistance de sécurité, commune à toutes les sorties, est court-circuitée par le transistor d'armement, qui a une capacité en courant qui est d'au moins 16 fois la capacité maximale de chaque sortie afin de pouvoir supporter la mise à feu de toutes les sorties de façon simultanée.

#### 4.2.4 Interface homme-machine

Les modules de mise à feu disposent d'un écran à cristaux liquides (LCD) et de deux boutons poussoirs. L'utilisateur utilise les boutons pour régler l'adresse du module, qui est ensuite affichée sur l'écran LCD. Cet écran est aussi utilisé pour afficher des messages d'erreur pour indiquer une situation qui requiert une intervention de l'utilisateur.

#### 4.3 Console de tir

La partie logique de la console de tir est basée sur un ordinateur portable. À la manière du système ATF, la console sert uniquement de passerelle entre l'ordinateur et les modules de mise à feu.

Par ailleurs, la console est alimentée par le port USB de l'ordinateur.

Le schéma électrique de la console de tir est illustré dans l'Annexe IV – Schéma électrique de la console de tir.

### 4.3.1 Décodage des trames

La console de tir est branchée à l'ordinateur portable par le biais d'un port USB. Le circuit intégré FTDI FT232R décode les trames USB et les transmet à l'étage suivant au moyen d'un port série compatible TTL.

### 4.3.2 Changement de protocole de communication

L'étage de sortie de la console de tir convertit les trames séries compatibles TTL vers le protocole RS-485 au moyen du circuit intégré Maxim MAX3082.

### 4.3.3 Système de verrouillage à deux étapes

Le système de verrouillage à deux étapes mandaté par le Manuel de l'artificier est constitué d'un interrupteur à bascule suivi d'un interrupteur à clé qui coupe l'alimentation du circuit qui effectue la conversion du port série TTL vers le port de sortie en RS-485.

Comme la ligne de communication est polarisée à un état haut lorsque le transmetteur est inactif, les modules de tir ne peuvent recevoir de trame de communication valide tant que les deux interrupteurs de sécurité ne sont pas activés.

## CONCLUSION

Les systèmes de mise à feu d'effets pyrotechniques sont dispendieux et ne permettent pas à l'utilisateur de les modifier facilement pour qu'ils répondent mieux à leurs besoins.

Dans le cadre de ce projet, le système de mise à feu libre « Open Cue » a été conçu de manière à se comparer favorablement aux systèmes commerciaux actuels.

Pour posséder des caractéristiques similaires, le système « Open Cue » est composé de modules de mise à feu à 16 sorties adressables individuellement et d'une console de tir qui agit comme passerelle entre un ordinateur portable et les modules de tir. Les modules sont reliés entre eux au moyen d'une liaison filaire de type RS-485 half-duplex, qui permet d'atteindre une cadence de tir maximale de 100 mises à feu par seconde.

De plus, pour maximiser le courant disponible pour déclencher les allumettes électriques, les modules disposent d'une alimentation à courant continu dont la tension de sortie peut être réglée de 12 à 36 V et qui charge un banc de condensateurs qui est déchargé lors de la mise à feu.

Par ailleurs, l'étage de sortie des modules de mise à feu dispose de transistors à effet de champ, ce qui contribue à minimiser les chutes de tension attribuables à l'électronique de puissance.

Ainsi, le système « Open Cue » permet d'effectuer jusqu'à 2032 mises à feu de circuits composés d'une à cinq allumettes en série ou en parallèle.

Dans le cadre de ce projet, le prototype du système n'a pas été réalisé. La prochaine étape est donc de valider la conception effectuée dans le cadre de ce projet en réalisant le prototype de la console de tir et des modules de mise à feu et d'effectuer une démonstration avec de véritables pièces pyrotechniques pour en confirmer le bon fonctionnement.

## ANNEXE I

### Analyse des résultats des tests d'allumettes électriques

Des allumettes électriques de modèle J-Tek15 ont été testées à une tension continue de 5 V et de 12 V selon la méthodologie décrite dans le chapitre 2.2 - Caractérisation d'une allumette électrique.

Les données obtenues au cours de ces tests sont présentés dans la Figure 4.2 (5 V) et dans la Figure 4.3 (12 V).

