

# TRISTAN : sTRuctures Intrinsèquement Sûres aux Tirs d'Armes et aux eNgins improvisés

Benjamin TRUCHOT<sup>3</sup>, Fabien FOUILLEN<sup>3</sup>, François MONNOYER<sup>4</sup>, Alain ROUQUAND<sup>1</sup>, Ménad CHENAF<sup>2</sup>, Michel-Olivier STURTZER<sup>5</sup>, Jean-Luc MALAVAL<sup>6</sup>, Franck BERTIN<sup>7</sup>

<sup>1</sup>CEA Gramat, BP 80 200 46500 Gramat

<sup>2</sup>CSTB, 84, avenue Jean JAURES 77 447 Champs sur Marne

<sup>3</sup>INERIS, Parc Technologique ALATA, 60 550 Verneuil en Halatte

<sup>4</sup>Université de Valenciennes, TEMPO, Le mont Houy 59 313 Valenciennes Cedex 9

<sup>5</sup>ISL, 5, rue du Général CASSAGNOU BP 70034 68300 Saint Louis

<sup>6</sup>NKE, rue Gutenberg 56700 Hennebont

<sup>7</sup>SNCF, 34 rue du Commandant MOUCHOTTE 75699 Paris

Coordinateur : INERIS - [benjamin.truchot@ineris.fr](mailto:benjamin.truchot@ineris.fr)

**Résumé** – La protection des infrastructures critiques contre les actes de malveillance ou de terrorisme est un défi majeur du 21<sup>ème</sup> siècle. Les infrastructures cibles de tels actes sont variées et l'amélioration du niveau de sécurité globale de ces infrastructures nécessite de mieux caractériser leur vulnérabilité. Pour ce faire, le projet TRISTAN a permis de réaliser un catalogue de scénarios. Sur la base de celui-ci, des modélisations sont en cours de réalisation pour évaluer les conséquences sur les infrastructures identifiées. Ces modélisations permettront de proposer des mesures de réduction des effets pour les actes intentionnels.

Ces mesures seront applicables aux infrastructures critiques nouvelles ou existantes. Deux types de phénomène dangereux sont étudiés spécifiquement : l'explosion, phénomène transitoire rapide pour lequel les mesures proposées seront de type constructif et la dispersion toxique pour laquelle un outil d'aide au choix de la stratégie de ventilation analysant la situation en temps réel sera développé. Ces différents travaux permettront de proposer aux opérateurs et prescripteurs des solutions techniques et technologiques permettant de limiter les effets des actes intentionnels dans les infrastructures critiques.

Pour ces différentes infrastructures, une documentation spécifique sera rédigée et une étude de cas pour deux types d'infrastructures permettra d'illustrer la démarche proposée. Les études de cas concernent une gare ferroviaire et une station souterraine de transport guidé. Les opérateurs et les autorités sont associés au projet, à la fois en temps que partenaires mais également au travers du comité de pilotage. Trois séminaires seront réalisés au cours du projet réunissant l'ensemble des partenaires, les opérateurs ainsi que les autorités. Le premier a permis de présenter les résultats en termes d'analyse de la menace.

