

Caractérisation des phénomènes dangereux en infrastructures de transport en souterrain

Benjamin TRUCHOT¹, Frédéric WAYMEL², Floriane QUEZEL-AMBRUNAZ²

¹INERIS, Parc Technologique ALATA, 60 550 Verneuil en Halatte

²EGIS Tunnels, Les Pleiades n°35, Park Nord, 74373 Pringy Cédex

benjamin.truchot@ineris.fr, frederic.waymel@egis.fr

Résumé – Dans le contexte actuel, la menace intentionnelle prend une dimension de plus en plus importante dans le dimensionnement des moyens de prévention, de protection et de prévision des infrastructures critiques. Parmi ces infrastructures, le projet EGSISTES concerne les transports souterrains et regroupe ainsi trois typologies d’infrastructures : tunnels routiers, tunnels ferroviaires et transport en commun, de type métro. L’objectif du projet EGSISTES est d’améliorer la compréhension des phénomènes physiques liés aux différentes menaces. Ainsi, la première étape de ce projet, décrite dans la première partie de cet article, consiste à déterminer les phénomènes dangereux pouvant être engendrés par la menace, qu’elle soit accidentelle ou intentionnelle. Cette partie a notamment permis de conclure à l’impossibilité de définir des scénarii de menace intentionnelle de façon exhaustive mais, en revanche, qu’il était possible de les classer par typologie en fonction des phénomènes dangereux qu’ils occasionnent. L’analyse qui a été retenue in fine consiste à recouper les différents types d’infrastructures de transport souterraines avec ces typologies de phénomènes dangereux. La seconde partie du projet consiste à étudier les phénomènes physiques associés à ces phénomènes dangereux. Dans la deuxième partie de l’article, les contraintes expérimentales ayant permis le choix d’un moyen d’essai sont présentés. Enfin, la conclusion discute l’état d’avancement du projet.

Abstract – In the present context, terrorism becomes more and more crucial for prevention, provisions and protection system in critical building. Considering these buildings, the EGSISTES project is concerning in three kinds of construction : road tunnels, rail tunnels and crowd transport system such as metro. The main objective of this project is to improve the understanding of physical phenomena linked with menace, accidental or terrorism. So, the first step of the project, detailed in the first part of this article, consists in determining physical phenomena than can be generated in case of accident or terrorism attack. One of the main conclusion of this first part is that it is impossible to define an exhaustive list of precise scenarios. It is however possible to distinguish several family depending on generated dangerous phenomena. The analysis finally considered consists in coupling the different underground infrastructure families with the different typology of physical phenomena. The second part of the project consists in improving knowledge on physical phenomena linked with dangerous phenomena. In the second part of this article, experimental constrains that enables to choose experimental procedure are given. Finally, the conclusion discuss the project advancement.

Notations utilisées

| Symbole | Signification | Unités |
|---------|--|-------------------|
| d | Dimension linéaire caractéristique des phénomènes physiques – Diamètre hydraulique | m |
| Fr | Nombre de Froude | - |
| g | Accélération de la gravité | m/s ² |
| U | Vitesse de l’écoulement | m/s |
| Re | Nombre de Reynolds | - |
| ν | Viscosité cinématique | m ² /s |

1. Introduction

1.1 Contexte

Le projet EGSISTES (Evaluation Globale de la Sécurité Intrinsèque aux Systèmes de Transports En Souterrain) a pour objectif principal d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans les scénarii de menace intentionnelle ou accidentelle. Cela permettra de développer des méthodes et des modèles physiques permettant d'évaluer le niveau de risque global dans les infrastructures de transport souterraines. Dans ce cadre, plusieurs thématiques doivent être abordées. La première consiste à déterminer les phénomènes dangereux représentatifs de scénarii de menaces. Ensuite, ces différents phénomènes doivent être étudiés expérimentalement afin de comprendre la physique et permettre ainsi le développement de modèles simples et la validation de modèles numériques complexes. C'est au travers de cette dernière étape que réside l'intérêt principal du projet. En effet, la mise en œuvre de ces modèles doit permettre la définition des procédures d'intervention d'urgence et de gestion de crise. Cela permettra aussi, au travers de la modélisation, de conclure à l'adéquation entre les mesures de sécurité existantes et la menace.

