

Une approche d'un prototype de détection d'incendie

An approach for a fire detection prototype

Roméo MUSELEFU Mbula¹, François NTAMBEWE Kadinda¹, Idriss KYONI Nkulu¹, Mays Melki BEYA Lwango¹

¹ faculté Polytechnique, département d'électromécanique de l'université de Lubumbashi, Lubumbashi/RDC. République Démocratique du Congo, romeomuselefu.rm@gmail.com, fntambwe@gmail.com, idrisskyoni@yahoo.fr, melkimays@gmail.com

RÉSUMÉ. Cet article est consacré à une approche d'un système de détection d'incendie à l'aide d'un module Arduino Uno. Nous présentons d'abord deux modèles simples qui rendent compte de la propagation du feu et des fumées lors de feux. Le premier est un modèle aux dérivées partielles ; le second, à paramètres concentrés, est utilisé dans le simulateur CFAST, populaire dans la communauté. Nous exposons ensuite deux techniques de diagnostic. Notre système de sécurité, détaillé ensuite, comprend principalement 4 parties : la gestion, la signalisation, la détection et l'alimentation. La carte Arduino assure le rôle de gestion de notre système. Nous avons également utilisé une sirène d'alarme et un capteur de gaz MQ-2 qui remplissent les rôles de signalisation et de détection.

ABSTRACT. This paper is devoted to an approach to a fire detection system using an Arduino Uno module. We first present two simple models that account for the propagation of fire and smoke during fires. The first is a partial derivative one ; the second, with concentrated parameters, is used in the CFAST simulator, popular in the community. We then present two diagnosis techniques. Our safety system, detailed afterwards, is mainly composed of 4 parts : management, signalling, detection and power supply. The Arduino board assumes the management role of our system. We also used an alarm siren and an MQ-2 gas sensor that fulfill the signaling and detection roles.

MOTS-CLÉS. Sécurité, diagnostic, systèmes et modèles d'incendie, capteurs de gaz, Arduino.

KEYWORDS. Security, Diagnosis, Fire systems and models, gaz sensors, Arduino.

Introduction

La mise en sécurité incendie consiste en le déclenchement d'un certain nombre d'équipements techniques concourants à la sécurité contre les risques d'incendies et de panique, à partir des informations transmises par le système de détection. Le risque d'incendie est l'un des plus grands risques posés à la santé et à la sécurité des personnes. La majeure partie des incendies a des origines humaines (imprudence, malveillance, cause thermique, etc.).

Les causes naturelles les plus fréquentes sont respectivement la foudre et la fermentation. Les causes de l'incendie peuvent aussi être énergétiques : étincelles, réactions chimiques, court-circuits. Selon les experts, l'incendie d'origine électrique serait plutôt dû au développement d'échauffements ponctuels accidentels, en particulier au niveau des connexions.

La prévention contre l'incendie se matérialise par l'adoption de mesures propres, susceptibles de diminuer la probabilité d'occurrence d'un incendie au moyen de solutions techniques, de méthodes d'organisation et de signalisation. Elle doit notamment permettre :

- de détecter un tout début d'incendie ;
- de localiser l'endroit où le sinistre s'est déclaré ;
- de fonctionner même en l'absence de courant.

Cet article propose une approche qui soit réalisable sur le plan économique, tout en assurant un fonctionnement correct permettant de garantir ladite sécurité. Pour y parvenir, la méthode envisagée se fonde sur un capteur de gaz MQ-2, une sirène d'alarme et deux résistances et deux diodes, le tout relié à un module centralisé.

Les buts de la détection d'incendie poursuivent toujours les objectifs suivants :

- protéger les humains, les animaux et les objets de valeur ;
- éviter les interruptions de fonctionnement ;
- identifier les services d'urgence de manière fiable ;
- alerter les services d'urgence de manière fiable ;
- activer les systèmes d'extinction et d'évacuation automatiques.

Nous nous fixons comme but principal, dans cet article, de détecter un tout début incendie en vue de diminuer le taux des accidents afférents au sein de notre environnement.

