



HAL
open science

Evaluation des conséquences d'accidents de transport en matières dangereuses en tunnel

Jean-Philippe Pineau

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Pineau. Evaluation des conséquences d'accidents de transport en matières dangereuses en tunnel. 4. Assises Européennes sur la Prévention des Risques et de la Sécurité dans les Conditions de Travail, Oct 1994, La Rochelle, France. ineris-00971908

HAL Id: ineris-00971908

<https://ineris.hal.science/ineris-00971908>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES
D'ACCIDENTS DE TRANSPORT
DE MATIERES DANGEREUSES
EN TUNNEL**

J.P. Pineau

INERIS - Parc Technologique Alata

B.P. 2 - 60550 VERNEUIL EN HALATTE

INTRODUCTION

Pour l'estimation du risque du transport des matières dangereuses en tunnel, il est indispensable d'avoir une approche système concernant le tunnel proprement dit, le système de transport utilisé et les matières dangereuses.

Nous nous intéresserons ici essentiellement aux conséquences possibles pour les personnes présentes dans le tunnel.

Dans une première partie, seront décrites les différentes classes de matières dangereuses telles qu'elles sont retenues dans le Règlement sur le Transport des Matières Dangereuses.

Les phénomènes dangereux qu'elles peuvent présenter et leurs conséquences, ainsi que le retour d'expérience sur les accidents seront ensuite présentés, en tenant compte des matières pouvant être transportées. L'état des études expérimentales et de modélisation sera également décrit.

Enfin, compte tenu des contraintes liées au système de transport choisi et à la conception du tunnel, un avis sera porté sur la complémentarité des approches, déterministe ou probabiliste, pour le choix des mesures de prévention et protection

I - CLASSEMENT DES MATIÈRES DANGEREUSES AU TRANSPORT

Par référence au Règlement sur le Transport des Matières Dangereuses (RTMD), différentes classes de produits peuvent être distinguées comme cela est précisé dans le tableau 1. Une classe limitative signifie que la matière doit être explicitement nommée.

L'inclusion dans une classe résulte de critères de classement.

Tableau 1 : Classes de Matières Dangereuses

CLASSE	MATIÈRE	CLASSE LIMITATIVE	CRITERE PRINCIPAL DE CLASSEMENT
1	matières et objets explosibles	oui	propriétés explosibles
2	gaz comprimés, liquéfiés ou dissous, sous pression	non	température critique inférieure à 50°C ou teneur vapeur à 50° C < 3 bar
3	matières liquides inflammables	non	point ébullition, point éclair
4.1	matières solides inflammables	en partie	décomposition exothermique, combustion tas
4.2	matières sujettes à l'inflammation spontanée	oui	auto-inflammation
4.3	matières, qui au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables	oui	action eau
5.1	matières comburantes	non	vitesse de combustion
5.2	peroxydes organiques	non	température de décomposition
6.1*	matières toxiques	non	
6.2**	matières répugnantes ou susceptibles de produire une infection	oui	non
7	matières radioactives	oui	activité spécifique
8	matières corrosives	non	action sur la peau, aluminium et acier
9	matières et objets dangereux divers	non	voir ci-dessous

Remarque : dans la classe 9 figurent un certain nombre de produits entraînant des risques divers, notamment :

A : matières, qui inhalées sous forme de poussières fines, peuvent mettre en danger la santé (exemple amiante).

B : matières et appareils qui en cas d'incendie peuvent former des dioxines.

C : matières dégageant des vapeurs inflammables (polymères, point éclair < 55°C).

D : piles au lithium.

* Le degré de toxicité est établi en recourant aux informations disponibles provenant d'essais sur l'animal (ingestion, absorption, inhalation de brouillards et poussières).

** En 1995, la classe 6.2 concernera des matières infectieuses.

II - PHÉNOMÈNES DANGEREUX POUVANT SURVENIR

Lorsqu'on admet le transport des matières dangereuses en tunnel, des restrictions peuvent être mises sur les conditions de passage des camions ou des trains, ainsi que sur les classes de matières retenues.

Les scénarios accidentels à retenir et les conséquences possibles dépendent de ces restrictions. Les conséquences sont notamment influencées par les conditions d'emballage des matières, le type de véhicule de transport et les modalités de transit, la conception du tunnel et son exploitation, et tout spécialement par les conditions de ventilation. Ces différents points font encore l'objet d'études détaillées par divers organismes ou sociétés français - CEPN, CETU, INERIS, SCETAUROUTE - ... ou étrangers. Par ailleurs, pour définir le poids statistique de certains scénarios, il est aussi indispensable d'assurer le retour d'expérience sur les accidents survenus et les phénomènes dangereux mis en jeu.

Ces phénomènes sont essentiellement l'explosion, l'incendie et l'émission et le rejet de produits toxiques.

Les matières et objets explosibles (classe 1) et les peroxydes organiques (classe 5.2) ne nécessitent généralement pas la présence d'un comburant pour exploser. Le mélange accidentel de matières comburantes (classe 5.1) avec des produits combustibles peut aussi entraîner une explosion. Les gaz comprimés, liquéfiés ou dissous, sous pression, inflammables (classe 2), les matières inflammables solides et liquides (classes 3 et 4.3), les gaz inflammables qui se dégagent par l'action de l'eau sur les matières de la classe 4.3, des matières suffisamment volatiles et inflammables des classes 6.1, 6.2 et 8, les matières dégageant des vapeurs inflammables de la classe 9 nécessitent d'être mélangées avec l'air dans des proportions définies pour former une atmosphère explosive. Pris dans un incendie, les gaz comprimés liquéfiés ou dissous inflammables de la classe 2 et certains liquides inflammables peuvent conduire à un BLEVE*.

Avec les produits inflammables et combustibles, les explosions qui se produisent à l'air libre donnent des effets thermiques notables et peuvent amorcer un incendie, mais les effets de pression sont en général négligeables. Par contre en tunnel, ces mêmes produits peuvent entraîner des effets de pression importants lors d'une explosion.

Les matières solides inflammables (classe 4.1), les matières sujettes à l'inflammation spontanée (classe 4.2) ou qui dégagent des gaz inflammables au contact de l'eau (classe 4.3), certaines matières des classes 6.1, 6.2 et 8 peuvent être la source d'incendies importants dont les effets thermiques s'exerceront souvent sur une plus grande distance en tunnel qu'à l'air libre.

* BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

Mais surtout, les fumées d'incendie produites entraînent des risques importants d'intoxication si la ventilation ne peut être réglée de façon adaptée pour assurer le désenfumage.

L'émission de vapeurs toxiques peut provenir de la rupture de récipients contenant des matières suffisamment volatiles de la classe 6.1. Leur dispersion dans l'air du tunnel peut là encore entraîner l'intoxication des personnes présentes. Le danger est nettement plus sournois qu'avec les fumées d'incendie car généralement ces vapeurs sont incolores et donc difficilement repérables. De plus, des liquides suffisamment volatils peuvent envahir le système de collecte des épandages et conduire à la formation de vapeurs toxiques loin du point de rejet.

Enfin, le rejet de matières toxiques, solides ou liquides (classe 6.1) et corrosives (classe 8) est à prendre en considération, principalement pour les risques de toxicité et de pollution, voire pour les dommages entraînés sur la structure du tunnel et sur certains équipements nécessaires à l'exploitation ; ceci concerne également les systèmes de collecte des épandages.

La combinaison de ces différents phénomènes est, dans bien des cas, à envisager. Enfin, le renforcement des effets de l'incendie (effets thermiques et de toxicité) peut être obtenu du fait des matériaux constitutifs des véhicules et des équipements plus ou moins combustibles présents dans le tunnel. Les règles de choix pour les véhicules et les modalités de conception du tunnel ne sont pas traitées ici.

III - RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES ACCIDENTS EN TUNNEL DUS AUX MATIÈRES DANGEREUSES

En tunnel routier, le nombre d'accidents aux conséquences graves est relativement limité comme le montre le tableau 2 (4) ; le poids statistique des parcours en tunnel est bien sûr faible par rapport à l'ensemble des voies de transport.

En ce qui concerne les tunnels ferroviaires, seul nous est connu l'accident de SUMMIT (Yorkshire, G.B.) le 20 décembre 1984. Dans ce tunnel de 2 663 m de long, un incendie a démarré à la suite d'un déraillement sur une citerne de white spirit et a duré 3 jours.

De ce faible nombre d'accidents graves, on ne doit pas tirer la conclusion que certains scénarios n'ont pas la possibilité de se produire même si on constate que seuls des incendies sont actuellement répertoriés.

L'acquisition de connaissances dans ce domaine passe par la réalisation d'études expérimentales de ces phénomènes et par la modélisation. Deux types d'équipement du tunnel méritent aussi une attention toute particulière lorsqu'il y a incendie, ou simplement rejet de matières dangereuses : la ventilation (marche normale et dispositions lors d'un désenfumage) et les systèmes de collecte des épandages (5).

Tableau 2 : Accidents dans des tunnels routiers

Tunnel	Holland	Billwerder Moorfleet	Velsen	Nihonzaka	Caldecott	Gothard	Fréjus	Guadarrama	Mont Blanc
An constr.	1927	1963	1957	1969	1964	1980	1980	1972	
Pays	USA	RFA	Hollande	Japon	USA	Suisse	FR/IT	Espagne	France
Localité	New York	Hambourg	Velsen	Shizuoka	Oakland	Goschenen Airolo	Modane Bardonecchia	Guadarrama	Chamonix Courmayeur
longueur m /nb de tubes	2 550 2	243 2	770 2	2 045 2	1 028 3	16 221 1	12 868 1	3 330 2	11 600
date incendie	13 05 49	31 08 68	1978	11 07 79	07 04 82	02 04 84	03 02 83	14 08 75	11 01 90
distance de l'incendie de l'entrée m	900	120	500	1 625	530	6 000	4 300	220	5 810
véhicule source incendie	1 camion	1 remorq. de camion	2 camions 4 voitures	4 camions 1 autocar 1 voiture	1 camion	1 camion	1 camion	1 camion	1 camion
chargement	11 t de bisulfure de carbone	14 t de granulats de plastiq. en sacs	-- (3)	--	33 000 l d'essence	rouleaux de matière plastique en feuilles (3)	matière plastique (3)	bidon de résine de pin (3)	bobines fil de coton (3)
origine de l'incendie	chute de chargement	blocage de freins	collision avant-arrière	collision avant-arrière	collision avant-arrière	incendie moteur camion	rupture de la boîte de vitesse	--	feu de cabine
temps d'intervention	20 '	60 '	10 '	40 '	90 '	11 '	8 '	70 '	
durée incendie	4 h	1 h 30 '	1 h 20'	4 jours	2 h 40'	24 '	1 h 50'	2 h 45'	1 h 40'
victimes	66 blessés	--	5 morts 5 blessés	7 morts 2 blessés	7 morts 2 blessés	--	--	--	--
dégâts sur les véhicules	10 camions détruits 13 voitures gravement endommagées	1 remorque détruite	2 camions 4 voitures détruites	179 véhicules détruits	3 camions 1 autocar 4 voitures détruits	1 camion détruit	1 camion détruit	1 camion	1 camion détruit
dégâts sur le tunnel	graves dégâts sur 200 m	graves dégâts sur 34 m	graves dégâts sur 30 m	graves dégâts sur 1 100 m	graves dégâts sur 580 m	graves dégâts sur 30 m	graves dégâts sur 200 m	graves dégâts sur 210 m	dégâts légers revêtement et équipement

1) véhicule sur lequel s'est manifesté l'incendie - 2) temps entre début d'incendie et début des opérations d'extinction
3) stricto sensu, il ne s'agit pas de matières dangereuses

CONNAISSANCE DES PHÉNOMÈNES MIS EN JEU

IV - 1 - Explosions

Pour connaître les effets des explosions, une étude a été entreprise au début des années 1980 (4) en Belgique dans un tunnel expérimental.