1.2 Contenu

Des trois étapes énoncées au paragraphe précédent, seules deux sont traitées dans cet article, principalement en ce qui concerne les tunnels routiers et ferroviaires. En effet, la troisième étape ne peut pas démarrer avant le développement des modèles. On notera cependant que les premières réflexions ont permis d'orienter les modélisations qui seront réalisées. Cet article a pour objectif, en premier lieu, de discuter les caractéristiques de la menace, accidentelle ou intentionnelle, dans le contexte actuel. En second lieu, seront présentés les moyens d'essais disponibles et pouvant être utilisés de façon optimale au travers du projet EGSISTES pour l'étude des phénomènes de stratification que l'on peut notamment rencontrer en cas d'incendie mais également en cas de rejet accidentel ou intentionnel de gaz légers ou de gaz denses (stratification basse). Une analyse des possibilités et de l'adéquation de ces moyens d'essai aux objectifs du projet est présentée en ce sens.

2. Identification de la menace

Deux types de menaces peuvent impacter les infrastructures de transport en souterrain :

- La menace accidentelle ;
- La menace intentionnelle.

On s'intéresse aux deux typologies dans le cadre de ce projet. On notera que si la menace accidentelle (notamment

les cas d'incendie) a été largement traitée par le passé, ce n'est pas le cas de la menace intentionnelle.

2.1 Menace accidentelle

Comme spécifié préalablement, l'identification de la menace accidentelle a fait l'objet de nombreuses études. On citera par exemple les guides du CETU relatif à l'élaboration des Etudes Spécifiques de Dangers (ESD) [1] et [2] ou encore le développement d'une méthodologie d'analyse quantitative pour les tunnels ferroviaires [3]. Les scénarii qu'il convient d'étudier pour le dimensionnement des systèmes de sécurité sont détaillés dans ces documents en fonction du type de tunnel. Ainsi, dans un tunnel routier autorisé aux Poids-Lourds (PL) avec Transport de Matières Dangereuses (TMD), les accidents dimensionnant considérés sont l'incendie d'un PL et l'incendie d'un PL avec TMD de type citerne de 20 tonnes de carburant. D'autres matières dangereuses peuvent être prises en compte si l'évaluation des risques le met en évidence, on pourra par exemple traiter la fuite sur un camion de transport de matière toxique bien que les méthodologies d'études soient moins bien maîtrisées que pour le cas des incendies. Un point important concernant le risque accidentel est que l'on ne cherche pas à analyser systématiquement la pire des configurations : on recherche avant tout l'analyse (notamment au travers de modélisations) de scénarii instructifs permettant de comprendre l'articulation entre les équipements de sécurité, l'évacuation des usagers et l'intervention des secours. Les conséquences de certains scénarii, dont l'intensité et la cinétique sont particulièrement élevées ne sont pas étudiés, on s'attache uniquement à décrire les moyens de prévention pour ces scénarii. On peut citer par exemple le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) d'une citerne de GPL dont les effets seraient catastrophiques et qui n'est pas traité dans une ESD pour le dimensionnement des équipements de sécurité de l'ouvrage. En effet, dans un tel cas, ces équipements seraient inutiles ou presque. On mentionnera cependant que la prévention d'un tel accident doit être étudiée. L'étude de scénarii standardisés permet de comparer les niveaux de risques d'ouvrages entre eux et d'évaluer la pertinence des mesures (prévention, protection et prévision) mises en place.

2.2 Menace intentionnelle

A l'inverse de la menace accidentelle, aucun scénario n'est défini pour traiter la menace intentionnelle. On mentionne de plus qu'il est extrêmement délicat de retenir des scénarii précis pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, il est délicat de définir les éléments qui permettent de décrire un scénario comme réaliste étant donné les processus de décision et de mise en œuvre. De plus, si ces éléments

réalistes étaient connus, les divulguer entraînerait une classification des documents.

Ainsi, la démarche retenue pour la définition de la menace intentionnelle est la suivante :

- Transposer les scénarii de menace accidentelle quand cela est possible ;
- Déterminer des familles de phénomènes dangereux susceptibles d'être mis en jeux lorsque la transposition est impossible.

2.2.1 Transposition de la menace accidentelle à l'intentionnelle

Dans les infrastructures de transport, et plus particulièrement celles accueillant du TMD, les produits qu'il est envisageable d'utiliser pour une action terroriste sont présents en fonctionnement normal du tunnel. C'est le cas de certains tunnels routiers et ferroviaires.

