

- En comparant les valeurs mesurées avec
  - les mesures d'un second système d'alarme incendie [38 ; 45],
  - les mesures des capteurs voisins,
  - dans le cas de capteurs à infrarouges, les mesures de deux séries de longueurs d'ondes influencées à des degrés divers par des facteurs de perturbation [38 ; 45].
- Fonctionnement à des températures environnantes allant d'environ - 30°C (hiver) à environ + 100°C (feu naissant).
- Les alarmes de détection incendie par température de l'air doivent enregistrer la température de l'air avec une précision de  $\pm 2^\circ\text{C}$  (Directive suisse de Ventilation [36]).
- Les capteurs réagissant à la pression (câbles spéciaux) doivent être insensibles aux effets de pression/succion produits par l'exploitation du tunnel.
- Les systèmes de détection d'incendie doivent être pourvus d'un équipement permettant de les tester automatiquement et donc de déceler les défauts pouvant les affecter [42].
- Le système de détection d'incendie doit être aussi fiable et facile d'entretien que possible. Il doit être construit selon une base modulaire, afin que les pièces défectueuses puissent être remplacées rapidement et facilement.

### 6.3.3 Méthodes utilisées actuellement

Le tableau 6.3 donne les principes de fonctionnement des détecteurs incendie utilisés actuellement.

#### **Câble fibre de verre**

Dans le cas des détecteurs d'incendie linéaires fibre de verre, des impulsions laser sont conduites le long du câble en fibre de verre (voir figure 6.1). Il existe deux types de détecteurs en fibre de verre :

- Variante 1 : la fibre de verre est placée dans un tube rempli de cire et enveloppée de fibres aramide [42].  
Le tube rempli de cire gonfle lorsqu'il est exposé à une température élevée et les fibres aramides déforment le câble de fibre de verre. Cela provoque la dispersion des impulsions laser par la chaleur.
- Variante 2 : modification dans la fibre de verre par influence directe de la température [41 ; 42 ; 43 ; 44].  
Dans ce système de détection, la lumière laser de brillance modulée est conduite dans une fibre optique de quartz posée au plafond. Les températures élevées altèrent l'interaction entre la lumière laser et la structure cristalline du quartz. La lumière laser est réfléchi partiellement et son spectre de longueur d'onde se modifie. Le signal lumineux réfléchi et à brillance modulée contient des données concernant la température le long du câble ainsi que sur les points où la température a augmenté. Chaque câble comporte deux fils de fibre de verre qui fonctionnent indépendamment l'un de l'autre, si bien que le système de détection est redondant. Un seul système peut surveiller environ 4 km de tunnel.

- Comparing the measurement values with
  - measurement values from a second fire alarm system [38; 45]
  - measurement values from neighbouring sensors
  - in the case of infrared sensor measurements in two wavelength ranges, which are influenced to varying degrees by disturbance factors [38; 45]
- Suitability of surrounding temperatures of approximately  $-30^{\circ}\text{C}$  (winter) to approximately  $+100^{\circ}\text{C}$  (nascent fire)
- Air temperature fire detection alarms must be capable of registering the air temperature within this range to an accuracy of  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  (Swiss Ventilation Guideline [36]).
- Sensors reacting to pressure changes (special cables) must be unaffected by pressure/suction loads from the tunnel operation.
- The fire detection systems must be fitted with automatically operating test equipment that can determine disturbances affecting the plant [42].
- The fire detection system must be as reliable and maintenance-free as possible. The system should be built on a modular basis so that defective parts can be quickly and easily replaced.

### 6.3.3 Currently Used Methods

Table 6.3 includes the functioning principles of fire detectors currently in use.

#### ***Fibreglass-Supported Line***

With fibreglass-supported line fire detectors, laser impulses are conducted through the fibreglass cable (see Figure 6.1). Two types of fibreglass-supported line fire detectors are described below:

- Variant 1: Fibreglass is located on a wax-filled tube and is enveloped by aramide fibres [42].  
The wax-filled tube expands when exposed to elevated temperature and the aramide fibres deform the fibreglass line. This leads to a temperature-related backscattering of laser impulses.
- Variant 2: Changes in the fibreglass through direct temperature influence [41; 42; 43; 44].  
In the case of this fire detection system, brightness-modulated laser light is conducted through a quartz glass optical fibre laid in the tunnel roof. Elevated temperatures alter the interaction between the laser light and the quartz glass crystal structure. The laser light is partially reflected and its wavelength spectrum changes. The reflected and brightness-modulated light signal contains data pertaining to the temperature along the cable as well as points where the temperature has increased. Each cable contains two fibreglass lines that operate independently of each other, so that the detection system can operate on a redundant basis. An approximate 4-km-long tunnel section can be monitored by means of a single system.