Les essais d'explosion réalisés avec des mélanges d'acétylène dans l'air ont permis d'estimer les déplacements et déformations de panneaux, de mesurer les suppressions maximales, de valider un modèle mathématique. Cependant malgré l'intérêt de cette étude, elle n'offre que des données difficilement utilisables compte tenu du choix d'un gaz particulièrement réactif dont on a étudié la détonation qui est un régime de l'explosion peu vraisemblable accidentellement. Il serait utile de prendre en compte des essais avec des gaz plus couramment transportés (méthane, butane, propane) dans des conditions réalistes de formation de mélanges explosifs à la suite de fuite et en s'intéressant aux effets de souffle et à la présence des véhicules. La prise en considération des résultats d'explosions expérimentales dans des galeries minières devrait aussi permettre une meilleure approche des effets d'une telle explosion.

IV - 2 - Incendie

Un nombre assez considérable d'études ont concerné le développement d'incendies, notamment de flaques de liquide inflammable. Diverses mesures ont été faites notamment sur la température des gaz formés et leur composition ainsi que sur les conditions de propagation des fumées d'incendie pour des conditions de ventilation variées (longitudinale forcée ou naturelle).

IV - 2 - 1 Déroulement de l'incendie

Parmi les travaux récents, il est possible de citer par exemple ceux qui ont visé à étudier la remontée de fumées à contre-courant (back layering) (5-6).

Par ailleurs, dans le cadre de l'étude de danger pilote réalisée par le CETU à la demande de la DRM (Délégation aux Risques Majeurs du Ministère de l'Environnement) pour le tunnel routier de Fréjus, une simulation de l'interaction entre un incendie et la ventilation a été réalisée pour examiner notamment la possibilité de remontées de fumées d'incendie à contre courant pour une puissance d'incendie donnée. Le CETU a utilisé le logiciel (CFD) FLOW3D pour simuler un incendie en régime transitoire avec évolution de la ventilation.

Assez loin du foyer de l'incendie, en simulant une succession d'états stationnaires correspondant chacun à un régime de ventilation différent, le logiciel VENDIS-FS mis au point à l'INERIS permet d'obtenir des résultats satisfaisants pour traiter le désenfumage.

Ainsi, ce logiciel, utilisé pour simuler le développement d'incendie dans des tunnels routiers de sections variées (7), a notamment permis de choisir la configuration où les températures de fumées d'incendies et les risques de remontées de fumées à contre courant sont les plus faibles.

D'autres organismes, tel SCETAUROUTE, commencent à utiliser des codes de calcul sur l'incendie tels que STORM. Le modèle britannique JASMINE a été utilisé pour le cas du tunnel Transmanche.

Malgré tous ces travaux, il est apparu utile de développer le projet EUREKA FIRETUN pour examiner expérimentalement différents aspects qui n'avaient pas reçu jusqu'à présent une attention suffisante et qui visent en particulier la fourniture d'une base de données pour poursuivre la validation des modèles utilisables. Les participants français étaient SCETAUROUTE, CETU*, IMFM**, INERIS, et Clima NEU.

Dans le cadre de ce projet dont la phase expérimentale s'est effectuée dans le tunnel de Reppar Fjord en Norvège, les types de feux suivants ont été étudiés (tableau 3).

Tableau 3 : Types de feux dans le tunnel de Reppar Fjord

ESSAI
Palette de bois
Véhicule léger
Voiture de métro (acier)
Demi-véhicule de chemin de fer
Bus
Simulation de poids lourd
Bac d'heptane
Véhicule léger à carrosserie plastique
Poids lourd

Les objectifs de ce programme étaient multiples :

- Caractérisation d'un incendie en tunnel : distribution spatiale et temporelle des températures et des fumées, taux de combustion, énergie libérée y compris la part radiative, vitesse de propagation du feu, quantité d'air consommé et de fumée produite, influence des systèmes de ventilation ;

*CETU : Centre d'Etudes des Tunnels

** IMFM : Institut de Mécanique des Fluides de Marseille

- Possibilités d'évacuation, d'intervention et de lutte contre l'incendie : systèmes de détection, efficacité des systèmes d'évacuation, éclairage de secours, performance des services d'intervention, estimation des temps d'évacuation, possibilités de communication ;
- Conséquences d'un incendie sur la structure de l'ouvrage, dégâts causés, possibilités et délais de remise en état, essais de différents types de revêtements ;
- Comportement des véhicules et résistance de ceux-ci lors d'un incendie ; cette analyse concerne essentiellement le matériel ferroviaire ;
- Validation de moyens de calculs : comparaison entre mesures et calculs sur différents codes existants, améliorations éventuelles ;
- Obtention de bases de données expérimentales.

Les résultats obtenus sont encore en cours de dépouillement et doivent permettre de valider les logiciels CFD tridimensionnels actuellement utilisés ou en cours de développement (11).

Dès à présent, un code CFD (PHOENICS) de simulation numérique a permis le calcul de l'écoulement 3 D (tri-dimensionnel) permanent de l'air sur toute la longueur du tunnel Reppar Fjord.

Ce type de calculs, réalisé avec des températures de paroi et d'air égales, montre le développement du profil de vitesses dans la zone d'entrée du tunnel. Ensuite, en s'éloignant davantage de l'entrée, il n'y a plus de variations significatives.

Si on impose des écarts de température entre l'air entrant et les parois et qu'il y a échange thermique, on observe, dans la zone d'entrée, se superposant à l'établissement du profil de vitesse, des mouvements hélicoïdaux de convection générés par les écarts de densité entre l'air à proximité des parois verticales et l'air de la galerie (voir Figure 1).

Ces mouvements, peu marqués lorsque les écarts de température sont faibles, jouent cependant un rôle important pour homogénéiser l'atmosphère sur de longs parcours.

Au total, la simulation d'un incendie en tunnel nécessite la prise en compte correcte des échanges énergétiques entre le foyer, les gaz chauds et la paroi de la galerie par convection et rayonnement et sera poursuivie à l'INERIS au moyen du code CFD cité plus haut.

IV - 2 -2 Effets thermiques et toxiques

Pour ce qui concerne les effets thermiques et toxiques des fumées d'incendie, des études du comportement au feu des matières emballées ou en vrac peuvent, dans un certain nombre de cas, être nécessaires. Ceci impose de réaliser des essais en grandeur sur les produits, éventuellement dans leur conditionnement, ainsi que cela peut se faire dans la galerie d'incendie de l'INERIS (Figure 2).

Des résultats sont notamment disponibles en ce qui concerne un type d'engrais ternaire NPK et des produits phytosanitaires (10)

tant sur la vitesse de décomposition du produit que sur la nature des produits formés. Cette étude a montré la nécessité de ne pas baser les mesures de sécurité uniquement sur les résultats d'essais de laboratoire.