**Abstract** – Protecting critical infrastructure, in particular public spaces such as railway stations, airports, hospitals or high buildings, against terrorist attacks and other antagonistic acts is one of the major challenges of the 21<sup>st</sup> century. Improving their overall level of security requires a better characterization of the vulnerabilities of these infrastructures. To this challenge, TRISTAN aims at: • characterizing the threats with a "catalog" of significant scenarios: two families of antagonist acts (explosion and toxic release) was proposed; • developing a method for the vulnerability assessment for public areas and underground infrastructures, which can be applied for new installations as well as existing ones; • developing good practices or codes for the design of new public and underground infrastructures, and also existing ones, considering occurrence and consequences of malicious acts (processes and materials, technical systems, provision of architectural and interior design); • developing good practices or codes for the protection of new and existing infrastructures which will integrate technical measures (detection, sensors...) as well as organizational measures (procedures, emergency plans, evacuation...). Regarding the explosion phenomenon, which is highly transient, an action on the development of the phenomenon, ie the wave propagation, is impossible, has to be achieved thanks to constructive measures. On the opposite, toxic effluent dispersion kinetics is managed by the aerodynamics of the system. Considering this, it is possible to act on the phenomenon to reduce its intensity. Thus, to limit the effects of toxic dispersion, a tool will be developed to facilitate the choice of the better ventilation strategy available using a real time analyze of the situation. These stages will offer operators and specifiers of technical and technological innovative solutions to diminish the effects of acts of malice or terrorism on critical infrastructures. Similarities between the two studied infrastructures will be kept in mind during the project achievement ensuring that proposed measures to be compatible. For such facilities, specific documentation will be written and two real cases will sit the evidence adduced considering the two types of infrastructure considered in this project. The case studies concision to a train station and underground network station. Operators and authorities will be involved in the project, both as partner but also through the steering committee. Three seminars will be organized during the project involving all partners, operators and authorities. These seminars will ensure, at different key stages of the project, a match between needs and achievements. Results of threat analysis were presented during first seminar.

# 1. Introduction

## 1.1 Contexte

Protéger les infrastructures critiques (IC) telles que les espaces publics, les gares, les aéroports, les hôpitaux, les centres d'affaires ou les infrastructures souterraines (tunnels, métro...), contre les actes de terrorisme et de malveillance, est l'un des défis majeurs du 21<sup>ème</sup> siècle. Pour répondre à ce défi, le projet TRISTAN (ANR-CSOSG 2010) vise à :

- Développer une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de ces zones qui pourra être applicable aussi bien aux nouvelles constructions qu'aux constructions existantes ;
- Développer des bonnes pratiques et proposer des modifications des codes, pour la conception des nouvelles constructions comme pour les constructions existantes, en matière de :
  - limitation des effets d'actes de malveillance (construction, matériaux, aménagements) ;
  - mesures techniques, telles que la détection d'actes de malveillance, et organisationnelles (procédures, plans d'urgence, évacuation...)
- Proposer une documentation spécifique sur la sûreté de ces infrastructures ;
- Réaliser deux études de cas, l'une sur un espace public, la seconde sur une infrastructure souterraine en collaboration avec la SNCF ;
- Restituer les résultats du projet aux autorités en charge de la protection des infrastructures critiques et aux opérateurs.

TRISTAN est basé sur une approche à la fois théorique et pragmatique ; son objectif final est de fournir, aux autorités et aux opérateurs, une illustration de la vulnérabilité des infrastructures s'appuyant sur l'identification des risques et la modélisation des conséquences de ces phénomènes.

TRISTAN est organisé autour de quatre étapes principales. Dans un premier temps, est élaboré un catalogue des menaces de références, avec un accent sur les explosifs ainsi que sur la dissémination d'agents C ; il servira aux opérateurs pour évaluer la vulnérabilité de leurs installations. Dans un deuxième temps une méthodologie d'évaluation des vulnérabilités a été développée. Dans un troisième temps est réalisée une étude de cas sur une gare et une partie de réseau de transport guidé souterrain. En dernier temps, seront proposées des lignes guides et des bonnes pratiques pour la conception des IC (matériaux, etc.) qui seront mis à la disposition d'un public restreint composé d'opérateurs et des autorités.

## 1.2 Organisation du projet

Le projet TRISTAN est articulé autour de quatre tâches scientifiques, auxquelles s'ajoute la coordination du projet. Les quatre tâches techniques sont les suivantes :

Tâche n°1 : Définition des scénarii de menaces et quantification des effets.

Tâche n°2 : Elaboration d'une méthodologie d'évaluation des vulnérabilités pour les « espaces publics » et les infrastructures souterraines.

Tâche n°3 : Etude de cas sur deux infrastructures critiques existantes.