Cet article est organisé de la manière suivante. La section 2 donne premièrement un aperçu sur deux modèles simples pour rendre compte de la propagation du feu et des fumées et lors de feux ; l'un d'entre eux est un modèle aux dérivées partielles et l'autre est à paramètres concentrées ; ce dernier est utilisé dans le simulateur CFAST, populaire dans la communauté. La section se termine, deuxièmement, par l'exposé de deux techniques de diagnostic. La section 3 s'interroge sur la description du système de sécurité d'incendie. Enfin, la section 4 traite de la conception et de la réalisation du système de détection d'incendie.

1. Modèles de propagation du feu et des fumées

Plusieurs modèles ont été développés pour rendre compte de la propagation du feu et des fumées lors de feux. Nous reprenons ci-dessous deux modèles simples, l'un aux dérivées partielles et l'autre à paramètres concentrées utilisé dans le simulateur CFAST, populaire dans la communauté.

1.1. Modèles par équations aux dérivées partielles

Équations du modèle

Un modèle, développé dans (MANDEL et al. 2008) est ci-dessous reproduit. Les dynamiques de température T de la colonne de fumée et de fraction massique de combustible S s'écrivent :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - v \frac{\partial T}{\partial z} + A \left(S e^{-\frac{B}{T-T_a}} - C(T - T_a) \right) \quad (1)$$

$$\dot{S} = -C_s S e^{-\frac{B}{T-T_a}} \quad (2)$$

La première équation, de réaction-diffusion non linéaire, traduit la conservation de masse dans la colonne de fumée et la deuxième exprime la vitesse disparition (en fraction massique) du combustible en fonction du taux de réaction et de la quantité de combustible restante.

Le terme de diffusion $\partial^2 T / \partial z^2$ modélise le transfert de chaleur en champ proche par radiation dans un milieu semi-perméable, $v \partial T / \partial z$ modélise l'advection de la chaleur par le vent, $S e^{-B/(T-T_a)}$ est le taux de combustible consommé par la combustion et $C(T - T_a)$ modélise la chaleur convective perdue dans l'atmosphère. Le taux de réaction $e^{-B/(T-T_a)}$ est obtenu en modifiant le taux de réaction $e^{-B/T}$ de la loi d'Arrhénius par un offset pour forcer une absence de réaction à température ambiante.

Les divers paramètres sont donnés par :

$$k = \frac{k_1}{h\rho c_p}, \quad A = \frac{A_1 C_S}{h c_p \rho}, \quad C_0 = \frac{C_a}{A_1} \quad (3)$$

Avec les significations suivantes :

v	vitesse du vent
k	Conductivité thermique
A	Élévation de température par seconde au taux combustion maximum
C	Coefficient de transfert calorifique vers l'environnement
C_S	Vitesse de disparition relative du combustible
k_1	Flux de chaleur pour un gradient de température unitaire
h	Largeur de la colonne de fumée
ρ	Densité surfacique homogénéisée de la colonne de fumée
c_p	Chaleur spécifique homogénéisée de la colonne de fumée
T_a	température ambiante
C_a	coefficient de transfert calorifique
A_1	Chaleur dégagée par unité de masse de combustible
C_S	Coefficient de proportionnalité

De la loi des gaz parfait, on déduit :

$$\rho T = \rho_0 T_0$$

où ρ est la densité de fumée, ρ_0 et T_0 les densité et température initiales. Nous prendrons naturellement comme sortie :

$$y = \rho = \frac{\rho_0 T_0}{T} \quad (4)$$

Discrétisation spatiale

Un observateur pourrait être développé pour le modèle précédent. Par souci de simplicité théorique, nous avons ici opté pour une discrétisation spatiale, ce qui permet d'avoir ensuite recours à un observateur non linéaire pour systèmes à paramètres concentrés. La discrétisation spatiale du précédent modèle mène à :

$$\dot{T}_i = -k(T_i - 2T_{i-1} + T_{i-2}) - v(T_i - T_{i-1}) + A \left(S_i e^{-\frac{B}{T_i - T_a}} - C(T_i - T_a) \right) \quad (5)$$

$$\dot{S}_i = -C_s S_i e^{-\frac{B}{T_i - T_a}} \quad (6)$$

où $i = 2, \dots, N$. Nous pouvons alors considérer l'observateur suivant :