La technologie de la fibre de verre peut s'appliquer pour une plage de température de  $-30^{\circ}$  à  $+90^{\circ}\text{C}$  environ. Les avantages de la fibre de verre sont, en particulier :

- une localisation précise, même si plusieurs foyers d'incendie se déclarent,
- une mesure précise des températures le long d'un câble de 4 km environ,
- une insensibilité aux interférences électromagnétiques, aux fluctuations de la pression et de la température de l'air, aux substances agressives et corrosives.

**Tableau 6.3 - Principes de fonctionnement des détecteurs d'incendie**  
[32 ; 33 ; 37 ; 38 ; 39 ; 40 ; 41 ; 42 ; 43 ; 44 ; 45 ; 46].

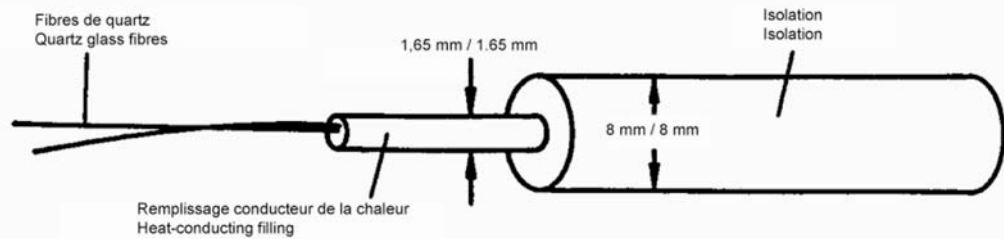
N°	Type de détecteur incendie	Principes de fonctionnement
1	Câble fibre de verre	Variante 1 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• déformation de la fibre de verre par des fils insérés dans la cire,</li> <li>• dispersion des impulsions laser dans la fibre de verre déformée.</li> </ul> Variante 2 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• modification des vibrations dans la grille de cristal de verre par influence directe de la température,</li> <li>• exploitation de la division liée à la température du rayon laser dispersé dans les fibres de quartz en plusieurs plages de longueurs d'onde.</li> </ul>
2	Tubes capteurs remplis de gaz	Augmentation de pression due au feu dans l'élément capteur linéaire (longueur jusqu'à 130 m)
3	Câbles capteurs	Capteurs individuels adressables dans le câble Mesure des températures (valeur, augmentation en fonction du temps)
4	Mesure de visibilité	Variante 1 : mesure de la lumière dispersée par les particules Variante 2 : absorption de la lumière sur une longueur située sous le plafond du tunnel
5	Détection thermique des rayonnements	Rayonnement infrarouge dans la bande de 1 à $1,7\ \mu\text{m}$ , ainsi que pour la longueur d'onde de $4,4\ \mu\text{m}$ seulement (bande $\text{CO}_2$ ) et également vacillement des flammes (1 à 15 Hz)
6	Détection des gaz	Mesures des rayonnements infrarouges du CO ou $\text{CO}_2$ Le $\text{CO}_2$ est plus prévisible car il n'est pas lié à la qualité de la combustion
7	Détection des fumées par vidéo (VSD)	Augmentation rapide du contraste Atténuation des modifications rapides des images dues aux mouvements de véhicules

Fibreglass technology can be applied within a temperature range of approximately – 30°C to +90°C. The advantages of fibreglass include:

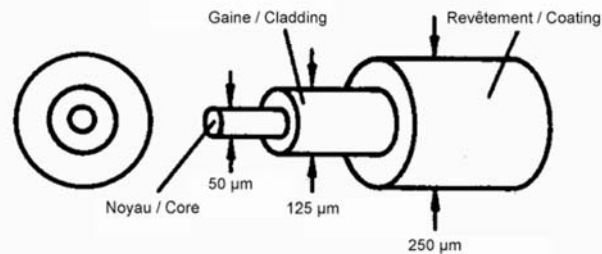
- precise localisation, even in the event of several fire sites,
- precise temperature measurement over a cable length of approximately 4 km,
- insensitive to electromagnetic interference, air pressure and temperature fluctuations, aggressive and corrosive substances.