Sous tâche 3.1 : Etude de cas sur une gare de surface

Sous tâche 3.2 : Etude de cas sur une station souterraine de transport guidé

Tâche n°4 : Recueil et consolidation de bonnes pratiques de conception et de construction

Sous tâche 4.1 : Secteur « espace public »

Sous tâche 4.2 : Secteur « infrastructures souterraines »

Une tâche de dissémination et de communication a été ajoutée avec l'organisation de trois séminaires : le premier en début de projet a permis de valider l'expression de besoin ; le second pour une restitution sur les « espaces publics » et le dernier en fin de projet pour la dissémination des résultats du projet.

## 2. Tâche n°1 : Définition des scénarii de menaces et quantification des effets

L'objectif de cette tâche était de définir les données d'entrée qui serviront ensuite à l'évaluation de la vulnérabilité de l'infrastructure retenue pour l'étude des cas. Un classement des différentes infrastructures concernées a été réalisé. Ce classement définit les grands types pertinents pour le projet et a permis d'identifier leurs caractéristiques. Au delà de la définition des structures représentatives parmi lesquelles seront conduites les études de cas, cette étape a permis de présager les extensions qui pourraient être faites des résultats sur la base des similarités entre les infrastructures (volume, typologie de construction, ...).

Cette tâche a ensuite permis de réaliser l'inventaire des menaces qui seront prises en compte dans les scénarii. L'origine des menaces est essentiellement humaine. Lorsqu'elles se matérialisent, elles se caractérisent par des phénomènes dangereux qui évoluent dans le temps et

l'espace. Ces menaces sont de natures diverses, le projet se focalise sur les explosifs et le risque chimique. Les agressions différentes à considérer seront définies en termes d'intensité et de durée, ainsi qu'en termes sources pertinents que peuvent constituer notamment un Engin Explosif Improvisé (EEI) ou un Engin Chimique Improvisé (ECI).

En termes d'effets liés aux explosions, l'étude s'est focalisée sur les gammes de sollicitations à retenir qui correspondent à un domaine de recherche peu exploré, entre la dynamique rapide (chocs) et le sismique.

En termes d'effets liés à la menace chimique, des scénarii de références pour la contamination par des agents C qui tiendront compte de la typologie bâtementaire et de ses équipements (ventilation...) ont été proposés. Ces scénarii s'appuient notamment sur un classement des différentes substances sur la base de leurs propriétés intrinsèques. Ce classement est réalisé en fonction de la volatilité des produits, de leur masse molaire, mais également des seuils de toxicité. La Figure 1 montre la distribution des produits en fonction de leur toxicité, représentée par le seuil AEGL3 (Acute Exposure Guideline Levels), seuil permettant d'évaluer les effets létaux, et de leur pression de vapeur saturante.

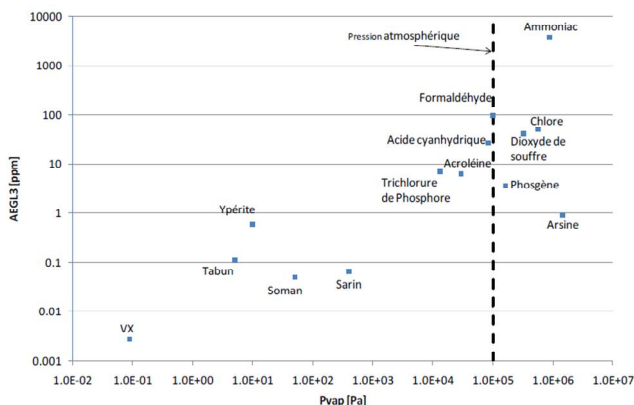


Figure 1 : Distribution des agents chimiques en fonction de leur masse molaire et de leur toxicité (AEGL3).

La pression de vapeur saturante est représentative de la volatilité du produit, c'est-à-dire sa capacité à produire des vapeurs. Cette courbe permet ainsi d'appréhender le niveau de dangerosité des différentes substances.