Ainsi, il « suffit » de libérer la substance dangereuse. Dans le cas d'un incendie ou d'une explosion, les effets seraient probablement identiques. En effet, la quantité totale de combustible est dictée par la quantité transportée par les véhicules. A l'inverse, dans le cas d'une dispersion de toxiques, pour un véhicule transportant par exemple de l'ammoniac ou de l'acroléine, l'événement initiateur peut conditionner les effets. Dans le cas d'une fuite accidentelle, la brèche peut être due à la corrosion ou faire suite à un accident. Dans le contexte de la menace intentionnelle, de nombreux moyens peuvent être utilisés pour libérer la substance dangereuse, une charge explosive par exemple, les tailles de brèches peuvent alors être beaucoup plus importantes, le débit de fuite serait par conséquent également plus élevé. Un point important qu'il convient de mentionner est la différence « d'objectifs » entre l'accidentel et l'intentionnel. Comme précisé précédemment, dans l'étude des scénarii de menace accidentelle, on ne recherche pas le scénario provoquant les effets maximaux mais ceux permettant de dimensionner les équipements de sécurité et de tirer des enseignements sur les dispositions techniques et organisationnelles mises en œuvre pour limiter les conséquences des incidents sur les usagers. Dans le contexte de la menace intentionnelle, l'effet maximal sera recherché par les groupes d'action afin de donner une ampleur plus importante à leurs actes.

De même, certains éléments concernant le déroulement des événements (typologie de la situation accidentogène et de l'évènement déclenchant, moyens de détection, période...) diffèrent.

Ainsi, pour les infrastructures de transport, et plus particulièrement celles accueillant du TMD, il est envisageable de transposer les scénarii utilisés pour caractériser la menace accidentelle en prenant cependant garde à la différence « d'objectifs » et d'hypothèses (débits de fuite, puissances d'incendie, chronologie de l'évènement).

2.2.2 Cas des infrastructures sans TMD

On ne considère pas ici les infrastructures n'accueillant pas normalement de TMD mais dans lesquelles il est possible d'introduire un TMD clandestin ou des substances non désignées comme telles mais pouvant induire des événements aux conséquences comparables. En effet, ces cas seraient à rapprocher de ceux des cas traités dans le paragraphe précédent.

Dans les infrastructures n'accueillant pas de TMD (ou assimilés), le contexte est différent. En effet, la substance dangereuse devra être apportée de l'extérieur. Dans ce contexte, la typologie et les quantités de produits susceptibles d'être mises en œuvre sont imprédictibles, trop de paramètres devant être pris en compte.

Les infrastructures de transport en souterrain, de type métro et RER sont concernées par ce cas. Pour ces infrastructures, une analyse a été menée en collaboration avec le Service de Défense et de Sécurité (SDS) du Ministère de l'Ecologie du Développement et de l'Aménagement Durable (MEDAD) afin de cibler des « configurations intéressantes ».

On retient pour l'analyse :

2 types d'infrastructures :

- Les tunnels routiers et ferroviaires accueillant du fret (susceptibles d'accueillir des MD, ou assimilé) ;
- Les réseaux réservés au transport de personnes, principalement les réseaux urbains souterrains de transport guidé pour lesquels 2 typologies d'infrastructure ont été définies :
 - Une géométrie tubulaire : station simple et réseau de galeries.
 - Une géométrie complexe : salle d'échange d'une station importante.

4 types de phénomènes :

- L'incendie ;
- La dispersion de gaz légers ;
- La dispersion de gaz denses ;
- L'explosion.

2 objectifs devront être regardés lors des modélisations de ces phénomènes :

- La gestion de l'urgence ;
- La gestion de crise avec la première intervention.

Comme spécifié précédemment, la définition de scénarii précis étant impossible, ces éléments permettent de déterminer les cas d'étude.

2.3 Conclusions

Deux familles d'infrastructures ont été identifiées au cours de ce que l'on pourrait nommer l'analyse de risques :

1. Les infrastructures susceptibles d'être empruntées par des véhicules TMD (ou assimilés) ;
2. Les infrastructures dédiées au transport de personnes ne pouvant pas être empruntées par des véhicules TMD (ou assimilés).

Dans le premier cas, les scénarii de menace intentionnelle peuvent être transposés, dans une certaine mesure, à la menace accidentelle.

Dans le cas des infrastructures sans TMD, cette transposition est impossible. Il convient alors, comme décrit dans le paragraphe précédent, de distinguer quatre typologies de phénomènes physiques afin de permettre la caractérisation la menace :

- ⇒ Explosion ;
- ⇒ Dispersion de gaz légers ;
- ⇒ Dispersion de gaz denses ;
- ⇒ Incendie.

Ces quatre phénomènes seront étudiés expérimentalement dans le cadre du projet EGSISTES afin de développer de modèles physiques simples pouvant être intégrés dans des codes de calcul.

