



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

**Mise au point d'un outil de
simulation de situations
accidentelles en réseaux souterrains**

BCRD
Rapport final synthétique

Autorisation de programme 1997 – Subvention n°
97-028 notifiée le 27 juin 1997 (décision modificative
du 21 août 2000)

Direction des Risques Accidentels

Juin 2001

Mise au point d'un outil de simulation de situations accidentelles en réseaux souterrains

B C R D

Rapport final synthétique

Autorisation de programme 1997 –
Subvention n° 97-028 notifiée le 27 juin 1997
(décision modificative du 21 août 2000)

JUIN 2001

**PERSONNES AYANT PARTICIPE A L'ETUDE
E. RUFFIN – S. DAERON; L. FOURNIER, E. DANIN**

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	E. RUFFIN	Y. MOUILLEAU	B. FAUCHER
Qualité	Ingénieur à la Direction des Risques Accidentels	Unité PHEN Ingénieur à la Direction des Risques Accidentels	Directeur de la Direction des Risques Accidentels
Visa	<i>Signé</i>	<i>Signé</i>	<i>Signé</i>

TABLE DES MATIERES

1. RÉSUMÉ.....	3
2. INTRODUCTION.....	5
3. RAPPEL DES OBJECTIFS ET CHOIX INHÉRENTS AU PROJET.....	10
3.1 Rappels et évolution des objectifs	10
3.2 Choix concernant les développements numériques.....	11
3.3 Choix concernant les développements expérimentaux.....	13
3.4 Choix concernant les validations numériques et expérimentales.....	13
4. PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES TRAVAUX NUMÉRIQUES : NEW-VENDIS.....	14
4.1 Structure numérique de NEW-VENDIS.....	14
4.2 Fonctionnalité des divers modules de New-Vendis.....	15
4.2.1 <i>Le pré-processeur</i>	16
4.2.2 <i>Le processeur</i>	31
4.2.3 <i>Le post-processeur</i>	34
4.3 Le Couplage 1D/3D.....	37
4.3.1 <i>Architecture fonctionnelle</i>	37
4.3.2 <i>Implantation dans NewVendis</i>	38
4.3.3 <i>Réflexions sur le couplage avec Phoenix</i>	41
4.3.4 <i>Éléments informatiques</i>	43
5. PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES DÉVELOPPEMENTS EXPÉRIMENTAUX.....	47
5.1 Le laboratoire maquette	47
5.2 Le dispositif expérimental de validation du couplage 1D/3D	49
5.3 La maquette d'essai	50
5.4 Simulation des sources accidentelles (incendie, fuite de gaz).....	51
5.5 Principes des essais réalisés.....	52
6. PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES VALIDATIONS NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE.....	55
6.1 Validations numériques	55
6.1.1 <i>Cas d'un réseau avec un ventilateur</i>	55
6.1.2 <i>Validation du transfert thermique par convection et rayonnement</i>	56
6.1.3 <i>Validation de l'instationnarité</i>	57
6.2 Validations expérimentales.....	57
6.2.1 <i>Capteurs de pression</i>	58
6.2.2 <i>Capteurs de vitesse d'écoulement</i>	58
6.2.3 <i>Capteurs de concentration</i>	58
6.2.4 <i>Chaîne d'acquisition de données</i>	59

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	61
8. BIBLIOGRAPHIE	62

1. RESUME

L'INERIS est depuis des années un acteur important de la sécurité dans les installations industrielles.

Fort de cette expérience, l'institut a développé ce projet de recherche en axant son effort notamment sur la possibilité d'utiliser l'évolution de l'informatique actuelle afin d'ouvrir une nouvelle voie pour la simulation précise d'événements accidentels (hors explosion) en milieux confinés. Les enjeux sont clairement la sécurité dans les espaces souterrains [1] et notamment les tunnels, structures qui deviennent de plus en plus complexes.

Ce projet, qui recoupe certains des besoins associés à l'élaboration ou à l'expertise des Etudes Spécifiques de Dangers pour les tunnels routiers (nouveau contexte réglementaire français) vise les objectifs principaux suivants :

- améliorer l'évaluation des effets accidentels dans des ouvrages souterrains complexes,
- élaborer un couplage informatique d'un modèle unidimensionnel de ventilation en réseau avec un modèle tridimensionnel de calcul de dispersion (modèle CFD) de fumées d'incendie et rejets toxique.
- réaliser des cas tests expérimentaux afin d'obtenir des données de validation du travail de développement numérique,
- valider les développements réalisés.

Dans ces objectifs, le couplage informatique de codes de calculs de différentes natures se situe clairement comme la clé d'une évaluation améliorée des effets accidentels en milieux confinés. Ces effets sont la modification du comportement d'un ouvrage (ayant une ventilation plus ou moins complexe) du fait de la présence de la source accidentelle ainsi que l'impact de la variation du comportement de l'ouvrage sur la source accidentelle elle-même.

Dans ce projet, il a donc été mis en place un développement axé sur le couplage numérique de deux types de calculs :

- le calcul des réseaux de ventilation visant à estimer de comportement global d'un ouvrage,
- le calcul de la dynamique des fluides représenté par les équations de Navier-Stokes (code CFD) visant à bien prendre en compte le comportement local d'une source accidentelle.

Pour mettre en place ce couplage numérique et sa validation il a été créé :

d'une part, un nouveau code de calcul en réseau de ventilation – New-Vendis - dont l'architecture est adaptée pour échanger des informations avec un code de calcul externe (CFD ou autre) et permet la prise en compte de nombreux effets accidentels et naturels propres à un réseau de ventilation,

- d'autre part, une installation expérimentale dédiée à l'obtention de données de validation et plus généralement à la simulation d'effets accidentels à échelle réduite.

Enfin, les données expérimentales obtenues sont utiles à la validation des développements numériques mais constituent aussi, à elles seules, des premiers résultats intéressants vis-à-vis de la simulation à échelle réduite d'incendies en milieux confinés.

2. INTRODUCTION

Fort de son expérience dans le domaine de la sécurité, l'INERIS s'est intéressé à l'amélioration de l'évaluation des effets accidentels dans les espaces souterrains.

Dans le contexte où le projet a vu le jour (1997) il paraissait important d'améliorer les moyens de simulation des effets accidentels dans les ouvrages souterrains pour les raisons principales suivantes :

- il est important d'une part, de mieux prévoir les modes de fonctionnement et le dimensionnement des installations de ventilation et de divers éléments de sécurité permettant d'éviter les effets des phénomènes accidentels - ce qui conditionne pour partie le coût d'un ouvrage -, et d'autre part, de définir les actions à mener pour limiter les effets d'accidents,
- les différentes techniques de prévision des effets liés aux incendies et aux rejets gazeux accidentels ne sont applicables que pour des réseaux souterrains et des tunnels 'simples' en considérant des conditions limites simplifiées qui sont souvent peu représentatives de la réalité,
- les effets des accidents dans des ouvrages complexes (réseau de métro, grands tunnels ferroviaires ou routiers, bâtiments ou stockages souterrains...) sont pratiquement impossibles à prévoir, simultanément, avec un niveau de précision satisfaisant, pour la globalité du comportement de l'ouvrage et pour les effets locaux accidentels.