**Table 6.3 - Functioning principles of fire detectors**  
**[32; 33; 37; 38; 39; 40; 41; 42; 43; 44; 45; 46]**

No.	Type of Fire Detector	Functioning Principles
1	Fibreglass-supported line	Variant 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• fibreglass deformation through threads in the wax body,</li> <li>• backscattering of laser impulses in deformed fibreglass.</li> </ul>
		Variant 2: <ul style="list-style-type: none"> <li>• change in the quartz glass crystal grid vibrations through direct influence of temperature,</li> <li>• exploitation of temperature-related division of the backscattered laser light in the quartz glass fibres into several wavelength ranges.</li> </ul>
2	Gas-filled sensor tubes	Fire-related increase in pressure in line sensor element (length up to 130 m)
3	Sensor cables	Addressable individual sensors in the cable Temperature measurement (height, time-dependent increase)
4	Visibility measurement	Variant 1: scattered light measurements of drawn-in particles Variant 2: light absorption along a radiated section beneath the tunnel ceiling
5	Radiation heat detection	Infrared radiation in 1 µm- and 1.7 µm-band, as well as only 4.4 µm (CO <sub>2</sub> band) and additionally flickering of the flames (1 Hz to 15 Hz)
6	Gas detection	Measures infrared radiation of released CO or CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> type is more predictable because it is not related to degree of combustion process
7	Video smoke detection (VSD)	Rapid increase in contrast Fading out rapid image changes through vehicle movements



a) CÂBLE CAPTEUR / SENSORCABLE



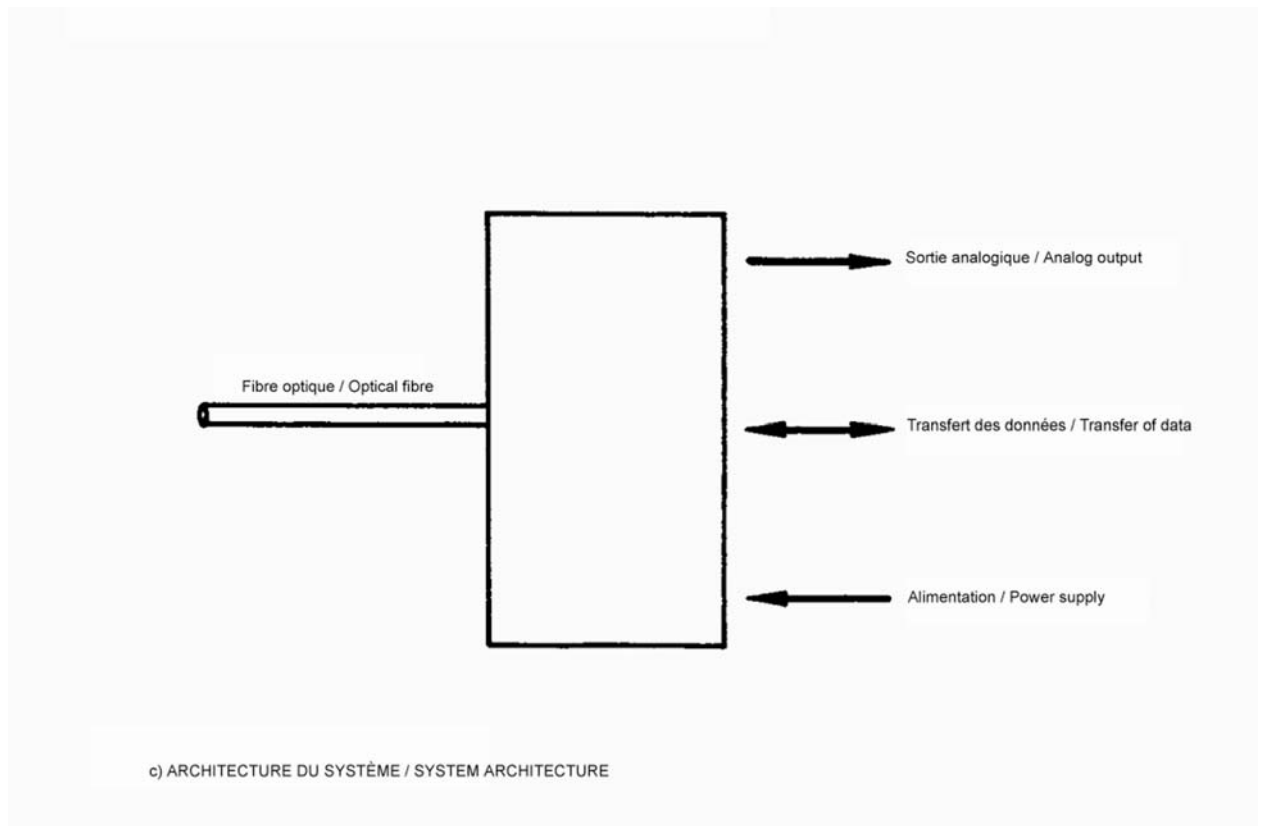
b) COUPE TRANSVERSALE DE LA FIBRE DE QUARTZ / CROSS-SECTION OF THE QUARTZ GLASS FIBRE

Figure 6.1 - Sonde de température linéaire avec fibres optiques [42] / Linear temperature sensor with optical fibres [42]

### ***Tubes capteurs remplis de gaz***

Un tube capteur rempli de gaz est fixé au plafond du tunnel [42] par sections de 130 mètres maximum. Un capteur de pression contrôle la pression dans le tube et déclenche une alarme si la température/pression augmente. Le foyer d'incendie est localisé en fonction de la position du tube capteur dans le tunnel. Aucune mesure supplémentaire de température n'est effectuée. Un moteur test avec pompe de pression produit une surpression définie de façon précise dans le tube capteur à intervalles réguliers. Si la mesure de la pression ne coïncide pas avec la plage désirée, en raison par exemple d'un défaut dans le tube, un message de dysfonctionnement est envoyé.