Par ailleurs, les géométries identifiées sont une géométrie tubulaire et une station d'échange. La première catégorie de géométrie permet de représenter la plupart des stations sans correspondance des lignes d'un système de transport de voyageurs (type métro). La seconde est représentative des salles d'échanges des stations, et plus particulièrement des cas les plus complexes comme peuvent l'être les salles d'échange des grandes stations. Par ailleurs, les géométries tubulaires, sont également représentatives des tunnels routiers ou ferroviaires, les deux autres familles d'infrastructures entrant dans le champ d'investigation du projet EGSISTES.

Les géométries tubulaires pourront être modélisées soit par une approche de type 1D à l'aide d'un outil tel que New-Vendis, soit à l'aide d'un outil 3D de type FDS, Phoenix ou encore Fluidyn-Ventunnel. Les géométries complexes représentatives de salles d'échange, ne pourront être modélisées qu'à l'aide d'outils de modélisation 3D.

3. Outils expérimentaux

Au vu du chapitre précédent et comme pressenti, les phénomènes physiques auxquels il convient de s'intéresser sont :

- L'incendie ;
- La dispersion de gaz légers ;
- La dispersion de gaz denses ;
- L'explosion.

Ces quatre types de phénomènes dangereux seront étudiés dans le cadre d'EGSISTES. Dans cet article, seuls les aspects incendie et dispersion de gaz sont évoqués dans le détail car ils constituent les principaux phénomènes dangereux caractérisant la menace liée aux infrastructures de type tunnels routiers et tunnels ferroviaires.

Les essais pouvant très difficilement être réalisés sur des géométries réelles, il convient de trouver des installations permettant de s'approcher au mieux des infrastructures réelles. Deux types d'installations sont disponibles à l'INERIS pour étudier les phénomènes physiques :

- Une maquette froide à l'échelle 1/20^{ème} ;
- Une galerie incendie à l'échelle 1/3.

Une étude de faisabilité a été réalisée afin de déterminer le moyen d'essai s'adaptant au mieux au cadre du projet et aux phénomènes qu'il est nécessaire d'étudier.

3.1 Description de la maquette froide

L'INERIS dispose d'une maquette permettant de réaliser des essais en tunnel à l'échelle 1/20^{ème}. Dans cette maquette, l'incendie est représenté par une injection d'hélium, gaz léger permettant d'obtenir les effets de flottabilité, représentatif du comportement des fumées chaudes d'un incendie. La Figure 1 schématise le principe de fonctionnement de la maquette froide.

Une telle installation peut être utilisée pour déterminer les vitesses critiques en fonction de la puissance de l'incendie [4] ou bien encore pour déterminer l'influence de la ventilation sur l'incendie [5]. Dans ces deux cas, il convient avant tout de bien reproduire les effets de flottabilité, effets représentés par le nombre de Froude.

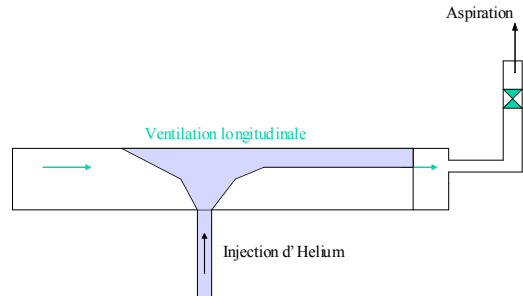


Figure 1 : Schéma de principe de la maquette froide de l'INERIS.

3.2 Description de la galerie incendie

L'INERIS dispose également d'une galerie d'essai incendie d'une longueur d'environ 50 m et de 10 m² de section. Cette galerie peut être utilisée pour réaliser des essais de type tunnel à l'échelle environ 1/3. Cette galerie est équipée d'un système de ventilation permettant l'évacuation et le traitement des fumées.

La section de la galerie peut être séparée en deux parties afin d'utiliser une ventilation longitudinale ou une ventilation transversale. Plusieurs trappes de désenfumage peuvent alors être utilisées.

La Figure 2 montre la section de la galerie avec la gaine de désenfumage.

Cette configuration peut être utilisée tant pour les essais de dispersion de gaz légers que pour la dispersion de gaz denses. En effet, un rejet de gaz dense neutre est envisageable dans la galerie incendie.

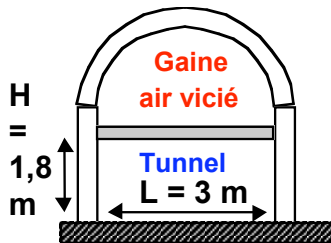


Figure 2 : Section de la galerie incendie.

Les premières simulations réalisées ont permis de déterminer les conditions expérimentales pour le cas de l'incendie. Le résultat de cette simulation est présenté sur la Figure 3, ces résultats ont été obtenus avec le code FDS (Fire Dynamics Simulator) développé par le NIST (National Institute of Standard Technology).