$$\hat{\dot{T}}_i = -k(\hat{T}_i - 2\hat{T}_{i-1} + \hat{T}_{i-2}) - v(\hat{T}_i - \hat{T}_{i-1}) + A \left(\hat{S}_i e^{-\frac{B}{\hat{T}_i - T_a}} - C(\hat{T}_i - T_a) \right) - l_{T,i}(\rho - \hat{\rho}) \quad (7)$$

$$\hat{\dot{S}}_i = -C_s \hat{S}_i e^{-\frac{B}{\hat{T}_i - T_a}} - l_{S,i}(\rho - \hat{\rho}) \quad (8)$$

dont la convergence est assurée, moyennant un choix adéquat des gains l_i , par application du Théorème 10, p. 25 de (BESANÇON 2007) ou du Théorème 7.1, p. 215 de (ISIDORI 2017).

Ceci étant, et malgré le fait que le type de modèle ci-dessus soit physiquement relativement réaliste, l'extrême méconnaissance de plusieurs paramètres cruciaux, comme ρ , h ou c_p limite très fortement l'applicabilité de tels modèles. Il est alors plus adéquat de se tourner vers des modèles plus simples, tels ceux utilisés dans les simulateurs les plus populaires comme FAST.

1.2. Modèle de type FAST

Équations du modèle

La modèle suivant est issu de (FU et HADJISOPHOCLEOUS 2000; PEACOCK, RENEKE et FORNEY 2015) et comporte deux couches, L (Lower Layer) la couche basse comportant la flamme et la colonne de fumée, puis H (Higher Layer), la couche haute, comportant un nuage de fumée remplissant l'espace (dans le cas d'espace confiné) :

$$\dot{P} = \frac{\gamma - 1}{V} (\sigma_U + \sigma_L) \quad (9)$$

$$\dot{V}_U = \frac{1}{\gamma P} \left((\gamma - 1)\sigma_U - \frac{\gamma - 1}{V} V_U(\sigma_U + \sigma_L) \right) \quad (10)$$

$$\dot{T}_U = \frac{1}{C_p m_U} \left((\sigma_U - C_p \dot{m}_U T_U) + \frac{\gamma - 1}{V} V_U(\sigma_U + \sigma_L) \right) \quad (11)$$

$$\dot{T}_L = \frac{1}{C_p m_L} \left((\sigma_L - C_p \dot{m}_L T_L) + \frac{\gamma - 1}{V} V_L(\sigma_U + \sigma_L) \right) \quad (12)$$

où les variables sont les suivantes : P est la pression, V_U (resp. V_L) le volume de gaz dans la couche haute (resp. basse), T_U (resp. T_L) la température de gaz en couche haute (resp. basse), m_U et m_L sont les masses de gaz dans les couches haute et basse (pour lesquelles une loi d'évolution temporelle est en général supposé donnée). Les constantes sont les suivantes : σ_U et σ_L sont des termes dits sources (taux de dégagement de chaleur de l'incendie, pertes de conduction vers les parois ou murs et échange de radiations), C_p est la constante des gaz spécifique (constante des gaz parfaits divisée par la masse molaire du mélange gazeux), et γ est le rapport de capacité calorifique.

1.3. Techniques de diagnostic

Techniques fondées sur des modèles

Lorsqu'un modèle fiable du procédé à surveiller est disponible, une méthode de diagnostic prédictif adéquate est d'utiliser un observateur du défaut présumé.

Techniques sans modèle physique du procédé

Lorsque le modèle du procédé est difficile à obtenir ou peu fiable, il est alors préférable d'utiliser des techniques qui utilisent les signaux du ou des défauts, ou résidus $r(t)$. La prédiction repose alors sur une représentation fonctionnelle du signal. Par exemple, supposant que le signal $r(t)$ soit réel analytique, on

obtient la décomposition suivante :

$$r(t+h) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{r^{(i)}(h)}{i!} t^i$$

qui permet de prédire le signal à $t+h$, où $h > 0$. La difficulté est alors d'estimer les dérivées $r^{(i)}(h)$, sachant que le signal mesuré

$$r_m(t) = r(t) + \eta(t)$$

est entaché d'un bruit $\eta(t)$.