Le tube capteur n'est pas affecté par l'environnement du tunnel (poussière, gaz humides et agressifs, interférences électromagnétiques).



**Figure 6.1 - Sonde de température linéaire avec fibres optiques [42] / Linear temperature sensor with optical fibres [42]**

### ***Gas-filled Sensor Tubes***

A gas-filled sensor tube is fixed to the ceiling of the tunnel [42] in maximum section lengths of 130 metres. A pressure transducer monitors the pressure in the sensor tube and activates an alarm in the event of elevated temperature/pressure. The fire site is located based on the relative position of the sensor tube section in the tunnel. No additional temperature measurement is conducted. A test motor with a pressure pump produces an exactly defined overpressure in the sensor tube at regular intervals. If the pressure measurement does not fall within the desired range, e.g. owing to a leak or damage to the tube, a malfunction message is displayed.

The sensor tube is unaffected by the environmental conditions in the tunnel (dust, aggressive and moist gases, electromagnetic interferences).

### ***Systèmes par câble capteur***

Les capteurs thermiques [42 ; 44] sont placés selon des intervalles définis dans un câble capteur entièrement fermé. La température en chaque point de mesure est fournie de façon séquentielle au moyen d'un contrôle électronique et la valeur transmise à l'unité d'évaluation. Les valeurs mesurées sont clairement attribuées à chaque capteur thermique sur la longueur du tunnel. Un logiciel de contrôle divise l'ensemble de la section de mesure en différents secteurs pour permettre de définir les différents seuils d'alarme.

Il existe deux types de seuils d'alarme :

#### Valeur absolue

Une alarme est déclenchée lorsque la température absolue est atteinte. Cette valeur absolue est pré-déterminée ou pré-réglée lors de l'installation

#### Valeur différentielle

La valeur de la température relevée en chaque point de mesure est comparée à une valeur de référence. Une alarme est déclenchée lorsque le différentiel de température entre la valeur mesurée et la valeur de référence est atteint ou lorsque l'on enregistre une augmentation de la température de quelques degrés pendant une certaine période (méthode différentielle). Cette méthode permet de prendre en compte les fluctuations de température journalières ou saisonnières.

Le câble sonde permet de mesurer des températures dans une plage comprise entre + 40°C et + 85°C (et pour un laps de temps réduit jusqu'à + 120°C). Les températures sont traitées selon une résolution de 0,1°C.

Le câble est normalement accroché à l'aide de fixations espacées d'un mètre environ. Une section de câble endommagée peut être facilement remplacée et le câble reconnecté avec des systèmes de couplage.

### ***Mesure de visibilité***

Des mesures de visibilité sont effectuées dans les tunnels pour commander les équipements de ventilation. Ces mesures sont basées sur l'un des deux principes suivants [32 ; 39 ; 40 ; 42] :

#### Lumière diffusée

On mesure la lumière diffusée par un échantillon d'air aspiré dans une chambre. Une unité de chauffage placée au point de prélèvement de l'échantillon réduit l'influence de facteurs tels que l'humidité. La lumière diffusée sous un angle donné (par exemple, 30 degrés) est comparée à la lumière directe. On élimine ainsi les fluctuations dans la source lumineuse ainsi que les effets du vieillissement et la dépendance vis-à-vis de la température du système électronique.

#### Extinction

Les émetteurs et les récepteurs de lumière sont installés sous le plafond du tunnel à des intervalles prescrits. On mesure l'extinction de la lumière entre un émetteur et un récepteur.

### ***Sensor Cable Systems***

Temperature sensors [42; 44] are located at defined intervals in a completely closed sensor cable. The temperature at each individual measurement point is obtained sequentially by means of electronic control, and the value is transferred to the evaluation unit. The measured values are clearly allocated to the individual temperature sensors in the longitudinal direction of the tunnel. Control software can divide the entire measurement section into various sectors so that various alarm threshold values can be defined.

There are two types of alarm threshold values:

#### **Absolute value**

An alarm is activated when the absolute temperature is reached. The absolute value is pre-determined and pre-set based on the application.