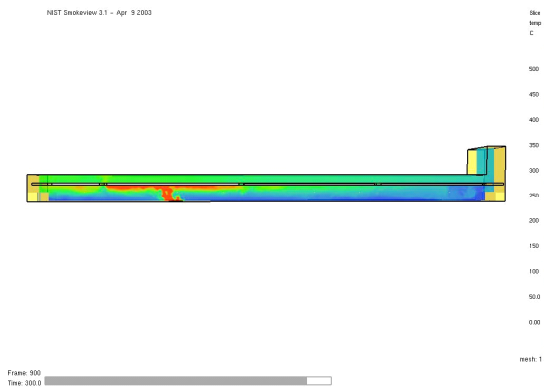


Figure 3 : Résultat de la modélisation d'un feu dans la galerie incendie.

Cette situation correspond un l'incendie d'une puissance de 4 MW, soit, pour un rapport d'échelle d'environ un tiers, l'incendie de 3 véhicules légers ou d'un fourgon.

3.3 Problématique

Deux systèmes de ventilation peuvent être utilisés dans les géométries de type tunnel : la ventilation longitudinale et la ventilation transversale. L'objet de cet article n'est pas de décrire les principes de chacun de ces systèmes, cela ayant par ailleurs déjà été traité dans la littérature [6]. Cependant, le choix des moyens d'essais se basant sur leur possibilité de reproduire les phénomènes physiques, il est

important de rappeler les grands principes de ces systèmes de ventilation. En effet, l'objectif du projet, pour la partie incendie, mais aussi pour les phénomènes de dispersion de gaz toxiques, légers ou denses, est d'étudier la stabilité de la stratification lors de l'utilisation des systèmes de ventilation, et notamment en présence d'obstacles, les véhicules par exemple.

Les systèmes de ventilation longitudinale consistent à générer un courant d'air longitudinal dans le tunnel au moyen d'accélérateurs disposés en partie haute de celui-ci. Ce principe de fonctionnement est représenté sur la Figure 4. L'utilisation de ce système en cas d'incendie provoque le balayage des fumées vers la sortie du tunnel. Cette stratégie est couramment utilisée dans des tunnels à trafic unidirectionnel où le risque de congestion est très faible. La présence d'usagers en aval du foyer est alors inexistante.

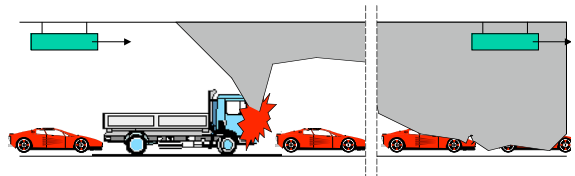


Figure 4 : Ventilation longitudinale en tunnel.

A l'inverse, les systèmes de ventilation transversal permettent de confiner les fumées dans une gaine d'extraction et doivent normalement permettre de conserver une meilleure stratification et donc accroître la sécurité pour les véhicules se trouvant un aval de l'incendie. Le principe de fonctionnement d'une ventilation transverse est représenté sur la Figure 5.



Figure 5 : Ventilation transversale en tunnel.

L'un des enjeux d'une telle étude est par exemple la ventilation de tunnels congestionnés : est-il pertinent d'utiliser une ventilation longitudinale dans un tel cas ? L'utilisation d'une ventilation transversale peut-elle permettre l'amélioration de la sécurité des usagers ?

Un autre enjeu consiste à évaluer l'efficacité de ces systèmes de ventilation dimensionnés pour l'incendie dans le cas de rejets de gaz denses où la stratification de la substance dangereuse se trouve inversé par rapport au cas des fumées d'incendie. Cependant, afin de bien représenter expérimentalement l'équilibre entre les effets de flottabilité à l'origine des phénomènes de stratification et les effets de turbulence à l'origine de la déstratification, il est important de suivre des règles de représentation expérimentale.

3.4 Similitudes

L'impossibilité de réaliser les essais en grandeur réelle impose l'utilisation de moyens d'essai à échelle réduite. Deux solutions sont envisageables au vu des moyens d'essai disponibles à l'INERIS : maquette froide et galerie incendie. On rappelle que pour être représentatif d'une configuration réelle, il est nécessaire de respecter des règles de similitude, c'est à dire de respecter à échelle réduite les phénomènes physiques se déroulant dans une configuration réelle. Pour les essais en tunnel, deux nombres adimensionnés sont représentatifs des phénomènes physiques :

1. Le nombre de Froude, Fr , représentatif des effets de flottabilité. Ces effets sont à l'origine de la stratification.
2. Le nombre de Reynolds, Re , représentatif des phénomènes turbulents gouvernant le mélange et par voie de conséquence la déstratification.