Pour bien comprendre le problème prenons l'exemple de l'incendie.

La simulation d'un incendie en ouvrage souterrain engendre de nombreux phénomènes physiques (dont certains sont encore mal connus) tels que bien sûr le réchauffement de l'écoulement d'air présent dans la galerie où il se trouve mais aussi la production de fumées. Ces deux caractéristiques de base vont alors être modulées selon que le courant d'air en galerie est fort ou faible, que les fumées se forment en une couche chaude (sont stratifiées) ou non ou encore que les fumées se propagent à contre-courant d'air (backlayering) ou non.

A ce stade, et si l'on ajoute le fait que l'incendie, de part sa puissance thermique, peut provoquer une variation de l'équilibrage des débits dans un réseau de ventilation (tirage thermique), on comprend alors que la simulation du seul phénomène incendie en ouvrage souterrain ne peut pas être réalisée à partir d'un seul type de code de calcul. A minima, il nécessite la prise en compte de **phénomènes globaux** (variation de débits d'air dans le réseau) et la prise en compte de **phénomènes locaux** (dispersion tridimensionnelle des fumées).

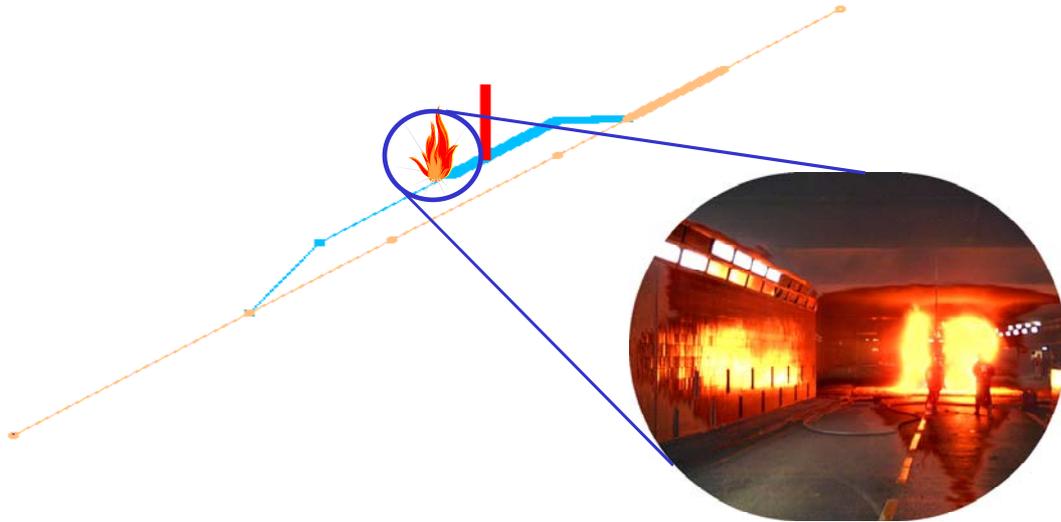


Figure 2—1: Exemple schématique de la notion de 'phénomènes globaux' d'un réseau de ventilation et de 'phénomènes locaux' liés à un événement accidentel.

En première approche, on peut analyser la simulation des effets de rejets gazeux accidentels en réseaux souterrains de la même manière : besoin de simuler des phénomènes physiques globaux et locaux différents faisant donc appel à des outils de simulation différents.

Plusieurs types d'outils répondent partiellement à la modélisation des effets d'un incendie cités précédemment [1], [2].

En théorie, les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics, [3], [4]) permettent de décrire l'ensemble des phénomènes puisqu'ils peuvent intégrer des modèles de combustion et de transferts thermiques fluides et solides. Cependant, ils ne sont utilisables que dans les cas simplifiés (zones d'écoulement de quelques dizaines à quelques centaines de mètres) pour des raisons de temps de calcul et de temps de préparation de ces calculs. De plus, ces outils de simulation demandent une utilisation prudente ainsi qu'une bonne maîtrise.

Pour palier au problème de temps de calcul, des modèles simplifiés, développés initialement essentiellement dans le cadre des incendies de bâtiments peuvent être utilisés [5]. Ces modèles, appelés 'modèles à zones', offrent une description simplifiée des phénomènes de stratification des fumées et peuvent prendre en compte des zones de panache thermique, de jets, de couches stratifiées... Ils sont basés sur une description analytique empirique des différentes zones du domaine de calcul simulé, d'où leur nom. On peut principalement leur reprocher de ne pas prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques d'un écoulement fluide du fait, généralement, de la non prise en compte du bilan de quantité de mouvement ou encore de l'instationnarité, et d'être réservés à des cas précis pour lesquels ils ont été validés. Dans ces cas, ils peuvent constituer une approche alternative intéressante aux modèles CFD suivant le niveau de précision demandé. Ils nécessitent généralement des temps de calculs très inférieurs à ceux requis par les modèles CFD, ce qui leur permet d'aborder la simulation d'écoulements dans des zones confinées de grandes dimensions.

Cependant, ni les modèles CFD, ni les modèles à zones ne sont capables de simuler l'équilibrage d'un réseau aéraulique complexe comprenant éventuellement la description de plusieurs centaines de galeries. Les modèles mono-dimensionnels en réseau (modèles 1D) sont faits pour cela. Initialement, ils ont pu être développés pour des problèmes de ventilation minière (c'est le cas à l'INERIS, [6]), de réseau de distribution (eau, gaz, etc) ou encore pour la gestion des réseaux hydrographiques. Ils sont basés sur la simplification mono-dimensionnelle des équations générales de Navier-Stokes. Ils permettent de tenir compte de façon simplifiée des effets moteurs ou dissipateurs d'énergie pour les écoulements fluides en réseau. Ils permettent en outre l'intégration de termes additionnels dans les équations de façon à tenir compte d'éléments particuliers pouvant être présents dans des réseaux de ventilation tel que des ventilateurs, des sas ainsi que, de façon simplifiée, d'effets accidentels.

Ainsi, pour palier au problème de la simulation correcte et simultanée des effets locaux et globaux - évoqués précédemment – il devient naturel de penser à l'exploitation des atouts de chacun des types de codes de calculs décrits brièvement ci-dessus soit : les modèle CFD, les modèles à zone et les modèles de réseau 1D.