Une possibilité est d'utiliser les estimateurs algébriques développés dans (MBOUP, JOIN et FLIESS 2008). Développons un exemple simple afin d'illustrer le schéma mis en oeuvre. Si l'on considère $r(t)$ approximé par son développement de Taylor à l'ordre 1, localement dans le temps (i.e. sur une fenêtre temporelle assez étroite) :

$$r(t) = \rho_0 + \rho_1 t = r(0) + \dot{r}(0)t \quad (13)$$

Par transformation de Laplace (ou de Mikusinski), on obtient :

$$\hat{r}(s) = \frac{\rho_0}{s} + \frac{\rho_1}{s^2} \quad (14)$$

Pour obtenir l'estimée cherchée $\rho_1 = \dot{r}(0)$, il faut d'abord éliminer ρ_0 . Cette dernière peut s'obtenir par dérivation. L'utilisation de la dérivation par rapport à la variable opérationnelle d/ds permet d'éviter d'amplifier le bruit, comme c'est le cas avec la dérivée temporelle d/dt . On multiplie d'abord par s pour isoler a_0 :

$$s\hat{r}(s) = \rho_0 + \frac{\rho_1}{s} \quad (15)$$

Puis par application de d/ds :

$$\hat{r}(s) + s\hat{r}'(s) = -\frac{\rho_1}{s^2}, \quad \text{avec} \quad r'(s) = \frac{dr}{ds} \quad (16)$$

Pour n'avoir que des intégrales de signaux mis en jeu (afin d'atténuer les bruits), l'on multiplie par s^{-2} :

$$\frac{\hat{r}(s)}{s^2} + \frac{\hat{r}'(s)}{s} = -\frac{\rho_1}{s^4} \quad (17)$$

En revenant au domaine temporel (sachant que d/ds correspond à la multiplication par $-t$), on obtient :

$$\frac{a_1}{6} = \frac{\int_{t_0}^t \tau x(\tau) d\tau - \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{\tau} x(\kappa) d\kappa d\tau}{t^3} = \frac{\int_{t_0}^t \tau x(\tau) d\tau - \int_{t_0}^t (t-\tau)x(\tau) d\tau}{t^3} \quad (18)$$

$$= \frac{\int_{t_0}^t (\tau x(\tau) - (t-\tau)x(\tau)) d\tau}{t^3} \quad (19)$$

Ainsi, l'estimée de la dérivée première est donnée par :

$$\dot{r}(0) = a_1 = \frac{6}{t^3} \int_{t_0}^t (\tau x(\tau) - (t-\tau)x(\tau)) d\tau \quad (20)$$

Cet exemple se généralise aisément au cas de dérivées n -ièmes.

2. Description du système de sécurité d'incendie

2.1. Fonctionnement du système

Un SSI (Système de Sécurité Incendie) est composé de deux sous-systèmes principaux (cf. figure 1) : un système de détection incendie (SDI) et un système de mise en sécurité incendie (SMSI). Le système de détection incendie (SDI) est un système constitué d'un ensemble d'équipements à la détection d'incendie comprenant :

- des détecteurs d'incendie (DI) ;
- un équipement de contrôle de signalisation (ECS) ou un tableau de signalisation (TS). ;
- un équipement d'alimentation électrique ;
- des déclencheurs manuels.