Ces deux nombres s'écrivent, pour le nombre de Froude :

$$Fr = U / \sqrt{gd} \quad (3)$$

Où U est la vitesse de l'écoulement, g la gravité et d une dimension linéaire caractéristique du phénomène, par exemple, dans le cas d'un tunnel, le diamètre hydraulique.

Le nombre de Reynolds s'écrit :

$$Re = U d / \nu \quad (2)$$

Où ν la viscosité cinématique.

Il apparaît ainsi clairement que le respect de ces deux nombres est impossible lors d'un changement d'échelle. En effet, le nombre de Froude impose de conserver le rapport U/\sqrt{d} alors que le nombre de Reynolds impose de conserver le produit de ces deux grandeurs. Ainsi, au vu des objectifs du projet d'étudier l'influence des obstacles sur la déstratification des couches de gaz, il est important d'approcher au mieux la similarité. En effet, chacun de ces nombres représente l'un des phénomènes qui doivent être étudiés :

- ⇒ Le nombre de Froude est représentatif de la stratification initiale des gaz consécutivement au rejet. Ainsi le ratio qu'il représente entre les effets liés à la vitesse et ceux liés au force de pesanteur doit être respecté afin de garantir une bonne représentation de la stratification initiale des gaz.
- ⇒ Le nombre de Reynolds représente le ratio entre les forces d'inertie et les forces visqueuses et est en ce sens représentatif de la stabilité de la stratification au regard des phénomènes turbulents. Il doit donc également être reproduit au mieux.

La modification significative de l'un de ces paramètres entraînerait par conséquent des erreurs de représentation des phénomènes étudiés. Dans le cas présent, il est

indispensable de se placer dans des conditions permettant de reproduire le plus fidèlement possible la stratification initiale du gaz, c'est en effet la stabilité de cette stratification que l'on souhaite étudier. Cependant, le nombre de Reynolds est représentatif des phénomènes turbulents à l'origine de la déstratification, ainsi il est important de se placer dans une gamme de nombre de Reynolds représentatifs.

a- Cas de la maquette froide

Comme décrit précédemment, la maquette froide permet de réaliser des essais à l'échelle 1/20^{ème}, soit 0,05. Ainsi, afin de conserver le nombre de Froude, il convient d'utiliser des vitesses corrigées par un facteur 0,22 ($=\sqrt{0,05}$). Le nombre de Reynolds est alors diminué d'un facteur 100 environ ($0,05*0,22=0,011$).

b- Cas de la galerie incendie

La galerie incendie permet de réaliser des essais à l'échelle 1/3, soit, pour conserver le nombre de Froude, une vitesse corrigée d'un facteur 0,57. Le nombre de Reynolds est alors modifié d'un facteur 5 ($0,33*0,57=0,19$).

3.5 Choix des moyens d'essai

Au vu des éléments exposés au paragraphe précédent, l'intérêt de la galerie incendie apparaît clairement. En effet, la conservation du nombre de Froude dans le cas de la maquette impose de diminuer le nombre de Reynolds d'un facteur 100, ce qui signifie que le ratio entre les forces d'inertie et les forces visqueuses est modifié de ce même facteur 100. Une telle modification entraînerait des modifications importantes sur les régimes d'écoulement turbulent et en conséquence sur les phénomènes de déstratification. A l'inverse, la galerie incendie permet de conserver un ratio entre les forces visqueuses et les forces d'inertie du même ordre de grandeur. Pour ces raisons, il a donc été choisi de réaliser les essais sur la galerie incendie de l'INERIS.

3.6 Mise en œuvre expérimentale

Quatre typologies de phénomènes ont été identifiées pour caractériser la menace des tunnels routiers et ferroviaires :

1. Incendie ;
2. Dispersion de gaz légers ;
3. Dispersion de gaz denses ;
4. Explosion.

La mise en œuvre expérimentale utilisée pour chacun de ces phénomènes est décrite ci-après pour chacun des phénomènes physiques identifiés. La mise en œuvre expérimentale a été choisie afin d'être représentative des scénarii de menace.