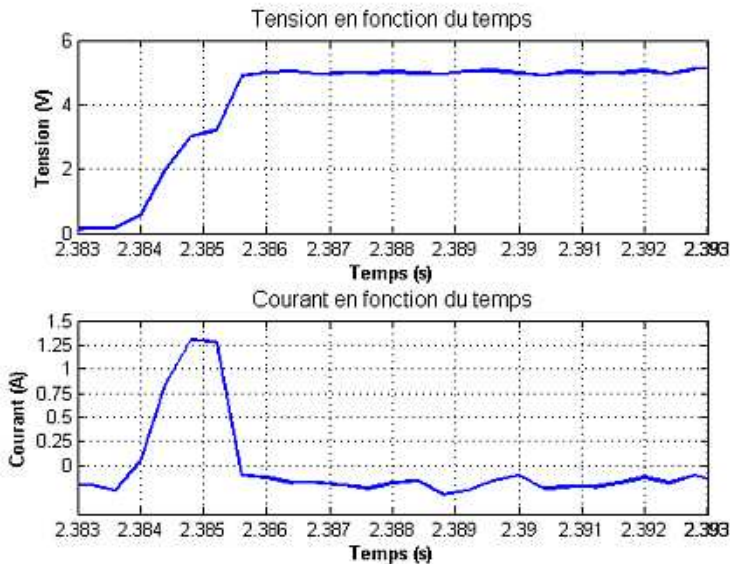


Figure 4.2 - Test d'une allumette électrique à 5 V à courant continu

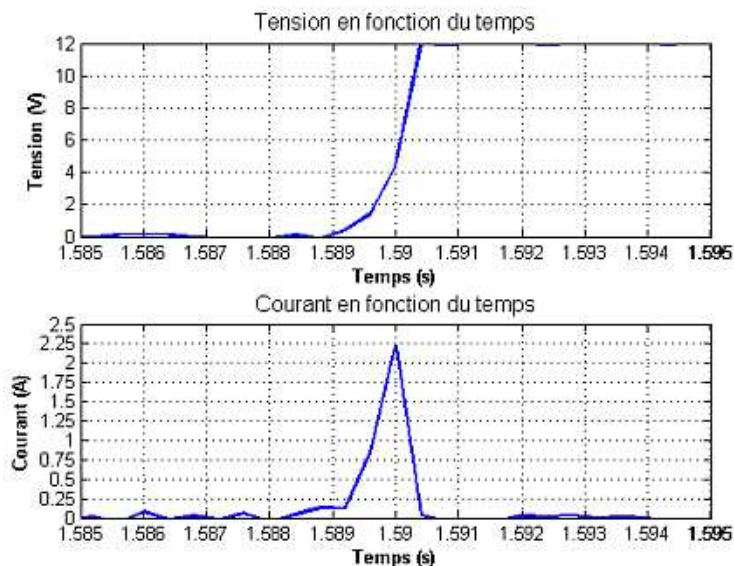


Figure 4.3 - Test d'une allumette électrique à 12 V à courant continu

Ainsi, lorsque l'allumette est alimentée à 5 V à courant continu, la tension à ses bornes au moment du déclenchement est d'environ 2.5 V, car la résistance du shunt est identique à sa résistance, ce qui divise par deux la tension nominale. Le courant de mise à feu se maintient à 1.25 A pendant environ 500 microsecondes ( $\mu\text{s}$ ), ce qui entraîne la rupture du filament de nichrome et ouvre le circuit.

À cette tension, la mise à feu prend environ 1500  $\mu\text{s}$ .

Lorsque l'allumette électrique est alimentée à 12 V à courant continu, la tension à ses bornes atteint un maximum de 5 V car la mise à feu est trop rapide par rapport au temps de montée de la source de déclenchement.

Comme cette tension est deux fois supérieure à celle obtenue dans le test précédent, la mise à feu prend un peu plus de la moitié du temps, soit environ 1000  $\mu\text{s}$ .

L'équation I-1 est utilisée pour déterminer l'énergie consommée par l'allumette électrique. Hors, cette équation requiert la puissance consommée, qui à son tour requiert la tension et le courant moyens. Les équations I-2 et I-3 sont utilisées pour déterminer respectivement la tension moyenne et le courant moyen par intégration de l'aire sous les courbes obtenues au moyen de l'oscilloscope.

(I-1)

$$J = P * T = V_{moy} * I_{moy} * T$$

(I-2)

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

(I-3)

$$I_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt$$

L'intégration est effectuée au moyen de l'instruction *trapz* du logiciel Matlab, qui effectue une intégration trapézoïdale de deux tableaux de valeurs (temps et variable dépendante) passés en paramètre (The MathWorks Inc., 2011). Les trois tableaux utilisés (temps, tension et courant) sont bornés dans l'intervalle d'intérêt du test, qui est de 1 600  $\mu\text{s}$  (4 échantillons) dans les deux cas.

Les tensions et les courants moyens et l'énergie consommée lors de chacun des tests sont indiqués dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 - Tension, courant et énergie consommée par allumette électrique

Tension de test (V)	Tension moyenne (V)	Courant moyen (A)	Puissance consommée (W)	Énergie consommée (J)
5	2.287	0.933	2.133	0.003
12	4.000	1.045	4.180	0.005

L'analyse de ces valeurs fait ressortir la faible résolution temporelle de l'oscilloscope utilisé, car l'énergie consommée passe du simple au double dans chacun des tests alors qu'elle devrait demeurer relativement constante.

En effet, l'oscilloscope stocke 10 000 échantillons et l'enregistrement durait quatre secondes, ce qui donne un taux d'échantillonnage de 2 500 mesures par seconde.

Comme la mise à feu de l'allumette électrique dure environ 1 000  $\mu$ s et que la période d'échantillonnage est de 400  $\mu$ s, il n'y a pas assez de mesures dans l'intervalle d'intérêt pour garantir un résultat précis.

Malgré tout, ces tests permettent d'établir que l'énergie moyenne requise par une allumette électrique est d'environ 4 mJ.

## ANNEXE II

### Instructions supportées par le système de communication

La liste complète des instructions supportées par le système de communication entre la console de tir et les modules de mise à feu est présentée dans le Tableau 4.2. Les trois types d'instructions supportés sont :

1. Une instruction, pas de valeur associée
2. Une instruction, une valeur associée (« VALEUR »)
3. Une instruction, deux valeurs associées (« VALEUR 1 » et « VALEUR 2 »)

Tableau 4.2 - Instructions supportées par le système de communication

Instruction	Type de trame	Valeur (binaire)	Description
CONSOLE_ONLINE	1	0	Envoyée à intervalle fixe pour indiquer que la console fonctionne
ENUMERATE_MODULE	1	1	Envoyée pendant l'initialisation de la console pour déterminer si le module spécifié est présent
NORMAL_ADDR_MODE	1	10	Indique aux modules de passer en mode d'adressage normal
EXT_ADDR_MODE	1	11	Indique aux modules de passer en mode d'adressage étendu

<b>Instruction</b>	<b>Type de trame</b>	<b>Valeur (binaire)</b>	<b>Description</b>
ARM_MODULES	1	100	Fait passer les modules en mode de tir et active le signal de danger
CHARGE	1	101	Démarre le chargement des condensateurs de tir à la tension spécifiée par l'instruction FIRING_VOLTAGE
DRAIN	1	110	Déclenche le vidage de l'énergie accumulée dans les condensateurs
DISARM_MODULES	1	111	Désactive le mode de tir et le signal de danger
TEST_CIRCUIT	2	1000	Demande au module de tester la continuité de la sortie spécifiée par le champ <VALEUR>
FIRING_VOLTAGE	2	1001	Change la tension de sortie des modules de tir pour celle spécifiée dans le champ <VALEUR>
FIRE_SINGLE	2	1100	Demande au module de mettre à feu la sortie spécifiée par le champ <VALEUR>
FIRE_RANGE	3	1101	Demande au module de mettre à feu les sorties incluses entre <VALEUR 1> et <VALEUR 2>

Instruction	Type de trame	Valeur (binaire)	Description
FIRE_ALL	1	1110	Demande au module de mettre à feu toutes ses sorties simultanément
EMERGENCY_STOP	1	111111	Provoque le vidage de tous les condensateurs et désarme le système
MODULE_SEND_REPLY	1	1000000	Indique au module de tir d'envoyer la prochaine réponse de sa pile
MODULE_PRESENT	1	1000001	Réponse du module de tir à l'instruction ENUMERATE_MODULE
CIRCUIT_CLOSED	2	1000010	Réponse positive du module à l'instruction TEST_CIRCUIT
CIRCUIT_OPEN	2	1000011	Réponse négative du module à l'instruction TEST_CIRCUIT
CUE_FIRE_SUCCESS	2	1000100	Réponse positive du module à l'instruction FIRE_SINGLE
CUE_FIRE_FAILURE	2	1000101	Réponse négative du module à l'instruction FIRE_SINGLE
RANGE_FIRE_SUCCESS	3	1000110	Réponse positive du module à l'instruction FIRE_RANGE
RANGE_FIRE_FAILURE	3	1000111	Réponse négative du module à l'instruction FIRE_RANGE
ALL_FIRE_SUCCESS	1	1001000	Réponse positive du module à l'instruction FIRE_ALL
ALL_FIRE_FAILURE	1	1001001	Réponse négative du module à l'instruction FIRE_ALL

Instruction	Type de trame	Valeur (binaire)	Description
FATAL_FAILURE	1	1111111	Réponse d'un module lorsque le matériel ne répond plus, mais que le microcontrôleur fonctionne encore

## ANNEXE III

### Schémas électriques du module de mise à feu

Les modules de mise à feu sont composés de trois sous-modules principaux : l'alimentation CC-CC variable, le circuit de mise à feu et le circuit de test des allumettes électriques et l'interface homme-machine.