La convergence de ces atouts passe par ce que nous appellerons par la suite le **couplage**. On entend par couplage une liaison, qui techniquement, est une liaison informatique entre deux codes de calcul différents et qui, phénoménologiquement, permet une simulation physique adaptée des différentes zones d'un écoulement global .

La notion de couplage est un point fondamental de ce projet autour duquel se sont articulés les principaux travaux.

Un autre point caractéristique des effets accidentels est que ceux-ci sont intrinsèquement transitoires [7]. En effet, une phase accidentelle de l'exploitation d'un ouvrage passe par :

- un contexte pré-existant,
- l'occurrence de l'accident et de son déroulement,
- les actions de protection mises en œuvre après détection de l'accident,
- la maîtrise des phénomènes engendrés par l'accident permettant le retour à une situation normale.

L'ensemble de ces phases représente un **scénario** accidentel. La bonne définition des actions d'exploitation à mener lors d'un scénario est un deuxième point fondamental permettant la limitation des effets d'un accident dans un ouvrage souterrain.

Ainsi, le projet a intégré dès le départ cet objectif qui nécessite de pouvoir prendre en compte des effets physiques très divers susceptibles de modifier la ventilation d'un ouvrage souterrain. Très concrètement, suivant l'ouvrage considéré, on devra savoir tenir compte d'action sur la ventilation mécanique, et d'autres éléments mécaniques divers, mais aussi de mouvements d'objets pouvant créer des déplacements d'air (ascenseurs, train, trafic automobile... en plus des effets naturels tels que le tirage thermique ou encore des différences de pression atmosphérique d'un endroit à un autre de l'ouvrage.

Les événements qui se sont déroulés au cours de ce projet (accidents du tunnel du Mont Blanc, du tunnel du Tauern, funiculaire de Kaprun) ont dramatiquement démontré l'importance d'une bonne maîtrise du déroulement d'un scénario accidentel et donc des outils qui peuvent contribuer à la prévision des effets thermiques ou chimiques qui peuvent survenir au cours de tels événements.

Ces accidents, ont été un des facteurs déclenchant de l'évolution rapide du contexte réglementaire français. On note ainsi, pour les tunnels routiers :

- la parution de la circulaire interministérielle n°2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels (d'une longueur supérieure à 300m) qui prévoit de nouvelles procédures d'autorisation, d'ouverture et de suivi des tunnels routiers français, et notamment la réalisation d'une Etude Spécifique des Dangers (ESD),
- la parution de la circulaire interministérielle n°2000-82 du 30 novembre 2000 relative à la réglementation de la circulation des véhicules transportant des marchandises dangereuses (VTMD) dans les tunnels routiers français, prévoyant notamment la réalisation d'une Analyse Comparative des Risques (ACR) que représente le TMD sur tel ou tel itinéraire,

Les conséquences directes de l'application de ces circulaires sont, hormis la réalisation d'ESD et/ou d'ACR :

- l'institution du Comité d'Evaluation de la Sécurité des Tunnels Routiers (CESTR), pièce centrale du nouveau dispositif réglementaire, qui doit donner un avis sur la maîtrise de la sécurité dans ces tunnels,
- la prise en compte, dans le dossier de sécurité de l'ouvrage, d'un avis d'expert sur l'Étude Spécifique des Dangers.

Les implications de ce nouveau dispositif réglementaire dans le domaine des transports sont nombreuses et rendent nécessaire l'évolution des moyens de réalisation et d'expertise des Etudes Spécifiques de Dangers. Le présent projet se place donc, dans ce contexte, comme une recherche permettant de développer de nouveaux outils capables d'aider à la réalisation d'ESD, et plus particulièrement à l'évaluation des effets des accidents de type incendie et rejets gazeux.

Notons, qu'un projet de loi relatif à la sécurité des infrastructures et systèmes de transport est en préparation (METL - dossier de presse du 21 mars 2001) et pourrait étendre les demandes actuelles relatives aux tunnels routiers au domaine ferroviaire.

Dans un contexte plus général de la sécurité en ouvrages souterrains, et de façon tout aussi importante, ce projet propose des développements pouvant être utiles à l'étude des possibilités de stockages réversibles ou irréversibles des déchets radioactifs dans les formations géologiques profondes (loi du 30 décembre 1991) ou encore à la prévention des risques miniers en cours d'exploitation ou après la fin de l'exploitation (loi du 30 mars 1999).

Par ailleurs, il offre également la possibilité d'évaluer le comportement de certains réseaux de canalisations présents dans le milieu industriel comme, par exemple, l'évaluation de fuites de réseaux gazeux en milieux confinés ou encore l'évaluation des performances de réseaux d'eau incendie.

Partant de ces constatations sur les objectifs fondamentaux du projet (le couplage) et des contextes potentiels de l'utilisation d'un tel futur outil, le projet a été organisé, pour inclure les travaux suivants :

- la création d'un nouveau code (1D) de calcul en réseau de ventilation –New-Vendis¹– ayant une architecture adaptée pour l'échange d'informations avec un code de calcul externe (CFD tridimensionnel ou autre) et permettant la prise en compte de nombreux effets accidentels et naturels adaptables à différents contextes d'utilisation,
- la réalisation de la mise au point du couplage 1D/3D et donc la définition des échanges d'informations à réaliser entre les deux codes de calculs pour aboutir à une simulation globale du réseau accidenté. Ce travail passe préalablement par la définition des techniques informatiques permettant ces échanges d'information détaillée ici.
- la validation physique des résultats fournis par l'outil 1D seul et le couplage 1D/3D comprenant plusieurs points importants :
 - les comparaisons numériques et expérimentales des résultats fournis par l'outil 1D, c'est-à-dire les calculs d'équilibrage de réseaux,
 - la création d'un nouveau moyen expérimental à échelle réduite,
 - la réalisation d'expériences dédiées à la validation du couplage 1D/3D,
 - la réalisation des comparaisons numériques et expérimentales concernant le couplage 1D/3D.

Le lecteur trouvera dans le présent rapport la présentation des différents travaux menés pour atteindre ces objectifs déclinés selon les quatre paragraphes principaux :

- rappel des objectifs et choix inhérent au projet,
- présentation synthétique des travaux numériques,
- présentation synthétique des travaux expérimentaux,
- présentation synthétique des validations numériques et expérimentales.

Enfin, il est utile de souligner que ce projet, qui aborde des concepts nouveaux quant à la simulation des effets accidentels d'incendie et de rejets gazeux en milieux confinés, a une vocation de recherche. Ainsi, les développements qui y sont faits et les résultats obtenus ne peuvent être directement appliqués dans un contexte d'ingénierie. Il n'en demeure pas moins que les développements réalisés dans ce projet l'ont été dans l'optique de permettre des évolutions à court terme dirigées vers des besoins d'applications.

¹ appelé aussi 'outil 1D' ou 'modèle 1D' ou 'outil de simulation' par la suite.