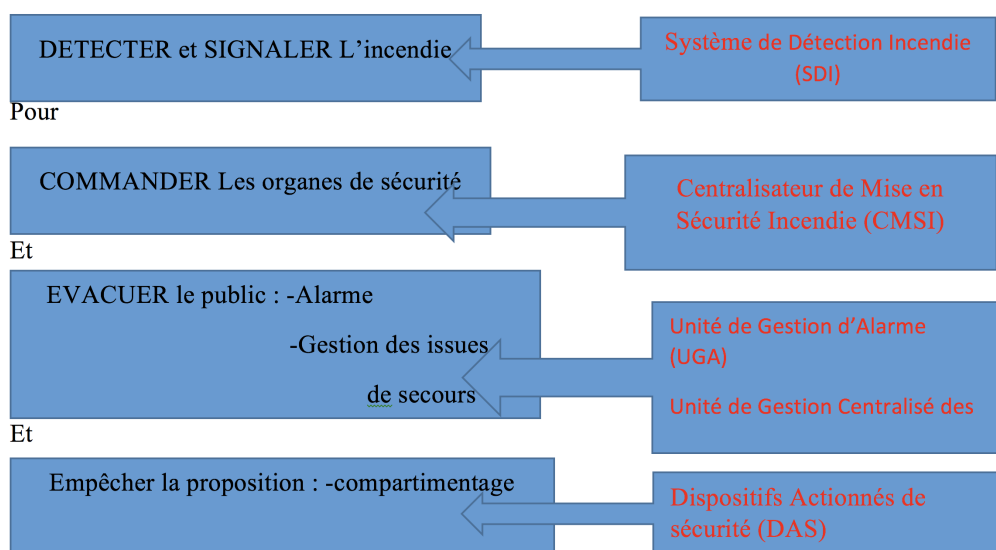


Figure 1.: Synoptique d'un SSI.

2.2. Principe de fonctionnement

Suivant le besoin du client, deux types de technologies sont utilisées pour mettre en œuvre le principe de fonctionnement : les technologies conventionnelle et adressable.

Technologie conventionnelle

La technologie conventionnelle délivre une information de synthèse qui permet de gérer un ensemble de points agencés en zones de détection. Cette technologie est très utilisée dans les installations fixes d'extinction d'incendie.

Technologie adressable

L'évolution technologique a permis d'offrir de nouvelles fonctionnalités sur les systèmes de détection incendie adressable. Elle permet également de gérer toutes les informations d'une installation point par point.

point. Chaque élément possède une adresse et un libellé qui lui est propre.

3. Conception et réalisation du système de détection d'incendie

3.1. Introduction

Dans ce point, il est question de définir les différents composants du système proposé, d'en présenter le fonctionnement ; ensuite, viendront le schéma, le code utilisé et enfin l'image du prototype développé.

3.2. Les composants du système de détection d'incendie

Le Capteur De Gaz MQ-2

Description

Le capteur de gaz MQ2 est un outil pour la détection des fuites de gaz. Il peut détecter l'hydrogène, le GPL, le CH_4 , le CO , l'alcool, la fumée, le propane. Il se présente comme un composant électronique avec une capsule métallique comme illustré en figure 2.



Figure 2.: Capteur MQ-2.

Caractéristiques

Condition de travail standard. Les conditions de travail standard sont décrites en table 3.1.

Symbole	Nom du Paramètre	Conditions Techniques	Remarques
V_c	Tension de circuit	$5V \pm 0.1$	AC OU DC
V_H	Tension de chauffage	$5V \pm 0.1$	AC OU DC
R_L	Résistance de charge	Ajustable	
R_H	Résistance de chauffage	$33\Omega \pm 5\%$	Tre ambiante
P_H	Consommation de chauffage	Moins de 800mW	

Tableau 3.1.: Conditions de travail standard.

Conditions environnementales

Les conditions environnementales sont décrites en table 3.2.

Symbole	Nom du Paramètre	Conditions Techniques	Remarques
Tao	Utilisation de Tem	-20°C-50°C	
Tas	Stockage Tem	-20°C-70°C	

Tableau 3.2.: Conditions environnementales.

Caractéristiques de sensibilité

Les caractéristiques de sensibilité sont décrites en table 3.3.

Symbole	Nom du Paramètre	Conditions Techniques	Remarques
R_s	Résistance à la détection	3K Ω -30K Ω (1000ppm d'isobutane)	Détection de concentration Portée :
A (3Kppm /1Kppm CH ₄)	Concentration Taux de perte	$\leq 0,6$	GPL, propane 200ppm-5Kppm Butane 300ppm-5Kppm Méthane 5Kppm-2Kppm H ₂ 300ppm-5Kppm Alcool 100ppm-2Kppm
Condition de détection standard	Temp : 20°C \pm 2°C V_c : 5V \pm 0,1 Humidité : 65% \pm 5% V_h : 5V \pm 0,1		
Temps de préchauffage	Plus de 24 heures		

Tableau 3.3.: Caractéristiques de sensibilité.

Structure et configuration, circuit de mesure de base

Le circuit de mesure de base se compose des éléments répertoriés en table 3.4.