### 3. Tâche n°2 : Elaboration d'une méthodologie d'évaluation des vulnérabilités

Cette tâche avait pour objectif de proposer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures critiques de type « espaces publics » et infrastructures souterraines face aux menaces de malveillance et de terrorisme.

Deux dimensions de la vulnérabilité ont été évaluées : la vulnérabilité des infrastructures à un acte intentionnel ou à des actes multiples (effets domino) et l'altération (saturation) de la capacité de réponse en cas d'événement de grande ampleur.

L'analyse a portée sur les aspects organisationnels et techniques liés à la gestion des infrastructures et à leur protection face à des actes intentionnels.

L'évaluation utilise les concepts des approches systémiques. Elle se base sur des méthodes et outils de gestion des risques (analyse des risques, audit et retour d'expérience) qui intégreront la démarche systémique. Ces concepts et méthodes s'appliquent à la fois pour les risques accidentels comme pour les menaces [1]. La démarche identifiée s'organise selon l'architecture représentée sur la Figure 2.

La réalisation de cette tâche s'est appuyée sur les résultats de projets et contrats réalisés comme SECURE-SITE, IMPROVE (DG-JLS), REALEX [2], ASPIC [3] ou encore EGSISTES [4] (ANR-CSOSG) mais également sur des approches développées à l'étranger [5].



Figure 2 : Organisation de la démarche pour l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des vulnérabilités.

## 4. Tâche n°3 : Etude de cas sur deux infrastructures critiques existantes

Cette tâche consiste à appliquer la méthodologie développée sur deux types d'infrastructures critiques.

### 4.1 Sous tâche 3.1 : « Espace Public » de type gare ferroviaire

Il s'agit, pour la première partie de la tâche 3, de l'application de la méthode développée au point précédent à une gare ferroviaire.

Les scénarii précisés par la méthode (nature des agresseurs/menaces/modus operandi) sont croisés avec les éléments constitutifs de la Gare afin d'en mettre en évidence les vulnérabilités spécifiques. Elles sont cotées en termes de « plausibilité » et de gravité (afin de les hiérarchiser). La plausibilité est définie au moyen de deux facteurs : la **Faisabilité** ou difficulté technique de réalisation d'une attaque et la **Vraisemblance** ou l'intention d'un agresseur ; cette information s'appuie sur l'évaluation de la menace.

Deux familles de scénarii sont étudiées : la dispersion d'agents chimiques toxiques (C), et l'utilisation d'explosifs.

Pour les scénarii de dispersion, l'ensemble des zones reliées autorisant l'accès au public sont prises en compte et maillées. Il s'agit dans le cas présent d'une zone d'attente et de transit des passagers, d'une galerie marchande, de tunnels d'accès aux quais, et d'une station souterraine de tramway, tels que présentés sur la Figure 3.

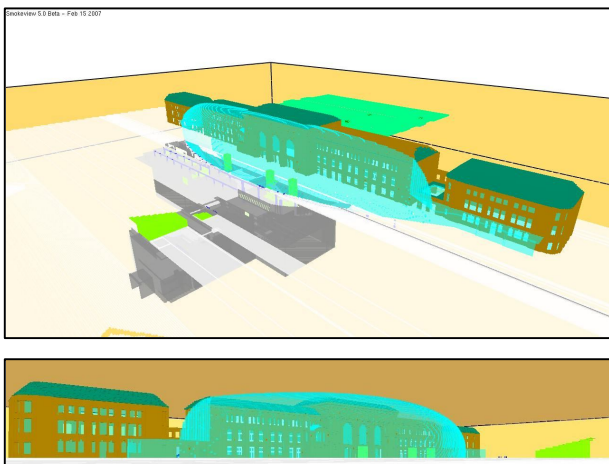


Figure 3 : Géométrie numérique de la gare ferroviaire utilisée pour la dispersion d'agents chimiques.