Par ailleurs, l'aspect des effets aigus lors d'exposition de personnes aux fumées d'incendie est à prendre en compte. Un tel travail est actuellement en cours à l'INERIS (12).

IV - 2 -3 Etude de dispositions de protection

L'INERIS est en mesure d'examiner l'efficacité de diverses dispositions de protection prises dans les tunnels pour réduire les effets des fumées d'incendies.

Ainsi, pour le tunnel de Puymorens, à la demande de SCETAUROUTE, une étude expérimentale (Figure 3) menée dans la galerie incendie de l'INERIS (8), sous le contrôle du CETU, a permis de définir les modalités de dimensionnement aéraulique des refuges incendie susceptibles d'accueillir les voyageurs dont les véhicules seraient immobilisés dans l'ouvrage du fait d'un incendie. Le rôle de ces installations est de soustraire les passagers à l'atmosphère du tunnel susceptible d'entraîner brûlure, intoxication ou asphyxie. Les paramètres étudiés étaient la température et l'opacité compte tenu des conditions d'ouverture des portes pour accès dans le refuge.

Concernant l'aspect désenfumage d'un tunnel, le comportement d'un poste complet de ventilation de type métro installé dans la galerie incendie de l'INERIS a permis de définir la résistance aux fumées d'incendie des équipements constitutifs de ce poste et l'efficacité de dispositifs de sécurité associés (sprinklers).

Enfin, à la demande du CETU, en partenariat avec la SAPRR (Société des Autoroutes Paris-Rhin-Rhône) et de son maître d'oeuvre SCETAUROUTE (Direction des Tunnels et Travaux Souterrains), l'INERIS a réalisé une étude sur la sécurité des systèmes de recueil et d'évacuation des liquides inflammables, équipant les tunnels routiers.

Un nombre croissant de tunnels routiers français est en effet autorisé au passage des matières dangereuses. Celles-ci sont majoritairement constituées d'hydrocarbures liquides en citerne. En cas de déversement en tunnel suite à un accident, il est indispensable que le système d'assainissement puisse évacuer très rapidement ces liquides, afin de réduire l'importance d'un éventuel incendie et d'éviter sa propagation.

C'est pourquoi, depuis plusieurs années, différents systèmes d'évacuation ont été étudiés et mis en oeuvre dans les tunnels récents en France : il s'agit soit de fils d'eau classiques en bordure de trottoir, comportant des regards avaloirs à intervalles rapprochés, soit de caniveaux à fente continue séparés des collecteurs par des siphons destinés à éteindre les matières enflammées.

Avant de généraliser de tels systèmes, il a paru nécessaire de comparer expérimentalement l'efficacité des diverses solutions et d'examiner les risques d'incendie et d'explosion spécifiques à ces installations.

Une première campagne d'essais a concerné l'efficacité hydraulique des systèmes de recueil. Dans six tunnels routiers en exploitation, des essais ont été réalisés avec un écoulement continu de débit limité (de 20 à 30 l/s) et avec des relâchements brutaux de 5 et 10 m³. De l'eau a été utilisée pour simuler la matière dangereuse.

Un deuxième type d'essais a été réalisé sur un site de l'INERIS, sur une installation expérimentale en vraie grandeur de plus de 50 m de longueur, comportant caniveau à fente continue, regards munis de siphons et collecteur (Figure 4). Du supercarburant sans plomb a été utilisé pour examiner les différents phénomènes de propagation d'incendie et de risque d'explosion dans l'installation. Plusieurs situations ont été testées, y compris des conditions où le système d'évacuation présentait des défauts.

Les données ainsi obtenues ont été utilisées pour faire une analyse des risques de l'installation permettant d'envisager tous les scénarios possibles d'accident en tunnel et de fonctionnement du système d'évacuation.

IV - 3 - Toxicité des émissions dans l'air

Des méthodes de calcul simplifiées ont été utilisées pour caractériser la formation d'atmosphères toxiques à la suite de l'évaporation d'une flaque de produit liquide toxique relativement volatil. Les conditions d'évaporation de la flaque par un courant d'air sont bien connues pour des liquides ; par contre, pour des solutions de substances actives dans un milieu solvant, les conditions d'évaporation sont nettement plus difficiles à approcher. Par ailleurs, les conditions de mélange avec l'air dépendent fortement des modalités de ventilation et de la configuration du tunnel.

Pour étudier l'effet d'intoxication (et/ou d'incapacitation), des critères de toxicité sont à définir. Dans le cas d'une fuite en tunnel, il est préférable de retenir la valeur IDLH (Immediately Dangerous for Life and Health) telle qu'elle a été donnée par le NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) ; elle correspond au début d'effets irréversibles pour une exposition de 30 minutes. Il faut cependant souligner que ces valeurs ne sont connues que pour 250 produits. De plus, des travaux sont en cours pour proposer d'autres valeurs adaptées pour le cas du traitement des situations d'urgence (ERPG).

Au total, le risque de formation d'atmosphères toxiques en tunnel doit au moins être pris en compte pour les interventions menées en situation d'urgence lorsqu'une unité de transport contenant un produit de la classe 6.1 assez volatil et possédant une faible valeur IDLH est impliquée. Le réglage de la ventilation en cas de fuite doit être manié avec précaution, car il peut notablement augmenter la vitesse d'évaporation sans améliorer beaucoup la dilution.

IV - 4 - Effet des rejets sur le sol

S'il s'agit de produits corrosifs, c'est principalement l'effet sur les structures de l'ouvrage qui est à prendre en compte. Cependant, pour les substances susceptibles de présenter un danger à long terme, leurs effets dépendront fortement de la configuration du tunnel et des moyens de collecte et d'évacuation des rejets.

V - APPROCHE PROBABILISTE ET/OU DETERMINISTE POUR LE TRANSPORT DES MATIERES DANGEREUSES EN TUNNEL

L'approche déterministe vise à l'évaluation des conséquences des phénomènes qui peuvent être nettement plus graves en tunnel qu'à l'air libre. Pour diminuer la gravité des conséquences pour des personnes présentes en tunnel, notamment lorsqu'elles y sont bloquées à la suite d'un accident survenant sur une unité de transport de matières dangereuses, diverses mesures sont utilisables. Il est possible de prendre des dispositions de conception (type de ventilation et son réglage, dimensions géométriques, implantation de tube(s) du tunnel).