3. RAPPEL DES OBJECTIFS ET CHOIX INHERENTS AU PROJET

3.1 RAPPELS ET EVOLUTION DES OBJECTIFS

Très schématiquement, le projet consiste principalement à :

1. mettre au point un outil de simulation de situations accidentelles en réseaux souterrains nommé : New-Vendis,
2. réaliser et mettre au point le couplage (1D/3D) de deux codes de calcul (New-Vendis et Phoenix),
3. valider autant que possible les développements par voie numérique, théorique ou expérimentale.

Comme tout projet, le présent projet a dû faire face à un certain nombre d'aléas d'ordre interne ou externe. On citera principalement, en plus des difficultés techniques liées à la mise en place d'un nouveau laboratoire expérimental d'essais à échelle réduite, la participation importante de l'INERIS dans la gestion post-accidentelle, et de ces retombées sur le plan réglementaire, de la catastrophe du Mont Blanc (participation à l'enquête technique administrative, participation à la réalisation des essais incendie durant l'enquête pénale, participation à la rédaction de la circulaire 2000-63 du 25/08/00 instituant la réalisation d'Études Spécifiques de Dangers...). Ces différents aléas nous ont contraints à réaliser le programme prévu sur une période effective d'environ deux ans au lieu de trois. Cette réduction des périodes de réalisation des travaux a entraîné une révision des objectifs évoqués ci-avant de la façon suivante :

- concernant le travail sur le couplage :
 - les principes prévus pour réaliser ce couplage ont été étudiés,
 - la programmation et la validation des modes d'échanges d'information entre les codes de calculs ont été développés et testés,
 - la validation physique du couplage 1D/3D n'a pas été abordée ;
- concernant les essais expérimentaux :
 - les moyens de production de données de validation sont opérationnels et ont été qualifiés,
 - certains des essais nécessaires à la validation d'un couplage informatique 1D/3D ont été réalisés, des essais complémentaires seront nécessaires,
 - l'exploitation des essais été principalement faite dans l'objectif de mettre au point le processus expérimental et de s'assurer de l'obtention de données exploitables pour la validation du couplage de codes.

3.2 CHOIX CONCERNANT LES DEVELOPPEMENTS NUMERIQUES

Une partie du travail consiste à savoir calculer précisément la ventilation d'un ouvrage à l'aide d'une **modélisation mono-dimensionnelle** d'un réseau de galerie. Cette modélisation 1D doit également permettre de définir de manière détaillée un **scénario accidentel**. On rappelle tout d'abord que les effets accidentels considérés excluent les explosions. On s'intéresse donc principalement aux dangers tels que les incendies ou les rejets massifs de gaz. Pour ces deux effets, on s'intéresse donc à représenter le plus finement possible la propagation de fumées d'incendie ou de gaz dans le réseau souterrain. On considère dans la modélisation du réseau souterrain l'ensemble des effets physiques susceptibles d'influencer le comportement de ce réseau. Ces paramètres d'influence sont variables dans le temps de façon à obtenir des informations sur la dynamique du réseau et des effets accidentels qui sont transitoires par essence.

Un autre objectif que doit atteindre l'outil de simulation est qu'une partie de cet outil doit être capable de **représenter finement la zone accidentée** ce qui peut être atteint par l'emploi d'un **code tridimensionnel** (3D) qui apporte une meilleure description géométrique et physique du phénomène local considéré et donc de son impact sur l'équilibre du réseau de ventilation complet. Pour développer cette simulation il a été choisi dès le départ du projet de s'intéresser à la description de la zone accidentelle tridimensionnelle à l'aide d'un code de calcul de type CFD (Computational Fluid Dynamics), codes de calculs qui permettent la résolution des équations régissant le mouvement des fluides : les équations de Navier-Stokes. Comme il a été précisé en introduction à partir de l'exemple de l'incendie, ce type de code n'est pas le seul à pouvoir apporter un raffinement du comportement de la zone directement affectée par la source accidentelle (les modèles à zones peuvent également être envisagés), mais ce sont des codes largement répandus sur le marché et validés. De plus, certains offrent la possibilité d'ajouter une programmation faite par l'utilisateur qui est prise en compte dans le fonctionnement de l'outil commercial de base. Ces deux aspects sont importants pour l'ensemble du projet, et notamment le développement d'échanges d'information entre la partie monodimensionnelle de l'outil de simulation et la partie tridimensionnelle. Il a donc été choisi d'utiliser le code de calcul **Phoenics** pour aborder la simulation des effets tridimensionnels.

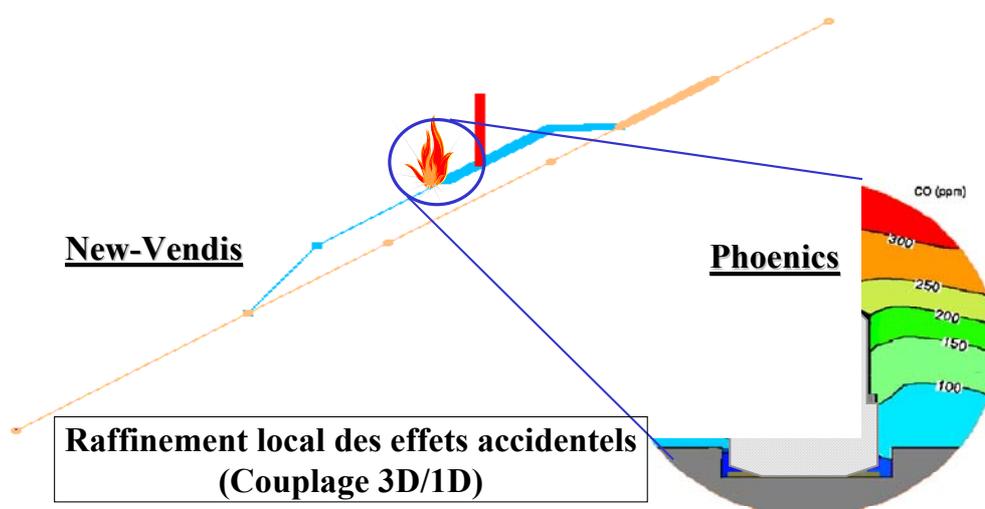


Figure 3—1 : Calculs tridimensionnels locaux réalisés à partir de Phoenics.

Nous vivons une évolution rapide et constante des puissances informatiques. On notera simplement que depuis le démarrage du projet (1997) la fréquence des horloges internes des ordinateurs de bureau a été multipliée au moins par un facteur quatre. Cette évolution rapide des puissances des ordinateurs a influencé les développements numériques dans le sens où il devenait envisageable de faire intervenir les codes CFD dans l'évaluation d'effets accidentels en réseaux souterrains tout en calculant avec un autre logiciel le comportement global de la ventilation de ces réseaux. Cette idée se renforcera à l'avenir puisque les puissances informatiques seront encore croissantes dans les prochaines années.