L'alimentation CC-CC variable est composée des composantes illustrées dans la Figure 4.4.

Cette alimentation est basée sur un hacheur survolteur, dont la logique de contrôle est gérée par le circuit intégré Maxim MAX1771 (Maxim, 2011). Le potentiomètre numérique  $Rf_1$  est contrôlé par le microcontrôleur afin de régler la tension de sortie du circuit à la valeur indiquée par l'instruction FIRING\_VOLTAGE.

Si l'instruction FIRING\_VOLTAGE indique que le tir s'effectue à la tension nominale d'alimentation du module de mise à feu, soit 12 V, ou lorsque le système est désarmé, le microcontrôleur active la sortie DACCV (Désactiver Alimentation CC Variable), ce qui désactive l'alimentation à découpage.

Pour sa part, l'interface homme-machine est pourvue des composantes illustrées à la Figure 4.5.

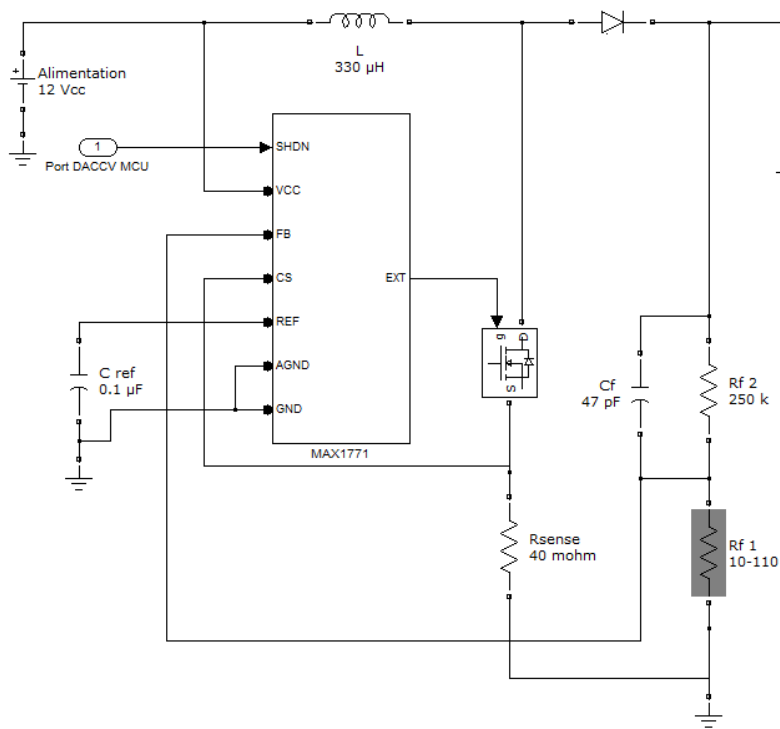


Figure 4.4 - Schéma électrique de l'alimentation CC-CC variable

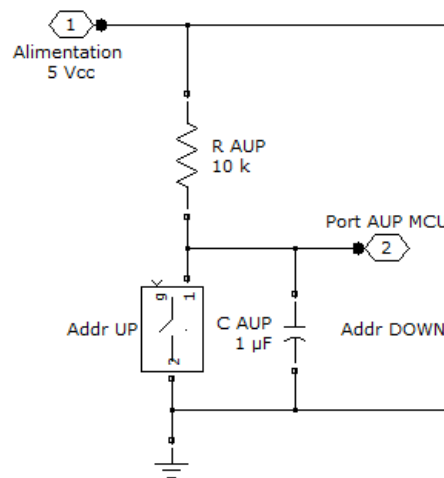
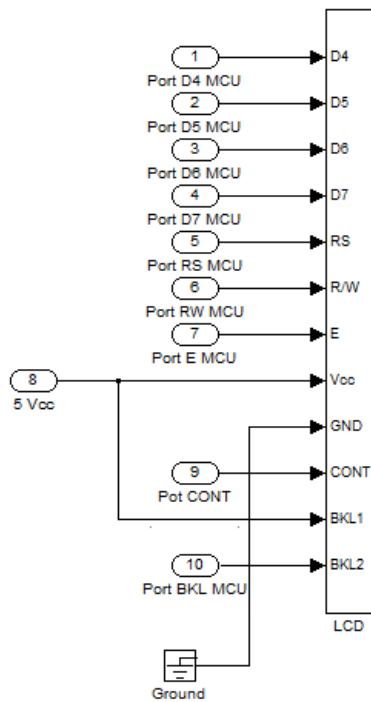


Figure 4.5 - Schéma électrique de l'interface homme-machine

Ce circuit est composé d'un écran LCD et de deux boutons poussoirs, soit Address UP (incrémentation) et Address DOWN (décrémentation). Le signal de sortie de ces boutons est conditionné au moyen d'un réseau RC dont la période  $\tau$  est de 10 millisecondes.

Le rétro-éclairage de l'écran LCD est commandé au moyen du port BKL du microcontrôleur afin de minimiser la consommation électrique du circuit quand l'opérateur n'interagit pas avec les boutons poussoirs. Si un message d'erreur est affiché sur l'écran LCD, le rétro-éclairage s'active automatiquement pour indiquer à l'opérateur que le module de mise à feu est en faute.

Finalement, le module combiné de mise à feu et de test des allumettes électriques comprend les composantes illustrées à la Figure 4.6.

En fonction de la valeur de l'instruction FIRING\_VOLTAGE ou encore de la réception de l'instruction TEST\_CIRCUIT, le microcontrôleur active le port TTV (Tester/Tirer à Vcc) ou le port Charger (couplé à la désactivation du port DACCV de l'alimentation CC-CC variable).