Des dispositions d'exploitation (interdiction de transport simultané de matières dangereuses et de passage d'autres véhicules, restriction sur les classes de matières dangereuses transportées) peuvent être adoptées. Des moyens de prévention, détection et protection (réglage de la ventilation, caniveaux spécialement adaptés pour recueillir les liquides inflammables, système de collecte des rejets, niches pressurisées) et des moyens d'intervention peuvent être mis en place.

Il s'agit d'une approche classique d'une étude des dangers.

On doit aussi prendre en compte l'occurrence des phénomènes. Sur ce point, nous avons vu précédemment que le nombre total d'accidents répertoriés est faible et que certains scénarios (avec des conséquences graves) n'ont pas été mis en évidence dans des accidents en tunnel.

Les voies actuellement possibles pour déterminer les fréquences d'occurrence des scénarios, dans un tunnel donné, défini par sa longueur, sa géométrie, son trafic (vitesse, densité, répartition), s'appuient sur l'examen des accidents survenus, mais aussi sur tous les facteurs conduisant à l'apparition du scénario, afin d'établir les probabilités d'occurrence. Il devient alors possible de déterminer des courbes fréquence-gravité qui, pour une stratégie précise d'exploitation du tunnel : par exemple, vitesse limitée à 60 km/h, transport d'explosifs exclus, permettent de prévoir la probabilité d'avoir des accidents occasionnant plus de 2, 10 ou 50 victimes.

De telles courbes peuvent également être réalisées pour des itinéraires à l'air libre, compte tenu de la présence des usagers sur la route, mais également de la densité des populations riveraines de l'itinéraire.

Il devient dès lors possible de réaliser des comparaisons chiffrées des risques relatifs à chaque itinéraire et de choisir une stratégie d'exploitation du tunnel (type de transports autorisés ...).

La fiabilité des équipements du tunnel et des mesures de prévention et de protection est aussi un point important à examiner.

VI - CONCLUSION

L'évaluation des conséquences d'accidents de transport de matières dangereuses en tunnel nécessite l'utilisation d'un certain nombre de résultats expérimentaux et de modélisation des phénomènes mis en jeu lors d'explosions, d'incendies, d'émission et de rejets de produits toxiques et de leurs conséquences. Des travaux restent à poursuivre sur tous ces phénomènes dont les effets sont encore mal évalués dans des types de tunnels variés avec des configurations de ventilation différentes (longitudinale ou transversale par exemple).

Pour compléter cette approche déterministe par une approche probabiliste, il faut exploiter au maximum le retour d'expérience sur les accidents survenus dans le monde entier, y compris ceux aux conséquences faibles. Le nombre de victimes potentielles en fonction des itinéraires choisis (à l'air libre et en tunnel) doit être pris en compte lors de la définition des modalités de conception, d'exploitation et des dispositions de prévention et de protection, en tenant compte également des causes possibles d'accidents. Il faut enfin s'intéresser à la fiabilité des équipements du tunnel et des mesures de prévention et de protection. C'est ainsi que la comparaison d'itinéraires différents est possible et permet le choix d'une stratégie d'exploitation.

Au total, ces deux aspects doivent être complémentaires.

Remerciements :

L'auteur remercie tout spécialement pour leur aide MM. J. Broz, P. Cassini, C. Cwiklinski, J.F. Lechaudel, R. Lödel, G. Marlair et F. Marlière qui ont réalisé à l'INERIS les divers travaux expérimentaux ou de modélisation dont les résultats sont rapportés ici.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) C. MICHOT, J. BIGOURD, J.P. PINEAU
INERIS action in the field of dangerous substances
7th International symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, Taormina, 4-8 May 1992, vol. 2 ; pp. 60-1 à 60-30.

- 2) J.P. PINEAU, J. CHAINEAUX, Y. LEFIN, G. MAVROTHALASSITIS
Retour d'expérience des analyses critiques des études de dangers et de l'investigation d'accidents survenus en France.
Sécurité - Sciences et Recherches n° 8, nov. 1993, p. 3-9.

- 3) J.P. PINEAU, F. ABIVEN, J.F. LECHAUDEL, G. MAVROTHALASSITIS
Accident investigations : a need for safety analysis and emergency response, ER'93, International Conference "The practical approach to hazardous substances accidents", St. John NB, Canada, 7-10 September 1993.

- 4) J.L. STRACZEK
Les matières dangereuses en tunnel : exploits techniques et problèmes de sécurité.
Tunnels et ouvrages souterrains n° 103, janvier-février 1991, p. 47-49.

- 5) F.M. GIGER
Réflexions sur les risques de transport dans les tunnels : le cas des tunnels Alpains, Conférence OCDE sur le transport des Matières Dangereuses par route : Sécurité et Protection de l'Environnement, Karstad, Sweden, 2-4 June 1992.

- 6) A. GUELZIN, J.M. SOUIL, J.P. VANTELON, D.K. SON, D. GABEY, R. DALLEST
Modelling of a reverse layer of fire induced smoke in tunnel.
4th International Symposium on Fire Safety Science (IAF SS), Ottawa 12-17 June 1994.

- 7) N. d'ALBRAND, C. BESSIERE
Fire in a road tunnel : comparison of tunnel sections.
Safety in road and rail tunnels, Basel, 23-25 novembre 1992, pp. 439-449.

8) E. CASALE, J. BROZ

Puymorens tunnel refuges firetests.

- Safety in road and rail tunnels, Basel, 23-25 novembre 1992, pp. 451-465.

9) R. LODEL, D. GABAY

Le CERCHAR étudie le comportement au feu d'une installation de ventilation de la RATP.

Rev. Générale de Thermique n° 315-316, mars-avril 1988, p. 270-277.

10) J.P. PINEAU, C. CWIKLINSKI, G. MARLAIR, C. MICHOT

Evaluation of products emitted during accidental fires of dangerous substances. Paper submitted to E.R.91 "The technological response to dangerous substances accidents" 28-30th May 1991, Calgary, Canada.

ou C. CWIKLINSKI

L'essai en grand : une approche préventive pour l'incendie en milieu industriel

Revue Générale de Sécurité n° 97, octobre 1990, pp. 51-57.