Aussi, l'évolution liée aux réseaux Intranet et Internet facilite les développements numériques où l'on fait appel à des besoins de communication. Sur ce point, le projet a un besoin évident : c'est la communication des informations entre un code de calcul 1D et un code de calcul externe (3D dans notre cas). Il était alors intéressant de prévoir une plateforme de développement permettant l'utilisation de ces connexions Internet. Une autre alternative était de développer l'ensemble des deux codes de calcul (1D et 3D) pour mieux maîtriser leurs échanges d'information, cette option a rapidement été abandonnée en début de projet. Celle-ci imposait des développements informatiques très lourds alors qu'il était a priori possible de réaliser un couplage de code 1D et 3D en utilisant un code 3D du commerce.

Ainsi, il a été recherché une plate-forme de développement conviviale permettant la gestion d'un gros projet informatique tout en aboutissant à une utilisation rapide et aisée des développements. Pour ces raisons, et l'INERIS ayant déjà eu avec cette plate-forme des expériences de développements informatiques importants dans le domaine de l'acquisition de données pour la dispersion atmosphérique, c'est le logiciel LabView qui a été choisi. Ce logiciel permet le développement de programme ayant une interface utilisateur conviviale (graphique) tout en offrant des fonctionnalités telles que : des bibliothèques mathématiques, la portabilité quasi transparente d'un système Windows à un système UNIX, la gestion des réseaux informatiques et des applications client/serveur, la gestion des systèmes d'acquisition de données...

Enfin, l'outil de simulation doit être capable de prendre en compte les apports respectifs du calcul de scénarios accidentels en réseau de ventilation (monodimensionnel) et la simulation fine de la zone accidentelle (fumées d'incendie et rejets gazeux tridimensionnels). Cette prise en compte dans la simulation globale, de la simulation 1D et de la simulation 3D est ce que nous appelons le Couplage des simulations 1D et 3D. Cette fonction de couplage a été intégrée dans l'outil NewVendis lui-même. NewVendis donc intègre à la fois, le calcul de l'équilibrage d'un réseau de ventilation ainsi que la prise en compte du couplage de codes de calculs de par l'orchestration des échanges d'informations nécessaires.

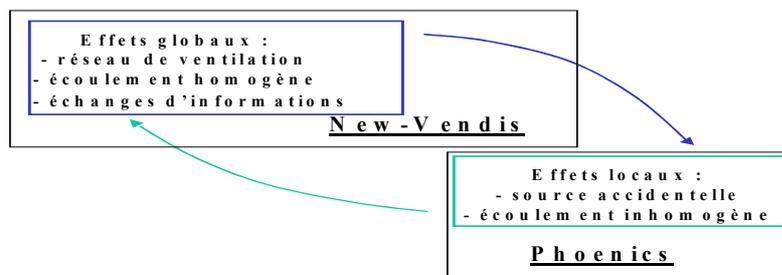


Figure 3—2 : Représentation schématique des rôles respectifs de NewVendis et de Phoenix.

L'ensemble des travaux de développements numériques est présenté plus en détail au § 4

3.3 CHOIX CONCERNANT LES DEVELOPPEMENTS EXPERIMENTAUX

Comme il a été introduit avant, les développements expérimentaux ont un objectif important de validation des phénomènes physiques pouvant être simulés grâce au couplage de codes de calcul différents. Il s'agit donc là d'un niveau de validation très fin où il s'agit de savoir estimer les erreurs provenant de la simulation du réseau de ventilation, celles provenant de la simulation de la zone tridimensionnelle de calcul et celles provenant de la représentativité des effets de couplage, sans oublier les incertitudes inhérentes au processus expérimental lui-même.

Objectivement, ce niveau de validation nécessite une maîtrise parfaite des données de validation et donc des expériences. Il a donc été choisi de développer à l'INERIS une maquette à échelle réduite permettant ce type de validation et une expérience dédiée à la validation du couplage 1D/3D.

Ces développements expérimentaux sont décrits au § 5.

Plus généralement, l'INERIS a choisi de développer l'activité de simulation à échelle réduite, cette activité étant un bon complément exploratoire des moyens d'essais en grand ainsi qu'un bon moyen d'obtention de données de validation numériques. L'expérience dédiée à la validation des développements numériques du présent projet a donc été installée dans un laboratoire spécialement conçu et construit durant ce même projet.

L'installation complète est également présentée au § 5.

3.4 CHOIX CONCERNANT LES VALIDATIONS NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES

Le problème étant de développer entièrement un nouveau code de calcul, les validations ont été menées pour les différents développements de base selon deux axes :

- des validations de modèles physiques à partir de résultats expérimentaux à petite ou à grande échelle,
- des validations de méthodes de résolutions numériques à partir de résultats analytiques théoriques ou bibliographiques

D'une façon générale, et de part l'architecture mise en place pour l'outil de simulation, les validations se rapportant à l'objectif 1 (Cf. § 3.1) se sont essentiellement portées sur la validation de l'implémentation de modèles physiques existants et de leur intégration dans l'outil global plutôt que sur le développement de nouveaux modèles physiques.

En ce qui concerne les validations se rapportant à l'objectif 2 elles ont finalement consisté principalement à la mise en d'une nouvelle expérience spécifiquement développée pour cet objectif (Cf. § 5). Les validations de cet objectif ont également porté sur les méthodes d'échange d'informations employées pour réaliser le couplage numérique de New-Vendis et de Phoenix. Le couplage numérique des codes est présenté au § 3.5.3.

Une partie des travaux de validation est présenté au § 6.

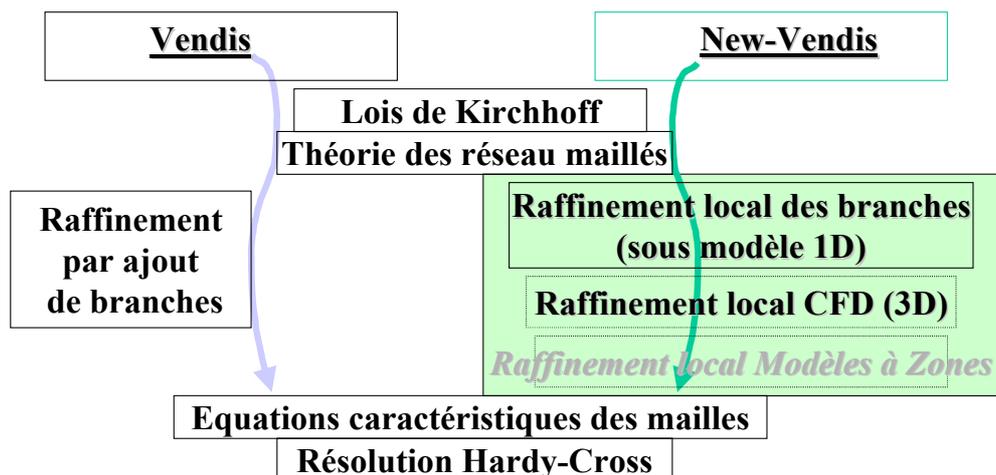
4. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES TRAVAUX NUMERIQUES : NEW-VENDIS