Pour effectuer le test des allumettes électriques d'un circuit  $n$ , où  $n$  est inclus entre 1 et  $N$ , les ports TTV et Activer\_ $n$  sont activés. La tension nominale du module de mise à feu peut donc passer dans le circuit en test et dans la résistance de sécurité. Cette résistance permet de limiter le courant total du module de mise à feu à une valeur inférieure au courant seuil de l'allumette J-Tek15, qui est d'ailleurs similaire aux

autres allumettes commerciales typiques. Si le circuit est fermé, le courant consommé par le circuit induit une chute de tension qui tend vers la tension d'alimentation dans la résistance de sécurité. Cette tension est mesurée par le convertisseur analogique-numérique du microcontrôleur à travers un diviseur de tension qui ramène la tension maximale du circuit (36 V) à moins de 5V.

Lorsque le système utilise une tension de tir supérieure à 12 V et que la commande CHARGE est reçue de la console, le port DACCV est désactivé et le port Charger est activé, ce qui charge les N condensateurs de tir à la tension choisie. Une résistance limite le courant total consommé par chaque condensateur à  $1/N^{\text{ème}}$  du courant qui peut être fourni par l'alimentation CC-CC variable pour éviter de la surcharger.

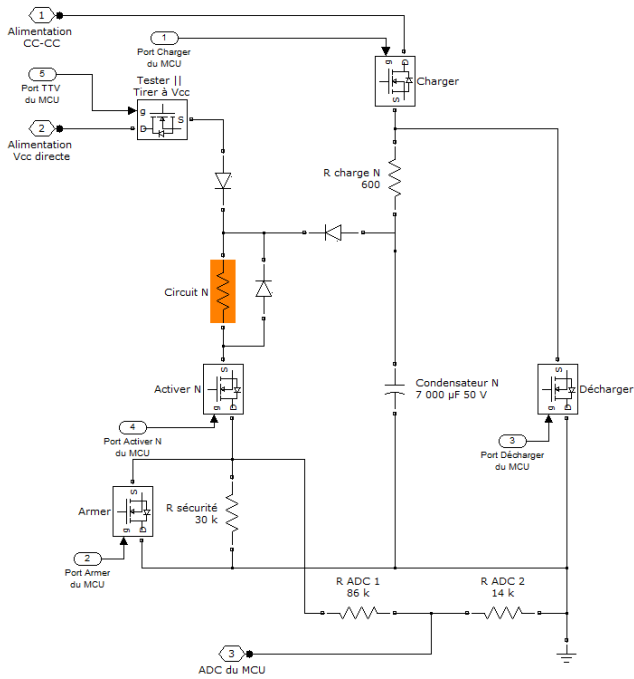


Figure 4.6 - Schéma électrique de l'étage de sortie et de l'étage de test

Une fois que les condensateurs de tir sont chargés ou que le port TTV est activé dans le cas d'un tir à 12 V et que la commande ARM\_MODULES est reçue par le microcontrôleur, le port Armer s'active, ce qui court-circuite la résistance de sécurité et permet d'effectuer le tir au courant maximal que peut fournir la source.

Lorsqu'un ordre de mise à feu est reçu pour le circuit n, le port Activer\_n est activé. Le courant de tir peut donc passer dans le circuit et mettre à feu l'allumette électrique.

Finalement, lorsque les instructions DISCHARGE ou EMERGENCY\_STOP sont reçues, le microcontrôleur active le port

Décharger et désactive le port Charger, ce qui provoque le déchargement de tous les condensateurs. De plus, les instructions DISARM ou EMERGENCY\_STOP provoquent la désactivation du port Armer, ce qui réactive la résistance de sécurité et limite le courant disponible à une valeur sécuritaire.

Trois diodes à faible tension de polarisation sont utilisées pour empêcher un court-circuit si les ports TTV et Charger sont activés simultanément par erreur et pour permettre à l'énergie accumulée dans les conducteurs de l'allumette électrique de se décharger de façon sécuritaire.

De plus, des supresseurs de changement rapide de tension (« snubbers ») sont ajoutés aux bornes de chaque transistor à effet de champ pour éviter qu'ils s'activent spontanément à cause d'un changement brutal de la tension à leurs bornes.

Par ailleurs, chaque transistor à effet de champ doit disposer de grilles compatibles TTL afin de minimiser la tension  $R_{ON}$  quand une tension d'activation de 5V est reçue du microcontrôleur.



## ANNEXE IV

### Schéma électrique de la console de tir

La console de tir est un module qui permet à un ordinateur portable dans lequel réside le logiciel de contrôle de communiquer avec les modules de mise à feu. Pour le prototype du système, la carte de développement rapide UM232R du fabricant FTDI est utilisée en lieu et en place du circuit intégré FT232R du même fabricant. Cette carte est basée sur ce circuit intégré et y ajoute les composants requis pour assurer la communication USB avec l'ordinateur; elle permet donc de gagner du temps au moment du montage au prix d'un coût plus élevé (Future Technology Devices International Ltd., 2011).

Les composants de la console de tir sont illustrées à la Figure 4.7.

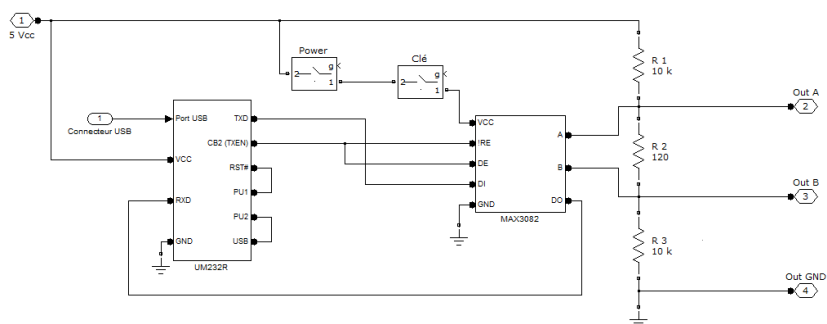


Figure 4.7 - Schéma électrique de la console de tir

Le circuit intégré FT232R intégré dans la carte de développement rapide UM232R convertit les trames USB reçues de l'ordinateur en communication série de niveau TTL et transmet ces données au convertisseur MAX3082, qui effectue la conversion au protocole RS-485.

Ce circuit intégré est alimenté à travers deux interrupteurs de sécurité. Parallèlement, la ligne de communication est polarisée au moyen des résistances R1 et R3, alors que la résistance de terminaison R2 minimise les réflexions pour les données reçues des modules de mise à feu. Ainsi, si un des deux interrupteurs de sécurité est ouvert, la ligne est polarisée à un état haut, et les modules ne peuvent recevoir d'instruction tant que le transmetteur RS-485 est désactivé.