11) E. CASALE, G. MARLAIR

Heptane fire tests with forced ventilation

Communication à l'International Conference on Fires in Tunnels
Boras, Suède, Octobre 1994.

12) F. MARLIERE, G. MARLAIR

Toxicity of fire smoke

European Research in International Fires, 2nd Seminar
16-19 Mai, Cadarache, France.

	kg	Volume Nm ³ à 0°C
CO	7,2	5,7
CO ₂	7,35	3,7
HCl	8,0	4,9
Cl ₂	9,0	2,8
NH ₄ Cl	87,7	36,7
N ₂ O	39,0	19,9
NO ₂	2,15	1,0
HNO ₃	36,0	12,8
N ₂	57,6 / 76,5	46,1 / 61,2
H ₂ O	238 / 215	291 / 268
Total	488	420

Tableau 4
Composition globale des fumées
(sur combustion 1 tonne d'engrais NPK, laissant 512 kg de résidus)

Temps d'exposition (min)		Température (°C)			Pression (mbar)	
27		31 - 32			- 2	
O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	HCN (ppm)	Suites (mg/m ³)
Les concentrations sont des moyennes sur la durée de l'exposition						
18	200	1,5	55	20	29-33	916

Tableau 5 : Essais d'inhalation de fumées provenant de mousse de polyuréthane : paramètres principaux d'exposition

**Figure 1 : CALCUL D'ÉCOULEMENT PERMANENT ANISOTHERME 3-D
SANS INCENDIE DANS UN TUNNEL.
COUPE TRANSVERSALE À PROXIMITÉ DE L'ENTRÉE (ZONE
D'ÉTABLISSEMENT DU PROFIL DE VITESSE)**

L'air entré à 0°C s'échauffe au contact des parois qui demeurent à + 5°C, ce qui crée des mouvements de convection.

Les flèches représentent la projection des vecteurs vitesse dans le plan xy (plan de section). Les lignes de contour minces correspondent à des valeurs de la composante axiale de la vitesse (suivant z) qui valent 2,2 m/s au centre, puis décroissent par pas de 0,2 m/s.

La ligne de contour épaisse correspond à une vitesse axiale égale à la vitesse débitante, soit 1,5 m/s.

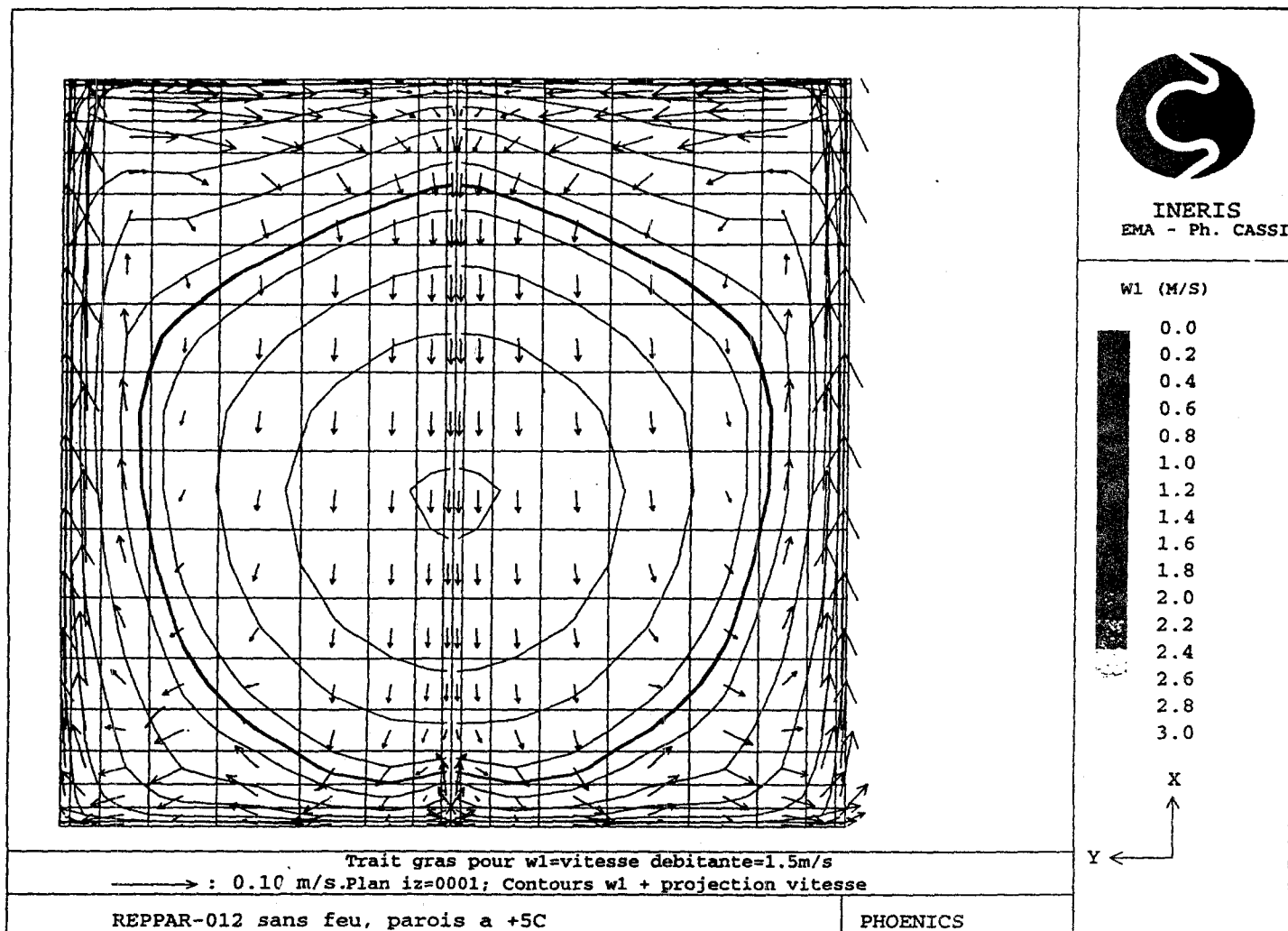
**Figure 2 : GALERIE INCENDIE INERIS ET SCHÉMA D'IMPLANTATION
DE L'ESSAI D'ENGRAIS TERNAIRES NPK ET DE L'INSTRUMENTATION**

**Figure 3 : ETUDE COMPORTEMENTALE : EVOLUTION DES CLASSES DE
COMPORTEMENT POUR LES TROIS LOTS D'ANIMAUX EXPOSES**

Remarque : La classe immobilisation (IMMO) est la plus sensible à l'état d'incapacitation. Les autres ne présentent pas de différence significative par rapport au témoin, bien que certaines d'entre elles montrent des variations logiques entre les deux types d'exposition.