Pièces	Matériaux
Capteur de gaz	SnO ₂
Électrode	Au
Ligne d'électrode	Pt
Bobine de chauffage	Alliage Ni-Cr
Céramique tubulaire	Al ₂ O ₃
Réseau anti-explosion	Gaze d'acier inoxydable (SUS316 100 mesh)
Bague de serrage	Cuivre plaqué Ni
Base de résine	Bakélite
Tube Pin Cuivre plaqué	Cuivre plaqué Ni

Tableau 3.4.: Structure et configuration, circuit de mesure de base.

Courbe caractéristique de sensibilité

Les courbes caractéristiques de sensibilité du capteur MQ2 sont reproduites en figure 3.

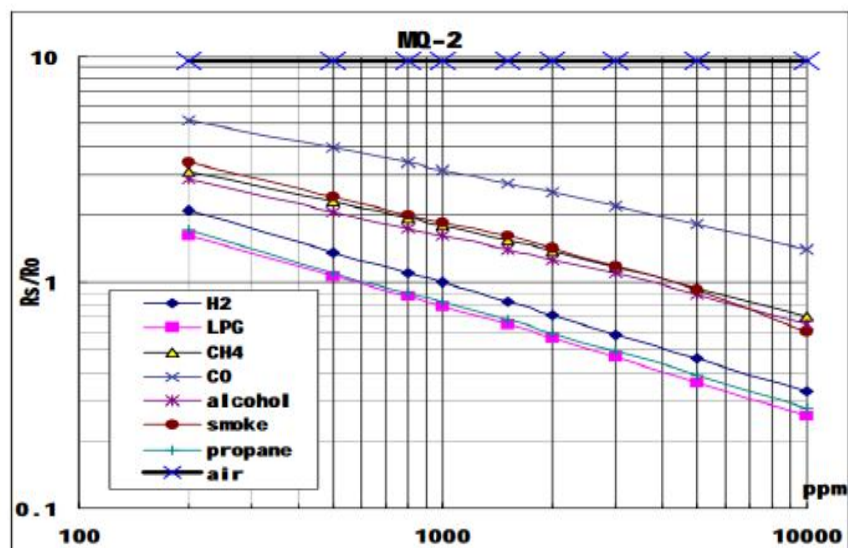


Figure 3.: Caractéristiques de sensibilité typiques du MQ-2 pour plusieurs gaz.

Arduino

Le système Arduino est une plateforme open source embarquée constituée d'une carte fondée sur un microcontrôleur ATmega328 cadencé à 16 MHz. La figure 4 suivante représente une Arduino UNO :

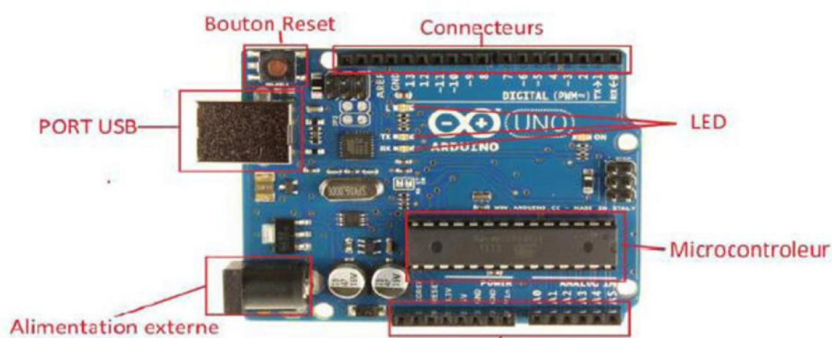


Figure 4.: Arduino Uno.

Alarme sonore

L'alarme (cf. figure 5) ici utilisée est très compacte (moins de 2cm de diamètre), fonctionne sous 5V et produit un son d'environ 60dB continu ou discontinu selon les paramètres prédéfinis dans le code de l'Arduino.



Figure 5.: *Alarme sonore.*

Désignations	Quantités	Marques/Modèles	Usages
Connecteurs	60	Dupont (mâle, femelle)	Relier les composants
Diodes Leds	2		Déterminer la présence et l'absence de fumée
Plaquette d'essai (breadboard)	1	Ever-Muse electronic	Simplifier l'interconnexion entre l'Arduino et les différents composants
Résistances	3		Réduire les courants traversant les diodes et l'alarme
Alimentation convertisseur AC/DC	1		Alimentation du système de détection d'incendie

Tableau 3.5.: Autres composants pour la réalisation du système.