La sortie CB2 du circuit intégré FT232R est programmée pour avoir un niveau haut quand le transmetteur RS-485 doit être actif (« TX Enable »). Ce signal est relié à l'entrée DE (Driver Enable) et à l'entrée !RE (Receiver Enable) du convertisseur RS-485, ce qui permet de s'assurer que seul le transmetteur ou le récepteur sont actifs à un instant donné.

La console de tir est alimentée à même le port USB, donc son courant total ne peut pas dépasser 500 milliampères (mA).

## ANNEXE V

### Présentation du projet

Cette section contient les diapositives qui ont été utilisées au cours de la présentation du projet « Open Cue » effectuée devant les pairs (finissants au baccalauréat en génie électrique) le 8 août 2011.

Projet de fin d'études – Simon Turcotte-Langevin

# Conception du système de mise à feu libre « Open Cue »



## Plan de la présentation

- Introduction – Mise à feu électrique d'effets pyrotechniques
- Conception du système Open Cue
  - Analyse des contraintes environnementales et légales
  - Analyse des systèmes de mise à feu commerciaux
  - Analyse expérimentale d'une allumette électrique
  - Sélection de composantes
- Spécifications du système Open Cue
  - Spécifications techniques du système
  - Schémas électriques des modules et de la console
- Conclusion et perspectives futures

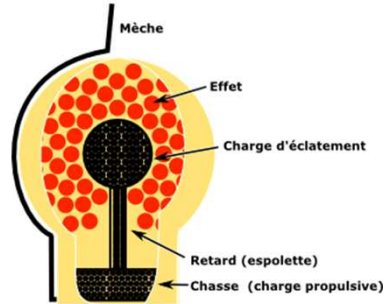
# Introduction

## Introduction

- Qu'est-ce que la mise à feu électrique d'effets pyrotechniques ?
- Pourquoi la mise à feu électrique est-elle si répandue dans l'industrie ?
- Pourquoi créer un nouveau système de tir ?

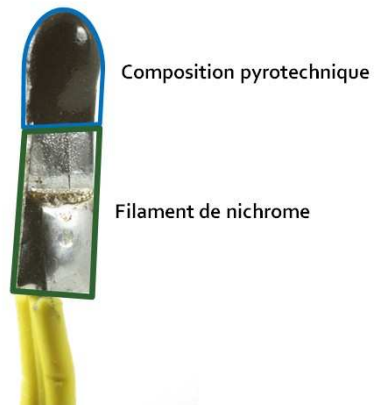
## Mise à feu d'effets pyrotechniques

- Point d'allumage d'une pièce pyrotechnique professionnelle : mèche rapide (« Quick Match »)
- Constituée de cordons recouverts de poudre noire et enveloppés dans un tube
- Vitesse de propagation de la flamme : 30 à 100 m/s
- Mise à feu traditionnelle à la torche ou au feu de Bengale



## L'allumette électrique

- Allumette électrique : mise à feu déclenchée par un courant électrique
- Composées d'un filament de nichrome et recouvertes de composition pyrotechnique
- Courant de déclenchement : 1 à 2 A
- Insérée dans la mèche rapide de l'effet



# Test d'allumettes électriques

## Estimation des coûts des systèmes commerciaux (300 sorties)

	FireOne	Pyrodigital	FireMaster IV	Automatic Timed Fire (ATF)
Modules requis	10	19	7	10
	32 sorties/mod.	16 sorties/mod.	48 sorties/mod.	32 sorties/mod.
Coût des modules	9 * 1100 \$	19 * 1015 \$	7 * 3200 €	10 * 695 \$
	9 900 \$	19 285 \$	31 622 \$	6 950 \$
Coût de la console de tir	5 195 \$	9 395 \$	3 800 €	895 \$
			5 365 \$	
Coût des câbles	225 \$	1 396 \$	S/O (sans-fil)	440 \$
Total	15 320 \$	30 076 \$	36 987 \$	8 285 \$
Total par mise à feu	47,88 \$	98,93 \$	110,08 \$	25,89 \$

## La réponse : le système « Open Cue »

- Système de mise à feu électronique libre de calibre professionnel
- « Cue » : événement de mise à feu
- Plans du matériel sous licence Creative Commons Paternité – Partage à l'identique (« BY-SA »)
- Code source sous la General Public Licence (GPL), version 3
- Personnalisation par l'utilisateur encouragée
- Utilisation de standards internationaux : réduction des coûts de fabrication
- Mise à jour facile des modules



Source : Creative Commons



Source : Free Software Foundation, Inc.

## Conception du système « Open Cue »

## Conception du système Open Cue

- Contraintes environnementales et légales
- Caractéristiques des systèmes commerciaux
- Analyse d'une allumette électrique
- Sélection des composantes
  - Système de communication
  - Système de commutation
  - Microcontrôleur

## Contraintes environnementales et légales

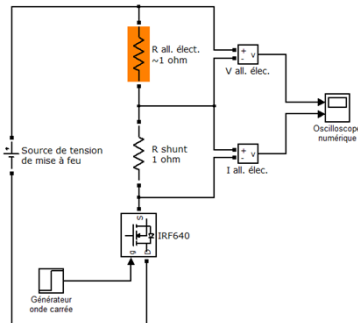
- Résistance aux intempéries de niveau IP-65/NEMA 4x
- Résistance aux écarts de température
  - Plage de fonctionnement minimale des CI : -40°C à 40°C
- Respect des normes du Manuel de l'artificier
  - Système de verrouillage à deux étapes, dont une à clé
  - Artificier responsable du spectacle en contrôle du système en tout temps
  - Courant de test : < 20% du courant seuil (non-déclenchement) des allumettes électriques
  - Alimentation recommandée : deux batteries de 12V en série

# Caractéristiques des systèmes de mise à feu commerciaux

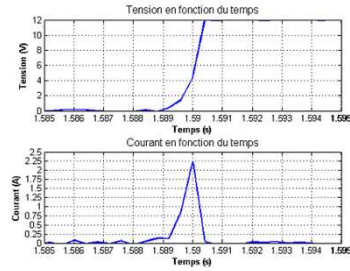
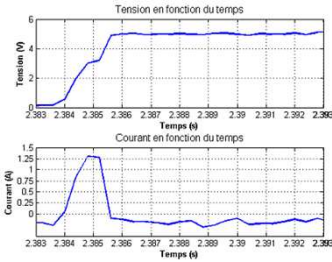
	FireOne	Pyrodigital	FireMaster IV	ATF
<b>Cadence de tir maximale</b>	100 / seconde	100 / seconde	100 / seconde	30 / seconde
<b>Source d'alimentation</b>	Condensateur chargé par câble de com.	Console de tir, par les câbles de com.	Batterie de 24 V dans les modules	Batterie de 12 V dans les modules
<b>Résistance aux intempéries</b>	Oui	Non	Oui	Oui
<b>Système de communication</b>	Bifilaire, 18 AWG	Trois conducteurs, XLR 3 broches	RF ou RS-485 bifilaire	RS-485 à quatre conducteurs, XLR 4 broches