#### **Differential value**

The temperature value for each measurement point is compared with a reference value. An alarm is activated when the temperature differential between the measured value and the reference value is reached or an increase in temperature amounting to a few degrees is registered within a certain period (differential method). This method allows daily and seasonal temperature fluctuations to be taken into consideration.

With the aid of the sensor cable it is possible to measure a temperature range of between + 40°C and + 85°C (and for a short time up to + 120°C). The temperatures are processed to a resolution of 0.1°C.

The cable is typically assembled using clamps that are spaced approximately one metre apart. If a cable section becomes damaged, it can easily be removed, and the cable can be reconnected with couplings.

### ***Visibility Measurement***

Visibility measurements are conducted in road tunnels to control the ventilation plant equipment. These measurements are based on one of the two following functional principles [32; 39; 40; 42]:

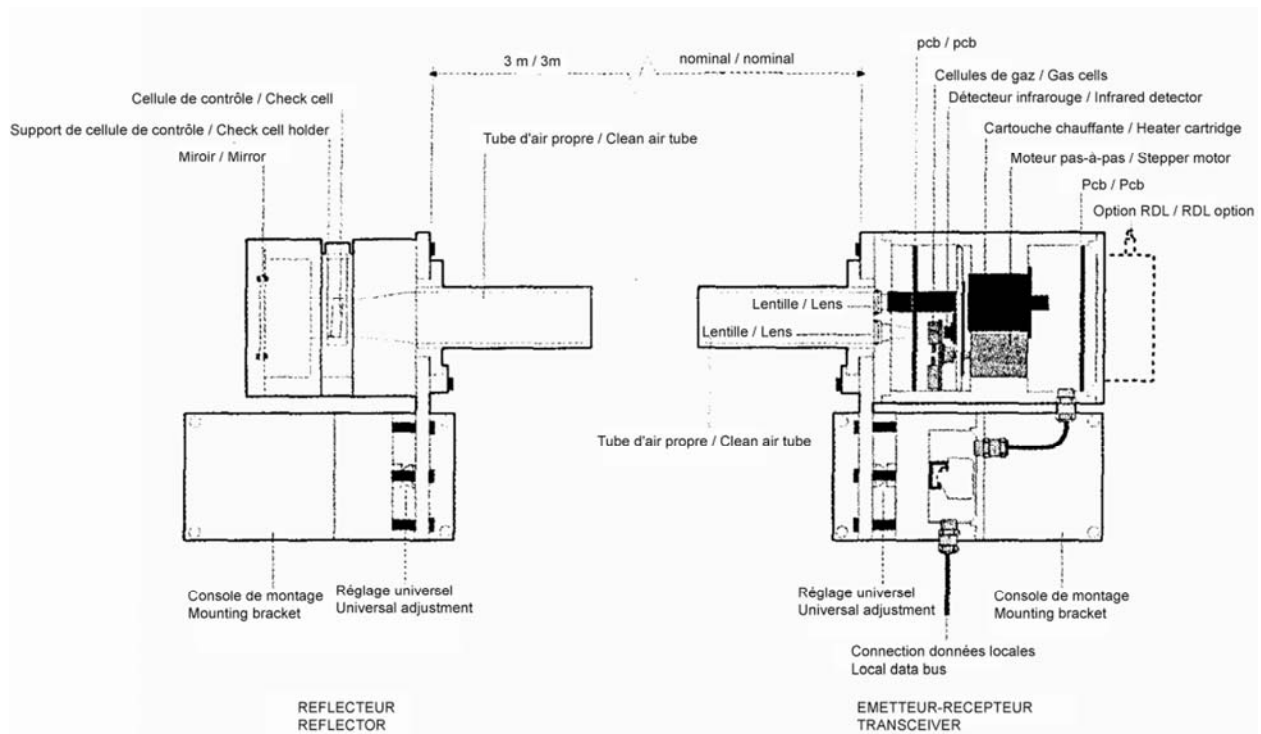
#### **Diffused light**

The diffused light of an air sample drawn into a chamber is measured. A heating unit at the air sample intake reduces the influence of factors such as humidity. In the measurement chamber, the light that is diffused at a given angle (e.g. 30 degrees) is compared with direct continuous light. In this way, fluctuations in the light source as well as ageing effects and temperature dependency of the electronic system are eliminated.

#### **Extinction**

Light transmitters and light receivers are installed beneath the tunnel roof at prescribed intervals. The light extinction along a section between a transmitter and a receiver is measured (Figure 6.2).





**Figure 6.2 - Détecteur de fumée avec émetteur-récepteur et réflecteur distincts [40] / Smoke detector with distinct transceiver and reflector mountings [40]**

Ces unités peuvent être utilisées pour l'identification précoce d'un incendie. L'alarme est déclenchée une fois que la valeur limite pré-déterminée est atteinte.