**Figure 3 : ESSAI D'UN REFUGE INCENDIE DANS LA GALERIE INCENDIE
DE L'INERIS**

**Figure 4 : ELEMENT DE 70 m DE CANIVEAU - SIPHON - COLLECTEUR
SOU MIS A DES ESSAIS D'INCENDIE D'ESSENCE**



**Figure 1 : CALCUL D'ÉCOULEMENT PERMANENT ANISOTHERME 3-D
 SANS INCENDIE DANS UN TUNNEL.
 COUPE TRANSVERSALE À PROXIMITÉ DE L'ENTRÉE (ZONE
 D'ÉTABLISSEMENT DU PROFIL DE VITESSE)**

L'air entré à 0°C s'échauffe au contact des parois qui demeurent à $+5^{\circ}\text{C}$, ce qui crée des mouvements de convection.
 Les flèches représentent la projection des vecteurs vitesse dans le plan xy (plan de section). Les lignes de contour minces correspondent à des valeurs de la composante axiale de la vitesse (suivant z) qui valent 2,2 m/s au centre, puis décroissent par pas de 0,2 m/s.
 La ligne de contour épaisse correspond à une vitesse axiale égale à la vitesse débitante, soit 1,5 m/s.

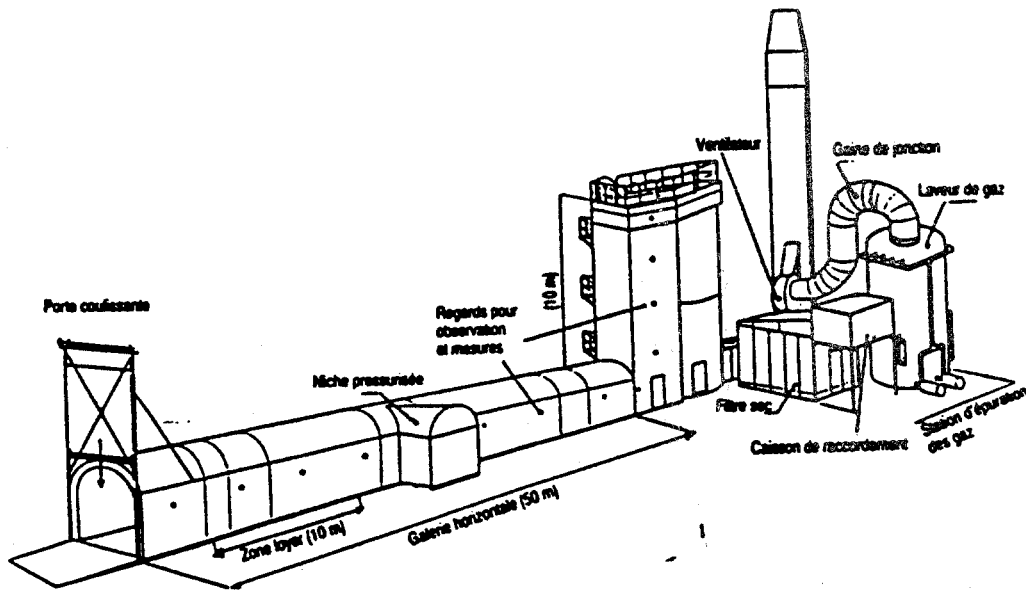
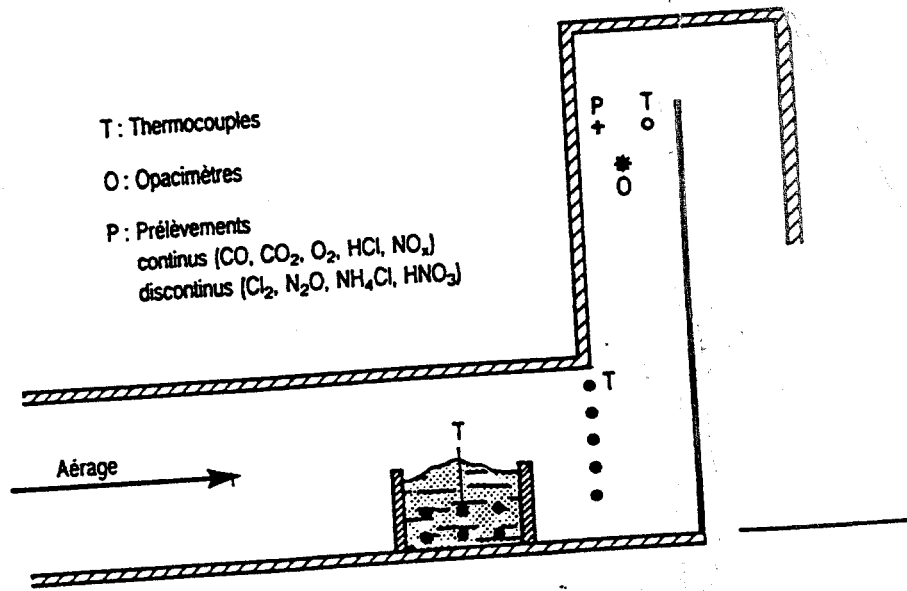