3.3. Les autres composants

Outre les composants cités ci-dessus, pour parvenir à réaliser notre système de sécurité, nous avons eu recours à quelques matériels dont la liste est reprise dans le tableau 3.5.

3.4. Présentation et fonctionnement du système de détection d'incendie

Le système fonctionne avec des capteurs de gaz ou plus précisément capteur MQ-2. Une analyse des risques effectuée en approchant l'édifice à protéger permet d'en identifier tous les points vulnérables, ceux par lesquels un potentiel incendie pourrait démarrer.

Lorsque celui-ci détecte de la fumée dans sa zone de détection, il envoie un signal électrique à la carte Arduino, qui générera le déclenchement d'alarme. La figure 6 expose les éléments constitutifs du système de sécurité. L'Arduino agit comme lien entre le capteur de gaz et la sirène d'alarme.

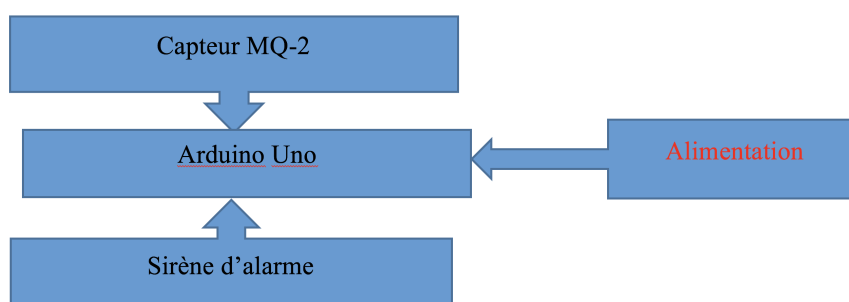


Figure 6.: *Constitution du système de sécurité.*

3.5. Schéma

Le schéma du système de sécurité, réalisé à l'aide du logiciel Fritzing est illustré sur la figure 7 ; on y retrouve les différents éléments énumérés ci-dessus :

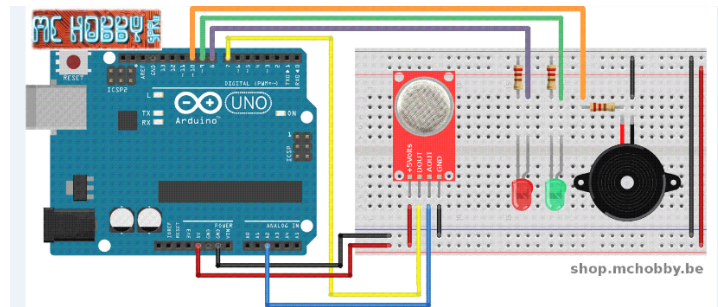


Figure 7.: Schéma de branchement du système de détection de fumée.

3.6. Code du système

Le code proposé ci-dessous concerne le capteur utilisé :

```
int pin_led_rouge = 8;
int pin_led_verte = 9;
int pin_buzzer = 10;
//Definition des broches du senseur
int pin_d = 7;           //Senseur DOUT(digitale)
int pin_a = A2;          //Senseur AOUT(analogique)
int niveau_senseur = 450;

void setup()
{
    //Definir les broches du senseur comme entree
    pinMode(pin_d, INPUT);
    pinMode(pin_a, INPUT);

    //Definir le buzzer et LEDS comme sortie
    pinMode(pin_led_rouge, OUTPUT);
    pinMode(pin_led_verte, OUTPUT);
    pinMode(pin_buzzer, OUTPUT);

    //Initialiser le port serie
    Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
    // Lecture de DOUT du senseur sur l'entree digital
    int valeur_digital = digitalRead(pin_d);

    // Lecture de AOUT du senseur sur l'entree analogique
    int valeur_analogique = analogRead(pin_a);
```

```

// Afficher les donnees sur le moniteur serie
Serial.print("DOut : ");
Serial.print(valeur_digital);
Serial.print("Aout : ");
Serial.print(valeur_analogique);

// Verifier le niveau de gaz/fumee sur le detecteur
if (valeur_analogique > niveau_senseur)
{
    //Passer en mode alarme(led rouge et buzzer)
    digitalWrite(pin_led_rouge,HIGH);
    digitalWrite(pin_led_verte,LOW);
    digitalWrite(pin_buzzer,HIGH);
}
else
{
    // Tout va bien, Laisser la LED verte allumee
    digitalWrite(pin_led_rouge,LOW);
    digitalWrite(pin_led_verte,HIGH);
    digitalWrite(pin_buzzer,LOW);
}
delay(100); //Pause
}