En fonction des scénarii retenus, ces modélisations permettront de déterminer les zones potentiellement impactées que ce soit à l'intérieur de la structure ou au niveau des ouvertures donnant accès aux espaces publics extérieurs. Le comportement du nuage toxique sera étudié

en fonction des conditions de ventilation, à savoir en régime de ventilation standard établi, ou dans le cas de l'activation d'une stratégie de ventilation spécifique.

Pour les scénarii relatifs à l'utilisation d'explosifs, une étude spécifique est menée sur la stabilité des structures et sur les surfaces vitrées. Les signaux de pression (formes des ondes et propagation) sont déterminés pour chacun des scénarii envisagés et pour chacun des éléments de structure retenus ; la projection d'éléments de structure et l'onde résiduelle obtenue lors de leur éjection sont également étudiées. Cette étape permet in fine de définir la(es) zone(s) impactée(s), comme représenté sur la Figure

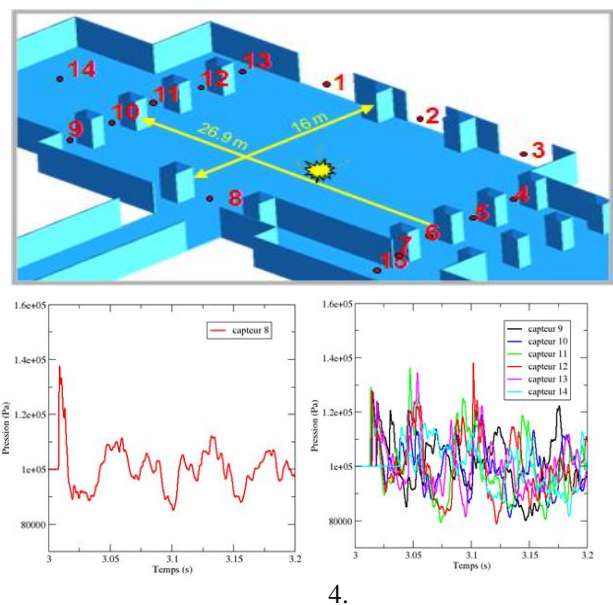


Figure 4 : Exemple de représentation des surpressions obtenues lors d'un scénario d'explosion.

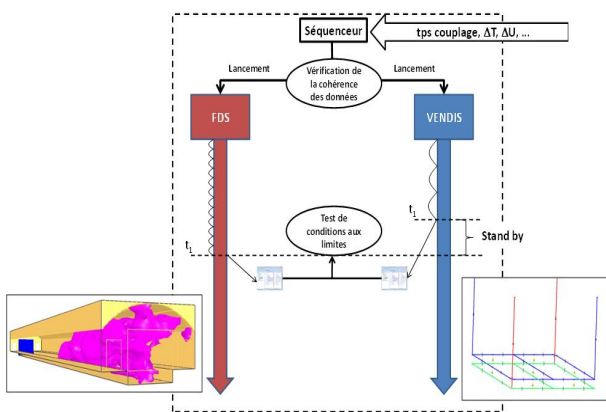
### 4.2 Sous tâche 3.2 : Infrastructure souterraine de transport

Cette tâche aura pour but d'illustrer l'application de la méthode d'évaluation des vulnérabilités à une infrastructure souterraine de transport de type station souterraine d'un réseau de transport guidé. Comme pour l'activité précédente, deux familles de scénarii seront étudiées : explosion et dispersion d'un agent C. De la même manière, les scénarii seront cotés en termes de « plausibilité » et de gravité afin de les hiérarchiser.

Afin d'évaluer les effets de pression résultants de la propagation d'une onde dans une infrastructure à géométrie complexe, il est important de capturer les différentes réflexions susceptibles de se produire. Cela nécessite de disposer d'un outil de simulation capable d'adapter automatiquement le maillage aux phénomènes physiques étudiés. Cette fonctionnalité impose d'effectuer une analyse des résultats de simulation à chaque instant afin d'adapter le domaine de simulation aux besoins. Cette étape s'appuiera sur les résultats du projet EGSISTES [4] (ANR-CSOSG).