Originellement l'INERIS a développé, à partir de 1976, un programme de calcul de ventilation en réseaux souterrains nommé Vendis [6]. Ce programme est capable, dans sa dernière version, de simuler de façon simple un incendie. Cependant, comme il a été souligné au chapitre précédent, l'informatique a beaucoup évolué et les objectifs associés au présent projet ne sont pas compatibles avec un simple réaménagement du code *Vendis*. Il a donc été décidé de créer New-Vendis en étendant les capacités de l'ancien code de calcul et en intégrant au mieux les objectifs du présent projet.

On montre donc ci-après les principales caractéristiques de l'outil New-Vendis créé durant ce projet.

4.1 STRUCTURE NUMERIQUE DE NEW-VENDIS

La structure de New-Vendis est conçue pour pouvoir prendre en compte la simulation d'effets globaux (réseaux de ventilation) et d'effets locaux (effets accidentels). Dès le départ du projet, l'objectif de couplage de code a été intégré dans la structure. Le schéma ci-dessous montre la structure de Vendis (ancien outil) et celle de NewVendis.



Comme on peut le voir, dans les deux outils, le raffinement local de la description des effets d'une source accidentelle intéresse une partie centrale des codes de calculs. Dans le cas de *Vendis*, le raffinement de la solution se fait par ajout de branches contiguës dans le réseau maillé. De cette façon, le nombre de branches à prendre en compte dans la résolution du calcul peut devenir important. Aussi, dans le cas de *Vendis*, la prise en compte d'informations venant d'un autre code est complexe car le raffinement de la solution ne fait pas appel à d'autre modèle que le modèle général de 'propagation' de l'écoulement entre les branches du réseau. Il n'est donc pas possible de faire appel à un modèle physique particulier dans une branche et à un autre modèle dans une autre.

Cette possibilité est intégrée dans New-Vendis. De ce fait la structure de l'outil est plus complexe mais elle permet le raffinement local de la solution par des modèles différents. En fait, dans New-Vendis le réseau est principalement construit comme étant les branches strictement nécessaires à la description du réseau et des points nodaux en associant un raffinement local de l'évaluation de la solution dans les branches désirées.

Ce raffinement local étant obtenu par une discrétisation des branches (modèle de raffinement 1D) ou un modèle externe. Dans les deux cas, et c'est là un concept très différent par rapport à *Vendis*. Le raffinement de la solution en un endroit du réseau revient alors à reporter l'information de l'effet du raffinement local aux nœuds de la branche concernée. Donc, conceptuellement, on reporte dans la méthode de résolution des réseaux maillés classiques, les informations données par un modèle de raffinement local de la solution.

Deux types de modèle de raffinement ont été considérés durant le projet :

- le raffinement local par modèle 1D, ce qui sera appelé couplage 1D/1D,
- le raffinement local par modèle 3D (couplage 1D/3D).

Structurellement, l'intégration du concept de report d'information aux nœuds d'une branche rend a priori possible l'utilisation d'autre modèle de raffinement local, tels que par exemple les modèles à zones.

4.2 FONCTIONNALITE DES DIVERS MODULES DE NEW-VENDIS

Du point de vue de l'utilisateur, la structure générale du code de calcul n'est pas différente de la plupart des outils de simulation et est composée :

- d'un pré-processeur,
- d'un processeur,
- d'un post-processeur.

Dans un premier temps, il s'agit pour l'utilisateur de décrire le réseau de ventilation en y déclarant les effets moteurs ou dissipateurs d'énergie pour les courants d'air et de fumées. Ensuite, il s'agit de prévoir un raffinement local du calcul, soit par le couplage 1D/3D, soit en discrétisant la zone proche de la source accidentelle tout en restant dans une description monodimensionnelle de l'écoulement (couplage 1D/1D). Cette description du cas de calcul est faite à l'aide d'un pré-processeur (intégrant un mailleur) qui est décrit au paragraphe 4.2.1.

Dans un second temps, il s'agit de réaliser la simulation d'un scénario. L'utilisateur procédera alors au calcul du scénario décrit avec le pré-processeur à l'aide d'un processeur qui permettra la définition des paramètres globaux du calcul tels que par exemple les températures ou pression de référence, le temps de simulation ou encore la définition du stockage des résultats. Le processeur est décrit au paragraphe 4.2.2.

Enfin, l'utilisateur peut faire appel à un ensemble de petits utilitaires permettant différentes analyses des calculs réalisés. L'ensemble de ces petits utilitaires est appelé post-processeur par la suite et est décrit au paragraphe 4.2.3.

4.2.1 Le pré-processeur

4.2.1.1 Généralités

Le pré-processeur permet d'une part la description de la géométrie du réseau de branches composant de réseau souterrain et d'autre part la déclaration des effets moteurs ou dissipateurs pour les courants aérauliques.

Commençons par la description de la géométrie. Tout d'abord, le réseau aéraulique est considéré comme étant un ensemble de branches connectées entre elles par des nœuds. Chaque branche est alors définie par un point de départ, un point d'arrivée et des points internes permettant d'affiner la description géométrique de la branche. Les paramètres pris en compte pour chaque branche sont également :

- son nom,
- son diamètre hydraulique,
- le périmètre de sa section droite,
- des coefficients permettant de calculer les pertes de charges linéiques ainsi que le transfert thermique.

Un exemple de boîte de dialogue permettant la déclaration d'une branche d'un réseau est donné ci-dessous.