### **Détection par rayonnement thermique**

Le rayonnement infrarouge (continuum) émanant d'un incendie est utilisé pour identifier cet incendie. C'est principalement au Japon que l'on a recours à des systèmes de cette sorte [38 ; 45].

Cette technologie reconnaît la distribution spectrale de la lumière infrarouge émise par les flammes, qui est différente de celle produite par les diverses sources de lumière artificielle ou naturelle. La lumière infrarouge est analysée dans le détecteur selon deux séries de longueur d'onde : infrarouges d'ondes courtes (entre 0,9 et 1,1  $\mu\text{m}$  approximativement) et infrarouges d'ondes longues (entre 1,6 et 1,8  $\mu\text{m}$  approximativement). Dans le cas d'un incendie de véhicule ou d'essence, l'intensité lumineuse est plus grande pour les infrarouges d'ondes longues que pour ceux d'ondes courtes. Le détecteur vérifie en outre la présence du vacillement caractéristique d'une flamme dans une plage de 1 à 15 Hz. Si les deux conditions sont remplies, l'alarme est déclenchée (voir figure 6.2).

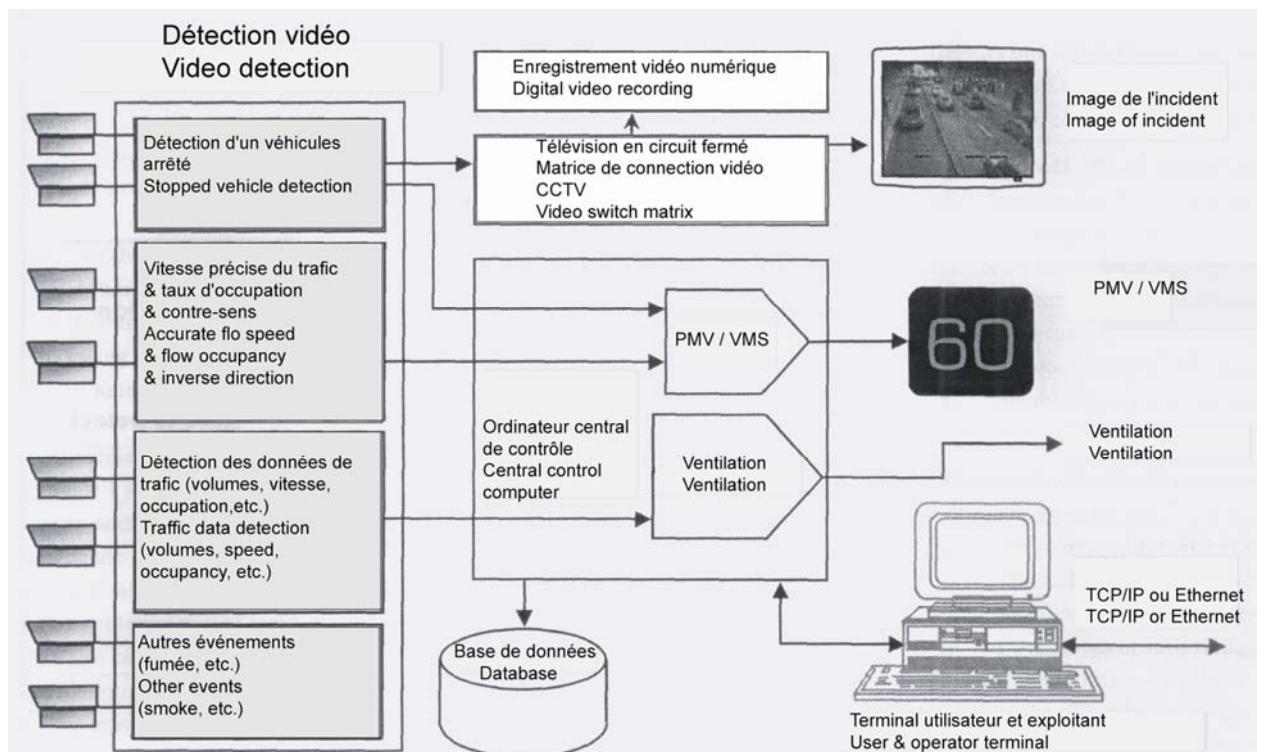


Figure 6.3 - Système de détection d'incidents basé sur la vidéo [47] / Video-based incident detection system [47]

These units can be utilized for early identification of fire. An alarm is triggered once the pre-set limit value is attained.

### ***Radiation Heat Detection***

The infrared radiation (continuum) emanating from a fire is used to identify the fire. Systems of this kind are mainly in use in Japan [38; 45].