Concernant la menace chimique la dispersion d'un agent C dans une infrastructure équipée d'un système de ventilation nécessite de coupler la modélisation de l'aérodynamique dans l'infrastructure avec la modélisation du réseau de ventilation. Pour le cas particulier d'une station sur un réseau de transport guidé, il est évident que l'ensemble du réseau ne peut pas être modélisé en 3D. Ainsi, la prise en compte de la modélisation de la dispersion d'un polluant dans une telle infrastructure nécessite de coupler un outil de modélisation 1D, capable de modéliser les débits et pression dans l'ensemble du réseau, avec un outil 3D pour la prédiction locale de la dispersion [6]. Afin de favoriser la diffusion des résultats et de rendre possible un couplage fort entre les outils de modélisation, un outil CFD libre sera utilisé en complément d'un outil de modélisation 1D développé par l'INERIS. La Figure 5 représente schématiquement le principe du couplage entre les outils 1D (VENDIS) et 3D (FDS) retenus.



**Figure 5 : Architecture de calcul pour la réalisation du couplage 1D/3D.**

Le schéma de fonctionnement retenu est une architecture de type client serveur avec un séquenceur agissant comme serveur auquel se connecte des clients (FDS ou Vendis). Ce séquenceur permet les échanges de données et en régle la fréquence tout en contrôlant la réalisation de chaque simulation.

## 5. Tâche n°4 : Recueil et consolidation de bonnes pratiques

L'objet de cette tâche sera d'étendre les résultats obtenus dans la tâche n°3 aux différents types d'infrastructures en s'appuyant sur les caractéristiques communes. Comme pour celle-ci, les volets explosion et dispersion d'agents C seront traités avec une application à deux types d'infrastructures : « Espace public » et Infrastructure souterraine de transport.

### 5.1 Sous tâche 4.1 : « Espace Public »

L'explosion est un phénomène extrêmement rapide pour lequel seules des solutions constructives peuvent être proposées dans le but de minimiser les effets des surpressions. Il peut s'agir de contrôler les phénomènes de réflexion et la capacité d'absorption de la surpression par le bâti mais également de protéger les éléments les plus sensibles du bâti.

Ces propositions seront déclinées pour les installations nouvelles comme pour les installations existantes pour lesquelles des exemples d'aménagements seront fournis.

Concernant les surfaces vitrées, des aménagements seront également proposés ; elles s'appuieront sur les travaux et essais menés par l'INERIS dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) et par le CEA de Gramat (travaux au profit d'un manufacturier dans le domaine des verres spéciaux).

### 5.2 Sous tâche 4.2 : Infrastructure souterraine de transport

Comme pour les espaces publics, il conviendra de proposer des solutions constructives dans le but de minimiser les surpressions en contrôlant les phénomènes de réflexion et la capacité d'absorption de la surpression par le bâti.

Si l'explosion peut difficilement être contrôlable en raison de sa violence, en revanche, la dispersion d'une substance chimique est contrôlée par l'aérodynamique dans l'infrastructure. A ce titre, il est possible de contrôler sa dispersion au moyen, des systèmes de ventilation et en pilotant de façon adaptée le mouvement des trains. Cette stratégie est utilisée pour évacuer, par exemple, les fumées d'incendie.

Cependant, si pour de tels phénomènes accidentels, il est possible d'élaborer des courbes standardisées, ce n'est pas le cas pour la menace terroriste. Une gestion efficace de la ventilation dans le réseau nécessite ainsi de reconstruire le terme source. Cette reconstruction peut être réalisée au moyen d'un réseau de capteurs judicieusement positionnés dans le réseau en utilisant une technique de modélisation inverse. Cela consiste à recueillir les données d'un nombre ajusté de capteurs de concentration et vitesse dans le réseau afin d'évaluer le débit de gaz à la source. Ce calcul utilise les techniques d'assimilation de données, actuellement utilisé pour la dispersion en champ libre et dont l'application aux structures confinées est un challenge.