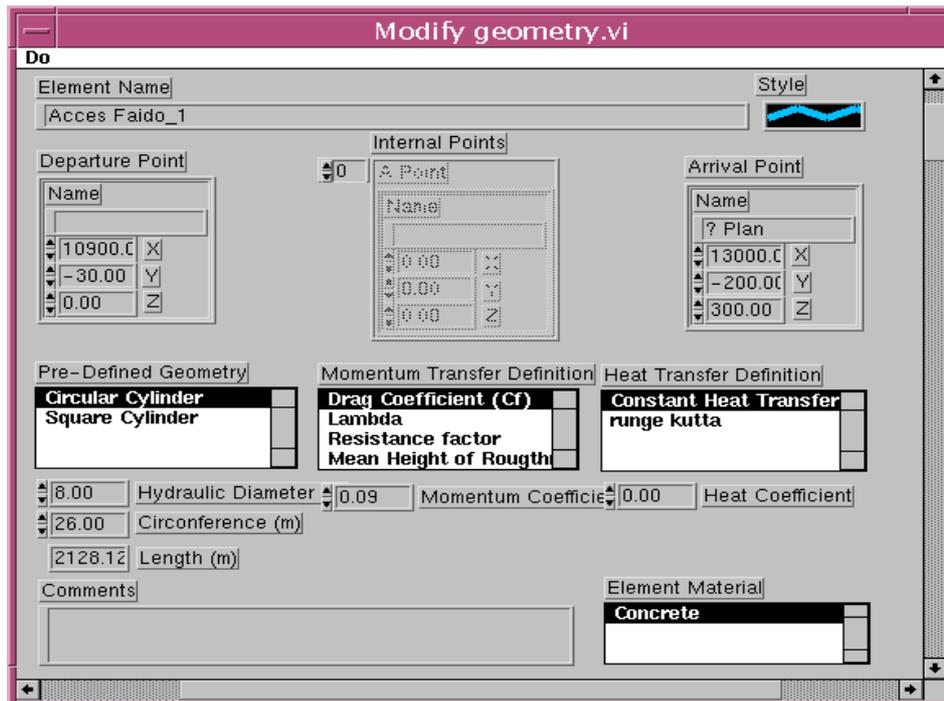


Figure 4—1 : Interface de définition des branches constituant le réseau.

D'autres méthodes plus rapides de déclaration des branches d'un réseau sont intégrées dans le mailleur tel que l'utilisation des curseurs et des méthodes de duplication de branches identiques, ajout/suppression de branches ou de points de discrétisation dans une branche, etc...

Le nombre de branche du réseau est uniquement limité par la mémoire disponible sur l'ordinateur. Notons d'ailleurs que ceci est vrai pour l'ensemble des fonctionnalités offertes par l'outil de calcul. En effet, le logiciel qui a été choisi pour le développement (LabView) gère l'allocation dynamique de la mémoire et n'a pas besoin que la taille des tableaux de données soit prédéfinie contrairement à l'ancien langage de programmation (Fortran 77).

On donne ci-dessous deux exemples de réseaux de ventilation : un tunnel bi-tube ferroviaire et un réseau minier.

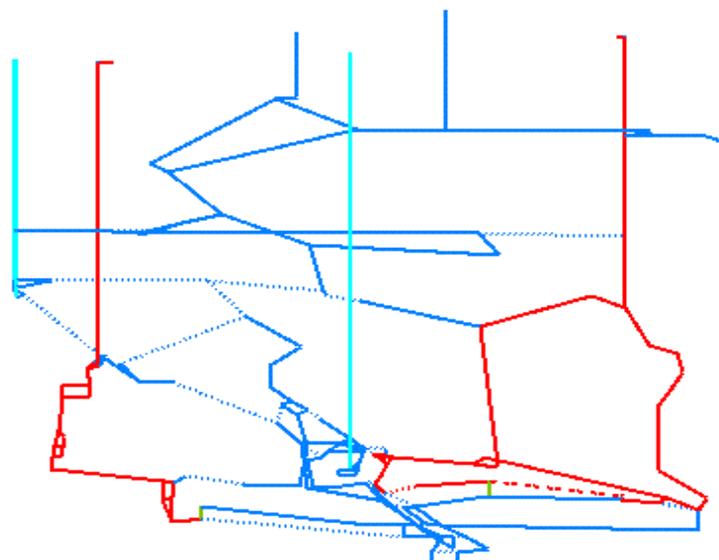
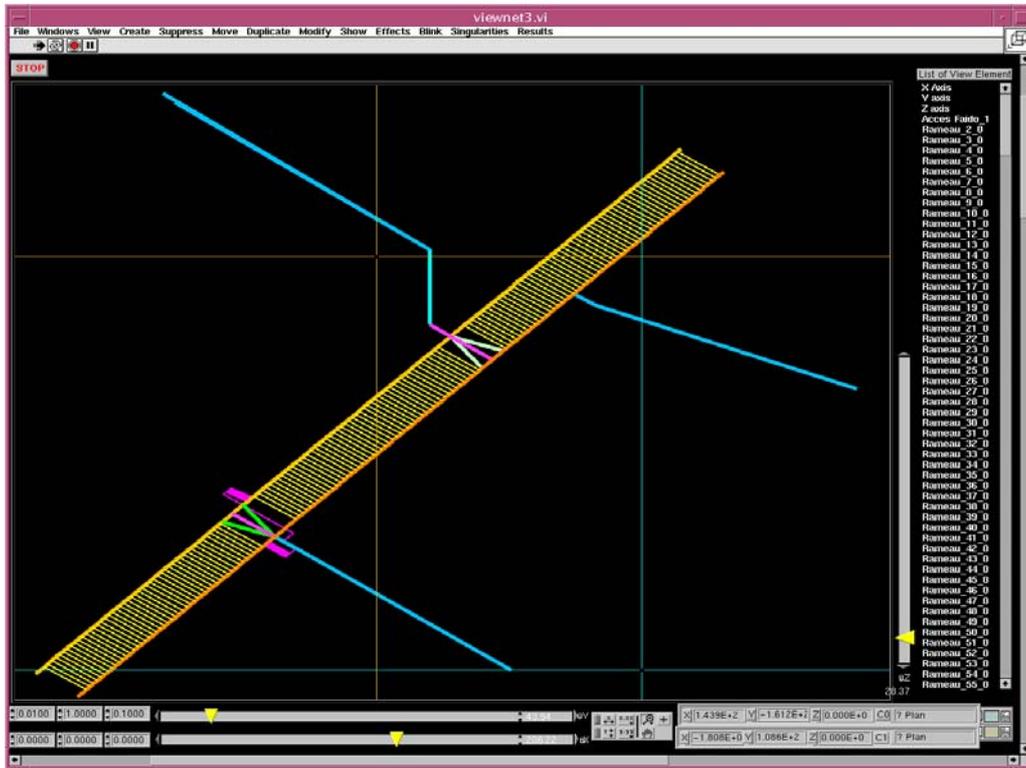


Figure 4—2 : Cas d'un réseau aéraulique de type 'tunnel bi-tube ferroviaire' et d'un réseau aéraulique de type 'ventilation de mine'.

Donc, à partir du pré-processeur, l'utilisateur peut réaliser toutes les opérations nécessaires à la description des galeries d'un réseau de ventilation, même complexe.