This technology recognizes the different spectral distribution of the infrared light emitted by flames versus that produced by various artificial and natural light sources. In the detector, the infrared light is analysed in two wavelength ranges: short wave infrared light (between approximately 0.9 and 1.1  $\mu\text{m}$ ) and long wave infrared light (between approximately 1.6 and 1.8  $\mu\text{m}$ ). In the event of a vehicle or petrol fire, the light intensity within the long wave infrared range is larger than in the short wave infrared range. In addition, the detector checks for the presence of the characteristic flickering of a burning flame in the 1 to 15 Hz range. If both conditions are fulfilled, an alarm is activated (figure 6.2).

Des filtres optiques sont appliqués pour éliminer les plages spectrales non désirées. Les résultats japonais montre qu'un petit incendie de véhicule peut être identifié jusqu'à une distance de 40 m du détecteur infrarouge au moyen de ce principe.

Les unités de la dernière génération sont capables de compenser la pollution de la fenêtre de prise de lumière jusqu'à une absorption de 75 %. Les gênes provoquées par la lumière naturelle, la lumière fluorescente ainsi que la lumière produite par les lampes à vapeur de sodium jusqu'à 10 000 lux dans chaque cas et la lumière provenant des phares jusqu'à 5 000 lux n'interfèrent pas sur le système de détection infrarouge. En outre, les sources de lumière rotatives dans le spectre visible (du rouge au violet) n'ont pas d'effet sur la capacité à détecter un incendie [38 ; 45].

### ***Détection des gaz***

Ces systèmes de détection incendie mesurent le CO ou le CO<sub>2</sub> dégagés pendant un incendie [38 ; 40 ; 42]. La technologie utilise le fait que les gaz produits au cours d'un incendie, par exemple CO<sub>2</sub> et CO, s'accumulent en quantités sensibles en de courtes périodes. Des unités de mesure du CO sont déjà installées dans un tunnel pourvu d'une ventilation mécanique pour réguler la ventilation en exploitation normale [32 ; 42]. Cependant le volume de CO produit par un incendie de véhicule est extrêmement variable car il n'est produit en de grandes quantités que par une combustion incomplète. La production de CO<sub>2</sub> est beaucoup plus prévisible, quel que soit le type d'incendie.

### ***Détection de fumée par vidéo (VSD)***

La détection de fumée par vidéo (VSD) est l'un des outils les plus récents en matière de sécurité dans les tunnels. En combinaison avec le réseau de vidéosurveillance et le système de détection automatique des incidents (DAI), le VSD peut, de façon automatique :

- détecter tout incident de trafic : des incidents de trafic qui semblent insignifiants peuvent souvent dégénérer en événements ou accidents beaucoup plus graves ;
- détecter un objet détaché ou tombé d'un véhicule ;
- détecter et suivre un départ d'incendie (par exemple, émission de fumée) ;
- dans certains cas, compter le nombre et la nature des véhicules présents dans chaque section du tunnel. L'absence de cette information a constitué un handicap pour les exploitants des tunnels du Mont-Blanc, du Tauern et du St-Gothard.

Optical filters are applied to eliminate undesired spectral ranges. Japanese findings show that a small car fire can be identified at a distance of up to 40 metres from the infrared detector by means of this principle.

Newer generation units are able to compensate for pollution of the light intake window up to a light absorption of 75%. Disturbances caused by natural light, fluorescent light and light produced by sodium vapour lamps up to 10,000 lux in each case and light produced by headlamps up to 5,000 lux do not interfere with the infrared detection system. Furthermore, rotating sources of light in the visible spectrum (red to violet) do not influence the ability to detect fire. [38; 45]

### ***Gas Detection***

These fire detection systems measure the CO or CO<sub>2</sub> released during a fire [38; 40; 42]. The technology utilizes the fact that gases produced during a fire, such as CO<sub>2</sub> and CO, accumulate in sizeable quantities in short periods of time. CO measurement units are already installed in a mechanically ventilated tunnel to regulate the ventilation system during normal operations [32; 42]. However, the amount of CO produced by a vehicle fire is extremely variable because large amounts are only produced as a result of incomplete combustion. The production of CO<sub>2</sub> is far more predictable during any type of fire.

### ***Video Smoke Detection (VSD)***

Video Smoke Detection (VSD) is one of the newer tools for providing tunnel safety. In conjunction with the CCTV network and Automatic Incident Detection system, VSD can automatically:

- detect any traffic incident: seemingly insignificant traffic incidents can often degenerate into much more serious events or accidents,
- detect an object separated or dropped from a vehicle,
- detect and track the start of a fire (i.e., smoke emission),
- in some cases count the number and nature of vehicles present in each section of tunnel. The lack of this information was a handicap for the operators of Mont Blanc, Tauern and St. Gotthard Tunnels.