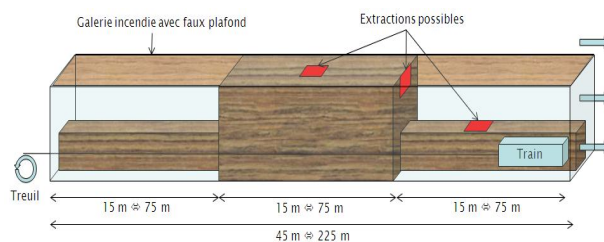
Il est évident, pour des raisons de coût, et donc d'industrialisation de la méthode, qu'il convient de minimiser le nombre de capteurs nécessaires ainsi que leur maintenance.

Pour ce faire, les résultats de la tâche 3 seront utilisés pour positionner un réseau de capteurs. Le terme source déterminé, il est alors possible, au moyen d'un outil 1D,

de simuler les différentes stratégies de ventilation en « mieux que temps réel » et de proposer ainsi à l'opérateur cette solution.

L'utilisation continue des capteurs présents dans le réseau permettra en outre de confirmer les résultats et corriger la stratégie, le cas échéant. Deux campagnes seront réalisées pour valider l'outil.

La première d'entre elle, expérimentale, sera réalisée dans la galerie incendie de l'INERIS. Cette galerie sera modifiée afin de reproduire une portion de réseau souterrain, suivant le schéma de principe présenté sur la Figure 6.



**Figure 6 : Schéma de principe de l'installation expérimentale.**

Cette section comprendra à minima une station et deux portions de tunnel à une échelle de l'ordre de 1/5.

La seconde campagne sera numérique. Les données de mesure seront fournies à des capteurs virtuels au moyen d'un outil de calcul 1D (vendis). Cette stratégie permettra de valider l'approche sur une configuration réaliste, incluant plusieurs lignes interconnectées comportant chacune plusieurs stations.

## 6. Conclusions

Le projet TRISTAN, retenu dans le cadre de l'appel à projet CSOSG 2010 de l'ANR vise donc à proposer des méthodes et des outils dans le but d'améliorer la protection des infrastructures critiques. Le projet s'appuiera sur deux études de cas, le premier pour une gare ferroviaire, le second sur une infrastructure souterraine, une station d'un réseau de transport guidé. Deux types de menace sont traités spécifiquement au cours du projet : le risque d'explosion d'un EEI et le risque chimique lié à l'utilisation d'un ECI.

Ce projet permettra d'élaborer une méthodologie d'évaluation des vulnérabilités pour les infrastructures nouvelles et existantes. Il permettra également d'établir des guides de bonnes pratiques en termes de construction pour minimiser les effets d'une explosion. Il permettra enfin de proposer le démonstrateur d'un outil d'aide à la gestion de crise en cas de menace de type C pour une infrastructure souterraine de transport « simple ».

## Références

- [1] S. Lim, F. Fontaine – Guide d'analyse de la vulnérabilité des sites industriels chimiques face aux menaces de malveillance et de terrorisme – Rapport d'étude DRA-08-65253-01473C – Février 2010 (mise à jour).
- [2] F. Fontaine, S. Lim, P. Deroi – REALEX - Évaluation globale des risques et des menaces. Expertise multidisciplinaire en temps réel pour la gestion des crises NRBCE - WISG 2009.
- [3] L. Dudragne, B. TRUCHOT, F. Vallée, D. Antoine et P. Cousin - Aide par la Simulation à la Protection d'Infrastructure Critique (ASPIC) - WISG 2010.
- [4] B. Truchot, M. William-Louis, A. Benselama, L. Fournier, P. Armand et A. Boucard, EGSISTES : Evaluation Globale de la Sécurité Intrinsèque des Systèmes de Transport En Souterrain – WISG 2010.
- [5] FEMA 452 - A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, Janvier 2005.
- [6] B. Truchot et S. Duplantier – Towards 1D/3D coupling for fire and ventilation modelling in large underground infrastructures?, ISTSS 2012, NewYork.