# Analyse d'une allumette électrique

- Banc de test électronique
- Permet de déclencher une allumette électrique à une tension variable
- Permet de mesurer le courant consommé en fonction du temps



# Paramètres électriques d'une allumette électrique



Tension de test (V)	Tension moyenne (V)	Courant moyen (A)	Puissance consommée (W)	Énergie consommée (J)
5	2.287	0.933	2.133	0.003
12	4.000	1.045	4.180	0.005

# Choix d'un système de communication

Critère	RS 485	10BASE-T Ethernet	IEEE 802.15.4 « Zigbee », etc.	IEEE 802.11 n Wi-Fi N (ad-hoc)
Distance maximale /10	4000 pieds – 1300 m 10	100 m 5	10 m 2	250 m 8
Taux de transmission /5	~70 kb/s à 1300 m 3	10 Mb/s 5	250 kb/s 3	72.2 Mb/s 5
Coût d'implémentation /10	C.I. + câbles 3 cond. 7	C.I. + câbles 8 cond. 6	C.I. + circuit RF 8	C.I. + circuit RF 7
Facilité d'utilisation /10	C.I., couches 1-2 OSI 10	Couches 1 et 2 OSI 7	Couches 1-2 OSI 7	Couches 1-6 OSI 5
Total /35	30	23	20	25

## Choix d'une composante de commutation

Critère	Relais électromécanique	Transistor bipolaire	Transistor à effet de champ	Thyristor
<b>Chute de tension</b> /15	Faible ( $R \cdot I^2$ ) 13	$\sim 0.2\text{ V}$ 10	Faible ( $R \cdot I^2$ ) 15	$\sim 1\text{-}2\text{ V}$ 5
<b>Maintenance</b> /10	Usure des contacts 3	Faible 9	Faible 9	Faible 8
<b>Prévisibilité</b> /10	Un peu imprévisible 8	Excellente 10	Activation dV/dt 8	Désactivation incertaine 3
<b>Facilité d'utilisation</b> /5	Transistor, diode 2	Résistance 4	Réseau R-C (snubber) 4	Circuit d'amorçage 4
<b>Total</b> /40	26	33	36	20

## Choix d'un microcontrôleur

Critère	AVR 8 bits	AVR 32 bits	PIC 16 bits
<b>Tension de sortie</b> /10	$5\text{ V}_{CC}$ 10	$3.3\text{ V}_{CC}$ 5	$3.3\text{ V}_{CC}$ 5
<b>Rapidité</b> /5	8 bits, 20 MIPS 4	32 bits, 150 MIPS 5	16 bits, 16 MIPS 5
<b>Coût d'acquisition</b> /15	Faible (ancienneté) 13	Élevé (récent et performant) 10	Faible (ancienneté) 12
<b>Popularité</b> /15	Excellente (Arduino, etc.) 15	Faible (récent) 10	Moyenne 13
<b>Total</b> /50	42	30	40

## Résumé de la conception

- Systèmes de tir soumis à des contraintes légales
- Cadence de tir moyenne de 100/seconde
- Allumette électrique : consomme 4 mJ, prend 1 ms à s'enflammer, ouvre le circuit
- Liaison RS-485 entre la console et les modules
- Commutation : transistors à effet de champ
- Microcontrôleur : AVR 8 bits (Atmega 2560)

## Caractéristiques du système Open Cue

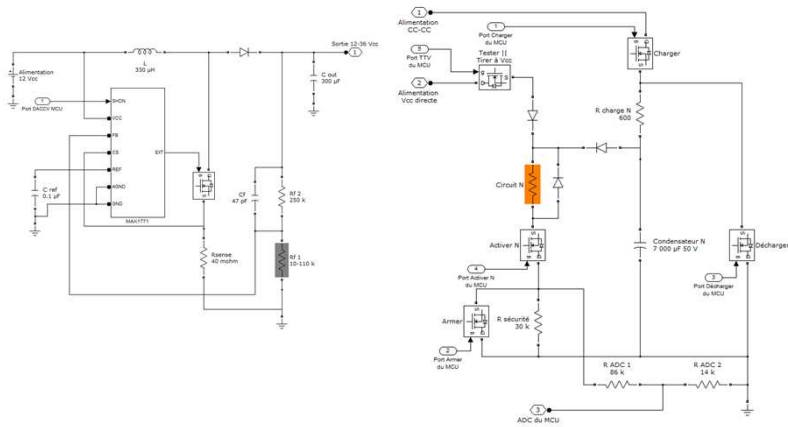
## Caractéristiques du système Open Cue

- Caractéristiques techniques
- Schémas des modules de tir
- Schémas de la console

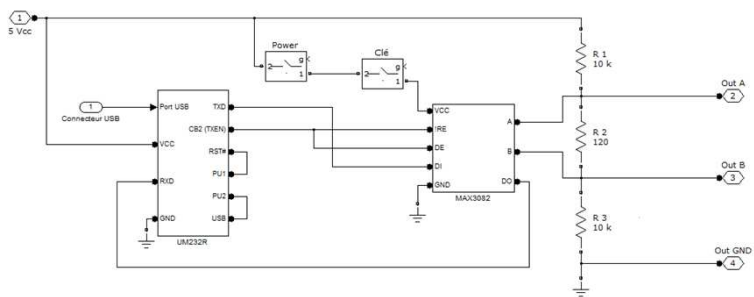
## Caractéristiques techniques

- Cadence de tir
  - 100 mises à feu/seconde
- Capacité en courant des sorties
  - 5A => 5 allumettes électriques en parallèle
- Distance maximale entre les modules et la console
  - 1000 m => Distance de sécurité maximale de 350 m + marge
- Protocole de communication
  - RS-485 half-duplex

# Modules de mise à feu



# Console de tir



# Conclusion

## Conclusion

- Comment « Open Cue » répond à la problématique
- Comment « Open Cue » se compare aux systèmes actuels
- Perspectives futures

## ANNEXE VI

### Résultat d'évaluation du rapport final

Cette section présente le résultat d'évaluation du rapport final, remis à M. Jean-François Boland, professeur à l'École de Technologie Supérieure, le 8 août 2011.