La VSD permet d'évaluer les images vidéo prises par les caméras implantées dans le tunnel (voir Fig. 6.3) [37 ; 44 ; 46]. Une grille à mailles étroites est superposée à l'image vidéo et chaque section de la grille est utilisée comme champ capteur. Certains champs de l'image principale ont une priorité moindre. Les champs qui enregistrent les mouvements de véhicules et ceux qui ne montrent aucun changement ne sont pas inclus dans l'évaluation. L'évaluation des images se concentre sur les champs qui n'enregistrent qu'un léger mouvement de véhicule et donnent des changements extrêmement nets en comparaison au fur et à mesure que l'image évolue.

Le contraste de l'image est modifié de façon significative en cas de présence de fumée. Dans ce cas, une alarme préalable est déclenchée et l'image transférée sur le moniteur de surveillance. Le programme d'évaluation vidéo se concentre alors sur la recherche des changements en contraste dans les champs susceptibles de contenir un incendie et/ou de la fumée (par exemple, au niveau du plafond). Si la présence d'un incendie est confirmée, l'alarme principale est déclenchée.

La VSD est avantageuse en ce sens qu'elle peut détecter le développement précoce des fumées avant qu'il se produise un changement significatif de température. Ce système a aussi la capacité d'identifier les sources de ralentissement du trafic, par exemple les véhicules en panne [32 ; 33 ; 37 ; 46]. Il n'existe actuellement ni normes ni réglementations d'essai pour les systèmes d'identification précoce par vidéo. En Suisse, plusieurs tunnels sont pourvus d'unités d'analyse digitale des images vidéo, qui sont en cours d'essais pour détecter la fumée. En France, une détection automatique d'incident par vidéo est installée dans les nouveaux tunnels, ainsi que dans les tunnels rénovés bénéficiant d'un centre de commande et de surveillance avec une équipe permanente ; mais ce système n'est pas toujours accompagné d'une VSD. La VSD est utilisée dans la plupart des tunnels australiens.

#### 6.3.4 Résultats d'essais

Les essais de détection effectués aux Pays-Bas avec un câble capteur [48] ont conduit aux conclusions suivantes :

- en combinaison avec une vitesse du courant d'air inférieure à 1 m/s, un incendie se développant lentement sera détecté en 1 à 3 minutes s'il est situé juste en dessous du câble de détection ;
- si un incendie à développement lent n'est pas situé juste en dessous du câble de détection, ou si la vitesse du courant d'air est supérieure à 3 m/s, il faut compter un délai d'au moins 5 minutes avant que l'alarme soit déclenchée ;
- les incendies se développant rapidement seront toujours détectés dans les 3 minutes, quelle que soit la vitesse du courant d'air ;

VSD allows video images captured by cameras installed in the tunnel to be evaluated (see Figure 6.3) [37; 44; 46]. A narrow-mesh grid is laid over the video image, and every grid section serves as a sensor field. Some fields in the overall image have a lower priority than others. Fields that register vehicle movement and fields that display no changes are not included in the assessment. Image evaluation concentrates on those fields that register only slight vehicle movement and produce extremely pronounced changes in contrast as the image progresses.

The image contrast changes significantly when smoke is present. When this occurs, a preliminary alarm is triggered, and the picture is switched onto the supervising monitor. The video evaluation programme then concentrates on tracing changes in contrast in those fields most likely to contain fire and/or smoke (e.g. at the ceiling level). If the presence of fire is confirmed, the main alarm is initiated.

VSD is advantageous in that it can detect the early development of fumes and smoke before any significant temperature change takes place. This system is also capable of identifying sources of traffic delays, such as broken down vehicles [32; 33; 37; 46]. To date, there are no standards nor test regulations for video early identification systems. Several tunnels in Switzerland have digital video image analysis units that are being tested to detect smoke. In France, video-based automatic incident detection is installed in new tunnels, and in renovated tunnels that have a permanent supervisory control room and permanent staff; however it is not always complemented with VSD. VSD is used in most Australian tunnels.

#### 6.3.4 Test Results

From the fire detection tests conducted in the Netherlands with sensor cable [48], the following conclusions can be made:

- In combination with an airflow speed less than 1 m/s, a slowly developing fire will be detected within 1-3 minutes if it is located right beneath the detection cable.
- If a slowly developing fire is not located right beneath the detection cable, or if the airflow speed is higher than 3 m/s, a time delay of at least 5 minutes can be expected before an alarm is generated.
- Quickly developing fires will almost always be detected within 3 minutes, regardless of the airflow speed.