3.6.1 Incendie

Les effets d'un incendie sont nombreux et de différents types : élévation de la température, rayonnement, émission de fumées pouvant présenter un caractère toxique important et perte de visibilité. On mentionnera que, si des seuils d'effet peuvent être définis pour les trois premiers effets, ce n'est pas le cas pour la visibilité, effet pour lequel les effets sont indirects : cela impacte le temps nécessaire pour l'évacuation des personnes et, dans un tunnel routier par exemple, peuvent empêcher la mise en sécurité vers les issues de secours. Ainsi, afin de reproduire ces phénomènes expérimentalement, et au vu des moyens d'essais disponibles, la solution qui semble la plus naturelle est d'utiliser un incendie dont la puissance est corrélée à l'échelle des moyens expérimentaux. La solution retenue pour les essais qui seront réalisés est d'utiliser l'incendie de bacs d'heptane. Cette solution a plusieurs avantages. Le premier, et non des moindres, est le contrôle de la puissance de l'incendie, puissance directement liée à la surface des bacs. Le second point important est le contrôle de la durée de l'incendie au moyen d'une pompe permettant de réguler la hauteur de liquide dans les bacs en feu. Ainsi, de tels moyens permettent de reproduire à l'échelle expérimentale l'incendie d'un véhicule dans un tunnel, incendie généralement caractérisé par une courbe en trois phases :

- ⇒ Montée en puissance ;
- ⇒ Pallier de puissance maximale ;
- ⇒ Phase de décroissance.

Une telle courbe est représentée sur la Figure 6. Cette courbe est issue des guides du CETU [1].

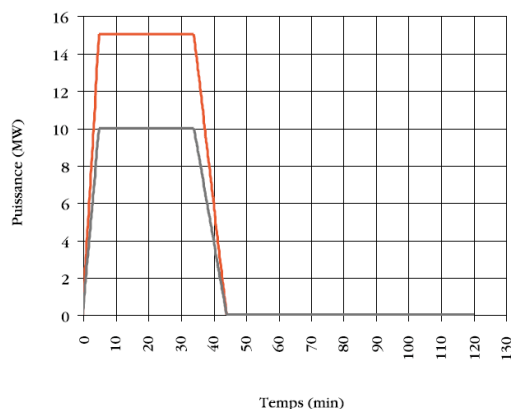


Figure 6 : Evolution temporelle de la puissance d'un petit fourgon dans un tunnel routier. En rouge, puissance totale, en gris puissance convectée.

3.6.2 Dispersion de gaz légers

Un gaz est dit léger lorsque sa densité est inférieure à celle de l'air, c'est le cas notamment des fumées d'incendie dont la température est élevée. Les effets associés à la dispersion des fumées sont identiques à ceux

décrits pour les phénomènes d'incendie, à savoir toxicité et perte de visibilité.

3.6.3 Dispersion de gaz denses

Un gaz est dense lorsque sa densité est plus élevée que celle de l'air. On rappelle que certains gaz de masse volumique inférieure à celle de l'air, l'ammoniac par exemple, se comporte comme un gaz dense, ces gaz étant refroidis à l'émission par un phénomène de détente.

Les effets liés à une dispersion de gaz sont majoritairement les effets toxiques : un seuil d'effet est associé à chaque gaz. On mentionnera la grande diversité des seuils d'effets en fonction des gaz (HCN, NH₃, Cl₂ et sarin par exemple). La grande diversité des gaz toxiques rend le choix des moyens d'essais délicats, en effet, le gaz retenu pour les essais doit posséder une masse volumique proche des gaz toxiques pouvant transiter en tunnel accueillant du TMD ou susceptibles d'être utilisés au cours d'un attentat. De plus, pour des raisons de sécurité, il est impossible d'utiliser un gaz de toxicité élevée. Ainsi, un gaz neutre assimilable à un gaz dense sera utilisé pour les essais.

Les débits de rejets expérimentaux seront déterminés de manière à représenter à la fois les scénarii de menace accidentelle, mais aussi la menace intentionnelle, pour ce qui est des infrastructures ne recevant pas de TMD. En effet, pour ce second cas, nous avons vu qu'un attentat pourrait consister, par exemple, en l'explosion d'un camion contenant un toxique. Ce type de scénarii ne peut être reproduit expérimentalement. A l'inverse, une fuite sur un camion transportant des MD, l'ouverture volontaire d'une bouteille de gaz toxiques ou la mise en place volontaire d'une réaction émettant des gaz toxiques peuvent être reproduits.

3.6.4 Explosion

Le terme explosion regroupe, dans le cas présent, plusieurs phénomènes :

- ⇒ La détonation de matières explosives ;
- ⇒ L'éclatement de capacité sous pression prise, par exemple, dans un incendie ;
- ⇒ L'explosion de réservoir sous pression de liquide (BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion);
- ⇒ La fuite de gaz avec accumulation et explosion du nuage (VCE : Vapour Cloud Explosion).

Ces phénomènes seront étudiés dans une galerie explosion à l'INERIS. Cette galerie est représentée schématiquement sur la Figure 2.

Les quatre phénomènes cités précédemment seront étudiés dans cette galerie dans le but de caractériser la formation des ondes de choc et des ondes de pression.