**RAPPORT TECHNIQUE FINAL**  
(maximum 50 pages sans les annexes)

Évaluation des livrables  
ELE792 - Projet de fin d'études en génie électrique  
GTS792 - Projet de fin d'études en technologies de la santé

Trimestre/Année : ÉTÉ 2011

Identification de l'étudiant	Identification du professeur superviseur
Nom : Simon Turcotte Langevin	Nom : Jean-François Boland
Code permanent :	Signature : <small>Boland, Jean-François Doc. 001124-1033-0307-0002</small>

**Évaluation sur la démarche technique (35 points)**

Pages préliminaires <ul style="list-style-type: none"> <li>• Résumé</li> <li>• Problématique</li> <li>• Objectifs</li> <li>• Hypothèses et contraintes</li> </ul>	<b>10 / 10</b>
Corps du document <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revue de la documentation</li> <li>• Description de la méthodologie                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Étapes de la méthodologie</li> <li>◦ Moyens envisagés (outils, techniques, théories, etc.)</li> <li>◦ Validation de la méthodologie</li> </ul> </li> <li>• Processus de conception                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Identification des étapes du processus</li> <li>◦ Justification des étapes</li> </ul> </li> <li>• Résultats et discussion                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Hypothèses validées</li> <li>◦ Exactitude des résultats</li> <li>◦ Présentation concise des résultats</li> <li>◦ Analyse des résultats</li> </ul> </li> </ul>	<b>13 / 15</b>
Conclusion et recommandations <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retour sur la problématique, le contexte et les objectifs</li> <li>• Présentation des principaux résultats et des conclusions partielles</li> <li>• Perspectives futures</li> </ul>	<b>8 / 10</b>
<b>SOUS-TOTAL (A)</b>	<b>31 / 35</b>

Soumettre ce rapport au concours d'excellence du département:  OUI  NON

Évaluation sur la démarche de conception (10 points)	
Intégration de plusieurs disciplines, répercussion socio-économiques et environnementales	
Développement d'éléments / systèmes / procédés	
Normes, lois, santé et sécurité (le cas échéant)	
Capacité d'analyse critique	
Créativité et originalité	
<b>SOUS-TOTAL (B)</b>	<b>9 / 10</b>
Évaluation sur le travail collaboratif (5 points)	
Appel aux personnes ressources pertinentes (professeurs, professionnels, techniciens, travailleurs en industrie, etc.)	
Favoriser une bonne dynamique de travail avec les personnes impliquées dans le projet	
<b>SOUS-TOTAL (C)</b>	<b>5 / 5</b>
Évaluation du français et du professionnalisme	
Français <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cohérence du propos</li> <li>• Langue</li> <li>• Bibliographie</li> <li>• Présentation générale du rapport</li> </ul>	
<b>SOUS-TOTAL (D)</b>	<b>-0 / 5</b>
Professionnalisme <ul style="list-style-type: none"> <li>• Attitude professionnelle (respect, éthique de travail)</li> <li>• Ponctualité</li> <li>• Respect des échéances</li> </ul>	
<b>SOUS-TOTAL (E)</b>	<b>-0 / 5</b>
Pénalités de retard par jour ouvrable <ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 24hrs : 20 %</li> <li>≥ 24 hrs et &lt; 48 hrs : 40 %</li> <li>≥ 48 hrs et &lt; 72 hrs : 60 %</li> <li>≥ 72 hrs : 100 %</li> </ul>	
<b>SOUS-TOTAL (F)</b>	<b>-0 / 50</b>
<b>GRAND TOTAL (A) + (B) + (C) + (D) + (E) + (F)</b>	<b>45 / 50</b>

# ANNEXE VII

## Résultat d'évaluation de la présentation finale

Cette section présente l'évaluation de la présentation finale effectuée devant les pairs (finissants au baccalauréat en génie électrique) le 8 août 2011 à 14h.



**PRÉSENTATION ORALE**  
Évaluation des livrables  
ELE792 - Projet de fin d'études en génie électrique  
GTS792 - Projet de fin d'études en technologies de la santé

Trimestre/Année : ÉTÉ 2011

Identification de l'étudiant	Identification du professeur superviseur
Nom : Simon Turcotte-Langevin	Nom : Jean-François Boland
Code permanent :	Signature :  <small>Reçu en vertu de la Loi sur l'accès à l'information Date: 2011-08-08 10:00:00 AM</small>

**Cette évaluation compte pour 20 points**

<b>1. Contenu de la présentation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction (Titre et plan de présentation, description du projet, problématique, objectifs, hypothèses, contraintes)</li> <li>• Corps (Méthodologie, processus de conception, faits objectifs, exemples pertinents, bases théoriques solides, résultats et discussion)</li> <li>• Conclusion et recommandations (Retour sur les objectifs, points importants, message final significatif, perspectives de travaux futurs, recommandations pertinentes)</li> </ul>	6 / 6
<b>2. Forme de la présentation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auditoire (suscite et maintient l'intérêt de l')</li> <li>(Dynamisme, ton, contact visuel)</li> <li>• Élocution (Clarté, articulation, débit)</li> <li>• Présentation électronique (Supporte les explications, bonne lisibilité, présence de schémas, diagrammes et d'images pertinentes)</li> <li>• Logique (Enchaînement des idées permettant une bonne compréhension du problème et de la solution choisie)</li> <li>• Concision (Capacité de transmettre les idées essentielles en donnant à chaque élément une importance adéquate)</li> </ul>	
<b>3. Réponses aux questions</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réponses concises et précises</li> </ul>	2 / 2
<b>4. Durée adéquate de la présentation</b>	-( / 2)
<b>5. Manque de professionnalisme</b>	-( / 2)
<b>6. Mauvaise qualité du français</b> (Français oral : niveau de la langue insuffisant, anglicismes, erreurs de syntaxe, jurons / Français écrit : présence de fautes d'orthographe)	-( / 2)
<b>GRAND TOTAL</b>	<b>19 / 20</b>