```

3.7. Images du prototype réalisé

Nous présentons à la figure 8 suivante l'image du prototype réalisé :

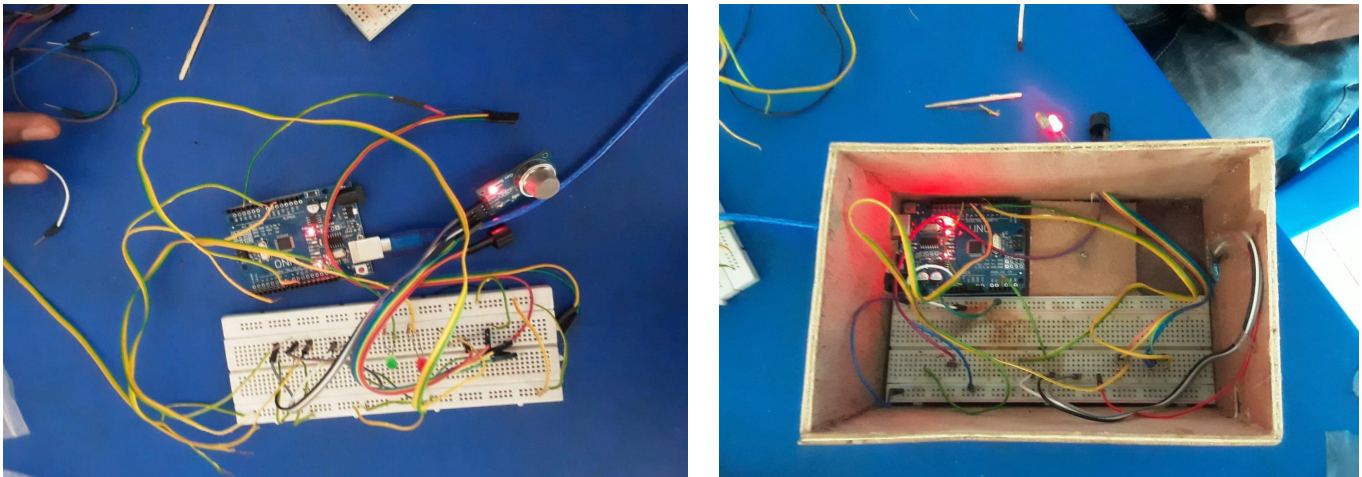


Figure 8.: Image du prototype de détection d'incendie.

Bibliographie

- BESANÇON, Gildas (2007). *Nonlinear Observers and Applications*. Springer Berlin Heidelberg. URL : <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73503-8>.
- FU, Zhuman et George HADJISOPHOCLEOUS (2000). « A two-zone fire growth and smoke movement model for multi-compartment buildings ». In : *Fire Safety Journal* 34.3, p. 257-285. URL : [https://doi.org/10.1016/s0379-7112\(99\)00045-4](https://doi.org/10.1016/s0379-7112(99)00045-4).

-
- ISIDORI, Alberto (2017). *Lectures in Feedback Design for Multivariable Systems*. Springer International Publishing. URL : <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42031-8>.
- MANDEL, Jan et al. (2008). « A wildland fire model with data assimilation ». In : *Mathematics and Computers in Simulation* 79.3, p. 584-606. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2008.03.015>.
- MBOUP, Mamadou, Cédric JOIN et Michel FLIESS (sept. 2008). « Numerical differentiation with annihilators in noisy environment ». In : *Numerical Algorithms* 50.4, p. 439-467. DOI : 10.1007/s11075-008-9236-1. URL : <https://doi.org/10.1007/s11075-008-9236-1>.
- PEACOCK, Richard D., Paul A. RENEKE et Glenn P. FORNEY (2015). *CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 1 : Technical Reference Guide*. Rapp. tech. URL : <https://doi.org/10.6028/nist.tn.1889v1>.