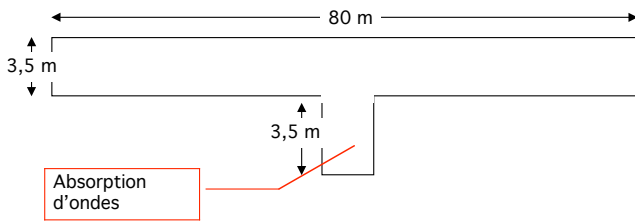


Figure 7 : Galerie explosion de l'INERIS.

3.7 Conclusions

Les contraintes physiques, et notamment le nécessaire respect des règles de similitudes, ont permis de retenir les moyens d'essai qui seront utilisés dans le cadre du projet EGSISTES. Parmi les moyens d'essais en tunnel disponible à l'INERIS : une maquette froide et une galerie incendie. L'utilisation de la maquette froide ne permet pas de respecter la similitude du nombre de Froude et du nombre de Reynolds. On mentionnera de plus, dans le cas de la maquette à l'échelle 1/20, la nécessité de mesurer de faibles vitesses, ce qui implique des moyens de mesure délicats à mettre en œuvre et dont l'incertitude peut être élevée. A l'inverse, l'utilisation de la galerie incendie permet d'utiliser des moyens de mesure simples et dont la mise en œuvre et l'utilisation sont maîtrisées. De plus, cela permet de respecter les similitudes du nombre de Froude et du nombre de Reynolds. La galerie incendie sera donc utilisée pour les essais d'incendie et de dispersion de gaz.

4. Conclusion et perspectives

Le sous-projet 1 est en cours d'achèvement, le rapport de synthèse sera émis courant janvier 2008. Cette phase a permis de déterminer les phénomènes physiques caractéristiques des phénomènes dangereux pouvant être mis en œuvre, tant lors de la menace accidentelle que dans la menace intentionnelle. Les phénomènes physiques identifiés sont au nombre de quatre :

- ⇒ Incendie ;
- ⇒ Dispersion de gaz légers ;
- ⇒ Dispersion de gaz denses ;
- ⇒ Explosion.

Ces quatre phénomènes peuvent être associés aux différents types d'infrastructures de transport en souterrain, à savoir :

- ⇒ Tunnels routiers ;
- ⇒ Tunnels ferroviaires ;
- ⇒ Infrastructures de transport en commun en souterrain (métro).

Le sous-projet 2, dédié à la caractérisation des phénomènes au moyen d'essais a débuté par l'étude de la mise en œuvre expérimentale et des contraintes associées,

notamment en terme de conservation de l'équilibre entre stratification et déstratification sont illustrés pour l'incendie et la dispersion de gaz. En effet, l'un des objectifs du projet est d'étudier l'influence de la présence d'obstacles sur la stratification, quelques règles doivent par conséquent être suivies pour conserver les nombres adimensionnels représentatifs des différents effets physiques. Ces contraintes ont permis d'orienter notre choix des moyens expérimentaux vers la galerie incendie de l'INERIS. Les premiers essais d'incendie et de dispersion de gaz seront réalisés au cours du premier semestre de l'année 2008.

Par ailleurs, l'étude des modèles d'explosion a débuté, tant à l'INERIS qu'à l'université de Valenciennes.

Enfin, les premières réflexions concernant la mise en œuvre des modèles au moyen d'outils de calcul numérique ont eu lieu et ont permis une réflexion sur la succession des étapes en cas d'attentat.

5. Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires pour leur implication dans le projet. Les auteurs remercient également les membres du comité de suivi, Michel PERSIN, Xavier DELACHE et Jean Luc LEFOUR pour les discussions ayant permis l'analyse de la menace intentionnelle.

Références

- [1] Guide des Dossiers de Sécurité des tunnels routiers – fascicule 3 : Les études de risques liés au transport des marchandises dangereuses. Décembre 2005.
- [2] Guide des Dossiers de Sécurité des tunnels routiers – fascicule 4 : Les Etudes Spécifiques de Dangers. Septembre 2003.
- [3] QRA fer
- [4] Definition and experimental evaluation of the smoke « confinement velocity » in tunnel fires. O. VAUQUELIN and D. TELLE ; Fire Safety Journal, vol. 40. 2005.
- [5] An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fire - heptane pool fire cases. J.S. ROH, S.S. YANG, H.S. RYOU, M. O YOON and Y.T. JEONG.
- [6] Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an "air-helium reduced scale model": Principle, limitations, results and future. O. VAUQUELIN. To be published in Tunnelling and Underground Space Technology.