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Advanced Technique Fireworks. 2011. « Digital Computerized Firing » In *Electrical Firing Equipment* En ligne. <<http://www.atf.us.com/ATF/Digital/DigitalFiringHome.htm>> Consulté le 10 juin 2011.
- Atmel Corporation. 2011. « 32-bit AVR UC3 » In *Microcontrollers – AVR 8- and 32-bit* En ligne. <[http://www.atmel.com/dyn/products/devices.asp?category\\_id=163&family\\_id=607&subfamily\\_id=2138](http://www.atmel.com/dyn/products/devices.asp?category_id=163&family_id=607&subfamily_id=2138)> Consulté le 8 août 2011.
- Atmel Corporation. 2011. « megaAVR » In *Microcontrollers – AVR 8- and 32-bit* En ligne. <[http://www.atmel.com/dyn/products/devices.asp?category\\_id=163&family\\_id=607&subfamily\\_id=760](http://www.atmel.com/dyn/products/devices.asp?category_id=163&family_id=607&subfamily_id=760)> Consulté le 8 août 2011.
- B&B Electronics. 2010. « RS-422 and RS-485 Application Notes » En ligne. 43 p. <<http://www.bb-elec.com/bb-elec/literature/tech/485appnote.pdf>> Consulté le 10 juin 2011.
- Creative Commons. 2011. « À propos des contrats ». En ligne. <<http://creativecommons.org/licenses/?lang=fr>> Consulté le 8 août 2011.
- Division de la réglementation sur les explosifs. 2010. *Manuel de l'artificier*, 1<sup>ère</sup> édition. Norme basée sur la Loi sur les explosifs du Canada. Ottawa (Ont.) : Ressources Naturelles Canada. 94 p.
- FireOne, Pyrotechnics Management, Inc. 2005-2010 « Hardware Details » In *FireOne Pyrotechnics Management* En ligne. <<http://www.fireone.com/hardware.htm>> Consulté le 10 juin 2011.
- FireOne, Pyrotechnics Management, Inc. 2005-2010 « System Specifications » In *FireOne Pyrotechnics Management* En ligne. <[http://www.fireone.com/system\\_spec.htm](http://www.fireone.com/system_spec.htm)> Consulté le 10 juin 2011.
- Free Software Foundation. 2007. « GNU General Public License » En ligne. <<http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>>
- Future Technology Devices International Ltd. 2011. « UM232R USB - Serial UART Development Module Datasheet » En ligne. <[http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS\\_UM232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS_UM232R.pdf)> Consulté le 8 août 2011.

- IEEE Computer Society. 2009. « IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 5 : Enhancements for Higher Throughput » En ligne. <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009.pdf>> Consulté le 10 juin 2011.
- Institute of Makers of Explosives. 2009. *Safety Guide for the Prevention of Radio Frequency Radiation Hazards*, [édition inconnue]. Washington (DC) : Institute of Makers of Explosives.
- JUNEAU, Marc. 2010. *Notes de cours d'ELE 680*. Montréal : École de technologie supérieure, pagination multiple.
- MARRIOTT, Paul. 2003. « Pyromusicals 101 – 11 Seasons Reporting on the Montreal International Fireworks Competition » In 7th International Symposium on Fireworks. (Valence, Espagne, 6-10 octobre 2003), p.5-6. Montréal : Publié par l'auteur.
- Maxim Integrated Products. « MAX1771 - 12V or Adjustable, High-Efficiency, Low IQ, Step-Up DC-DC Controller » In *Power and Battery Management* En ligne. <<http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/1030>> Consulté le 8 août 2011.
- Maxim Integrated Products. « MAX3080, MAX3081, MAX3082, MAX3083, MAX3084, MAX3085, MAX3086, MAX3087, MAX3088, MAX3089 - Fail-Safe, High-Speed (10Mbps), Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers » In *Interface, Interconnect, Signal Integrity* En ligne. <<http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/1522/t/al>> Consulté le 8 août 2011.
- Microchip. 2011. « PIC 24F MCU Product Family » In *16-bit Microcontrollers and Digital Signal Controllers* En ligne. <<http://www.microchip.com/ParamChartSearch/chart.aspx?branchID=8181&mid=14&lang=en&pageId=75>> Consulté le 8 août 2011.
- MJG Technologies Inc. 2011. « Product Information » En ligne. <[http://www.electricmatch.com/product\\_us.html](http://www.electricmatch.com/product_us.html)> Consulté le 8 août 2011.
- Parente Fireworks. 2010. « FireMaster 4 » En ligne. 10 p. <<http://www.firemasterplus.com/images/stories/FIREMASTER-4-ENG-catalogue.pdf>> Consulté le 10 juin 2011.
- Pyrodigital Consultants Electronic Firing System. [Année non-spécifiée] « Pyrodigital Field Controller » In *Pyrodigital Firing System* En ligne. <[http://www.infinityvisions.com/pd\\_FC.htm](http://www.infinityvisions.com/pd_FC.htm)> Consulté le 10 juin 2011.

- Pyromate. 2005. « Basics of Electrical Firing » En ligne.  
<<http://www.pyromate.com/Basics-of-Electrical-Firing.htm>> Consulté le 8 août 2011.
- The MathWorks Inc. 2011. « Trapz - Trapezoidal numerical integration » In *Product Documentation* En ligne.  
<<http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/trapz.html>> Consulté le 8 août 2011.
- TURCOTTE-LANGEVIN, Simon. [À paraître]. « Entrevue avec François Léger ». In *Logique Floue : Pyrotechnie*, Hors ligne (à paraître).  
<<http://www.logiquefloue.ca/pyrotechnie/entrevues/francois-leger/>>
- TURCOTTE-LANGEVIN, Simon. 2009. « Entrevue avec Paul Csukassy ». In *Logique Floue : Pyrotechnie*, En ligne.  
<<http://www.logiquefloue.ca/pyrotechnie/entrevues/paul-csukassy/>>  
Consulté le 8 août 2011.
- Wireless Sensor Networks Research Group. « 802.15.4 vs. Zigbee » En ligne.  
<<http://sensor-networks.org/index.php?page=0823123150>> Consulté le 10 juin 2011.



## BIBLIOGRAPHIE

Finale Fireworks. 2010. « Exporting to ATF » In *Finale Fireworks Features* En ligne. <<http://www.finalefireworks.com/features/exporttoatf>> Consulté le 10 juin 2011.

Maxim. 2001. « Application Note 763 - Guidelines for Proper Wiring of an RS-485 (TIA/EIA-485-A) Network » En ligne. <<http://pdfserv.maximic.com/en/an/AN763.pdf>> Consulté le 10 juin 2011.





Artificier et amateur de pyrotechnie, Simon Turcotte-Langevin a décidé de concevoir le système de mise à feu libre pour effets pyrotechniques « Open Cue » dans le cadre de son projet de fin d'études du baccalauréat en génie électrique.

Ce livre est l'adaptation du rapport final présenté à M. Jean-François Boland, professeur du département de génie électrique à l'École de Technologie Supérieure.