Figure 2 : GALERIE INCENDIE INERIS ET SCHÉMA D'IMPLANTATION DE L'ESSAI D'ENGRAIS TERNAIRES NPK ET DE L'INSTRUMENTATION



IMPLANTATION DE L'ESSAI D'ENGRAIS TERNAIRE NPK ET DE L'INSTRUMENTATION

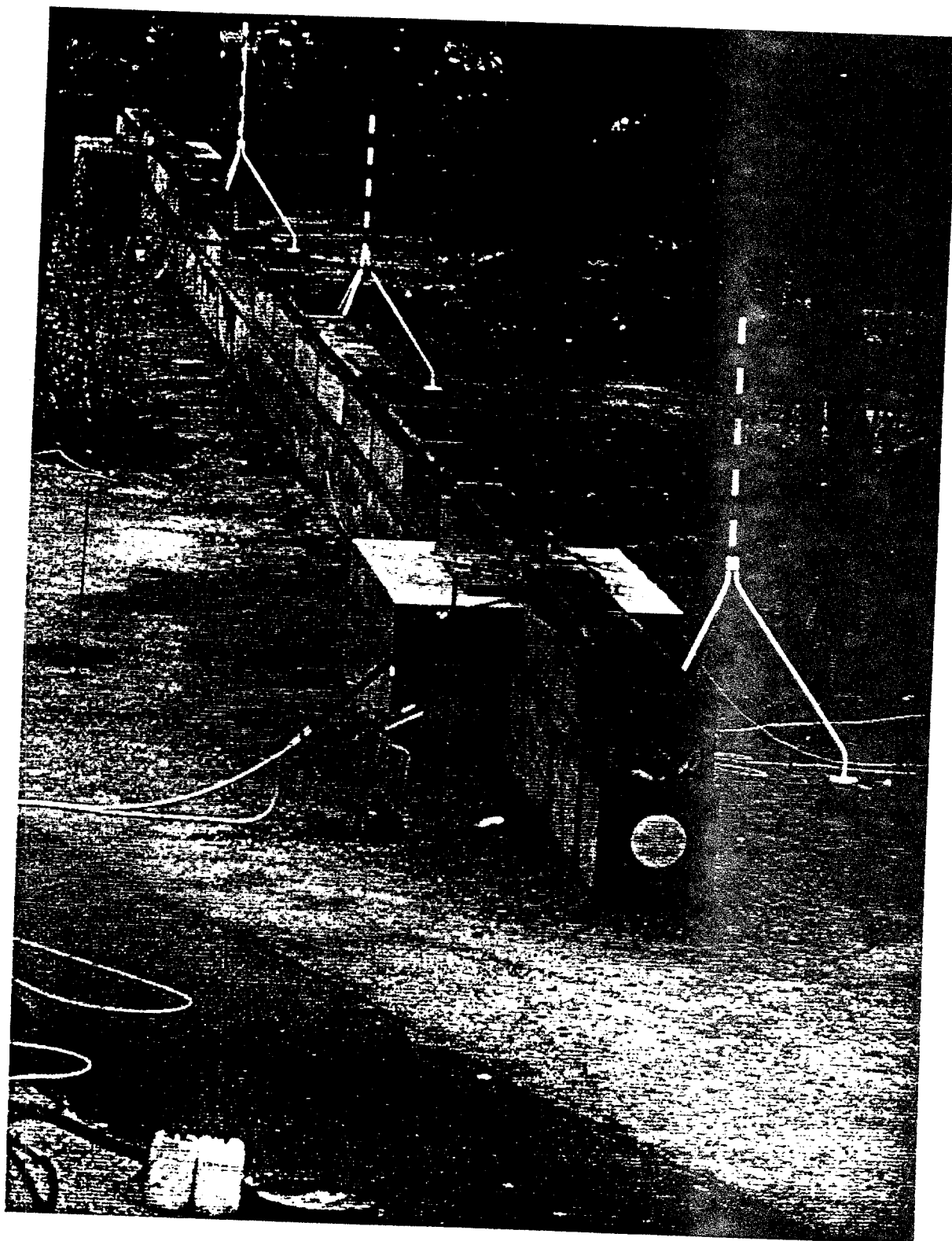


Figure 4 : ELEMENT DE 70 m DE CANIVEAU - SIPHON - COLLECTEUR
SOU MIS A DES ESSAIS D'INCENDIE D'ESSENCE

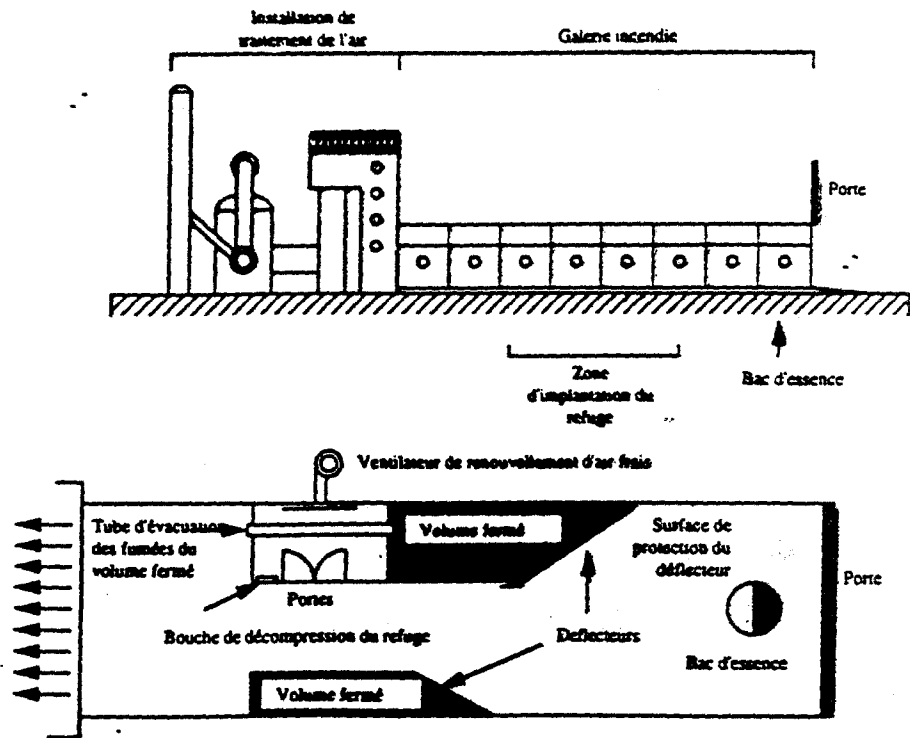


Figure 3 : ESSAI D'UN REFUGE INCENDIE DANS LA GALERIE INCENDIE DE L'INERIS