L'utilisateur peut également décrire les effets moteurs ou dissipateurs des écoulements parcourant le réseau de branches. Ces effets sont alors renseignés à l'aide de deux pointeurs sur les branches concernées. La présence de deux pointeurs permet de décrire des effets 'orientés' ou 'non orientés' ainsi que des effets 'mobiles' ou 'dynamiques*' au cours de la simulation. On entend par effets mobiles, des effets qui agissent sur des branches différentes du réseau durant la simulation, par exemple le déplacement d'un solide qui crée un effet de pistonement dans la branche où il se trouve à un instant donné et crée un effet similaire dans une branche adjacente l'instant d'après.

Les effets, dont le positionnement ne varie pas dans le temps sont aisés à déclarer. Les effets mobiles sont un peu plus complexes à définir car il s'agit alors de définir sur le réseau de ventilation les chemins que l'effet mobile est susceptible de parcourir. Le pré-processeur donne la possibilité de définir ces chemins. Pour l'instant l'on s'est uniquement intéressé à la description des effets de pistonement d'un mobile se déplaçant dans le réseau de ventilation mais les bases de la description à venir d'autres effets mobiles sont établies.

Les effets sont donc définis, à l'aide du pré-processeur, sur le réseau de galeries préalablement défini par l'utilisateur. Afin d'élargir au maximum les champs d'investigation possibles du présent projet et de ses applications potentielles futures, nous nous sommes intéressés à l'identification des réseaux fluides qu'il serait possible d'étudier et leurs principales caractéristiques en termes d'effets moteurs ou dissipateurs des mouvements fluides dans ces réseaux.

Parmi les types d'ouvrages, on a retenu :

- les mines,
- les stockages souterrains,
- les tunnels routiers,
- les tunnels ferroviaires,
- les procédés industriels à pression atmosphérique (séchateurs, fours...),
- les réseaux de canalisations à faible pression (gaz, liquide).

Pour ces ouvrages, on a considéré que les principaux effets naturels, d'environnement ou d'exploitation à prendre en compte seraient :

- les frottements en paroi, les transferts thermiques et les mélanges gazeux,
- les effets d'équipements et d'action d'exploitation (ventilateur, pompe, sas, clapets...),
- les effets de mouvement de mobiles (e.g. ascenseurs), de trafic (routier ou ferroviaire),
- les effets atmosphériques induisant des courants d'air naturels, tels que les différences de température ou de pression entre des points du réseau et l'extérieur.

Concernant les effets accidentels, on a considéré la possibilité de simuler :

- les incendies et les rejets gazeux se développant dans le réseau,
- les fuites de gaz ou de liquide émanant d'un réseau.

* Les effets dynamiques sont ceux que l'utilisateur ne peut pas définir complètement, car ils dépendent de l'historique de calcul et donc de la solution trouvée au pas de temps précédent.

Ensuite, la structure du code de calcul a été pensée de façon à pouvoir déclarer de façon homogène les différents effets (naturels, d'environnement, d'exploitation, accidentels) à prendre en compte dans un réseau ainsi que leur modélisation dans le calcul.

Dans ce but, les différents effets sont définis sous la forme de fichiers textes qui intègrent la description de la variation temporelle de chaque effet considéré au cours de la simulation (scénario d'effet). Dans les équations de la dynamique du réseau aéraulique, ces effets sont alors traduits sous la forme de termes supplémentaires à ceux présent dans l'équation de base (équation monodimensionnelle de la quantité de mouvement) à l'aide de modèles physiques influençant une ou plusieurs des variables de l'écoulement :

- le débit,
- la pression,
- la densité du fluide éventuellement dépendante de :
 - la température,
 - la composition chimique du fluide circulant dans le réseau aéraulique.

Chaque effet intègre à l'origine le concept de **scénario**. Un scénario traduit le caractère instationnaire de l'effet que l'on veut prendre en compte, comme par exemple la mise en route d'un ventilateur, l'ouverture d'une trappe d'extraction..., phénomènes qui sont importants pour la modélisation d'une situation accidentelle qui est par définition **transitoire**. Certains effets, les effets mobiles, sont en plus variables dans l'espace, c'est-à-dire qu'ils ont une position variable dans le réseau de ventilation en fonction du temps.

On donne ci-dessous le format type de ces fichiers de scénario d'effet :

Ligne d'information concernant l'effet				
type d'effet	0	sous-type d'effet	0	
Lignes d'information concernant l'effet				
"				
Lignes d'information concernant l'effet				
	paramètre n°1	paramètre n°2	paramètre n°3	
	variable dans le	variable dans le	variable dans le	
temps (s)	temps	temps	temps	etc...
0	100.00	1.00	2.50	
60	100.00	2.00	2.50	
90	100.00	3.00	2.50	
120	10.00	4.00	2.50	
10000	50.00	5.00	2.50	

On peut donc voir que les fichiers d'effets contiennent :

- une information sur leur type et leur sous-type, le sous type représentant généralement une variante du type d'effet,
- des lignes d'informations pouvant contenir, par exemple, des paramètres numériques donnant des valeurs (constantes durant la simulation) utiles à la caractérisation de l'effet pour le modèle physique considéré,
- et enfin, des colonnes donnant les valeurs utiles à la caractérisation des variations temporelles de l'effet durant la simulation (scénario de l'effet).

Un principe général a été adopté. Chaque effet se cumule dans les équations caractéristiques des branches comme un terme source ajouté à l'équation de base à l'exception des effets dits 'imposés'.

Les effets imposés permettent de fixer dans une branche des caractéristiques désirées arbitrairement (e.g. débit, concentrations ou température), ces variables ne sont alors pas le résultat de la recherche de la solution d'une équation caractéristique ou de l'équilibre du réseau de ventilation mais sont directement 'forcées' à la valeur désirée. La possibilité de fixer arbitrairement les caractéristiques principales de l'écoulement dans des branches peut être utilisée dans la réalisation du couplage 1D/3D (Cf. § 3.5.3.).

Les autres effets (cas général) contribuent chacun à la solution de l'écoulement via la résolution du système d'équations indépendantes. On ne développe pas, dans ce rapport, de synthèse quant à la résolution numérique des équations[8], [9], [10].

4.2.1.2 Effets naturels et d'environnement

On décline ci-après les différents effets naturels, d'environnement et d'exploitation développés dans NewVendis.

4.2.1.2.1 Saut de pression imposé dans une branche

On notera que le sens positif d'un saut de pression dans une branche du réseau (augmentation de la pression) est défini par l'utilisateur dans le pré-processeur à l'aide des curseurs. L'utilisateur peut imposer dans un scénario des sauts de pression comprenant à la fois des valeurs positives et négatives. Ainsi, on peut simuler avec cet effet une poussée naturelle (effet de vallée) ou mécanique (équipement générant un saut de pression) qui induira un courant d'air dans la branche. Cet effet est ajouté aux autres effets moteurs présents dans la branche concernée et dans le réseau, il participe à l'équilibre général de celui-ci.

Saut de pression	
type d'effet	3
sous-type d'effet	0
Temps (s)	DP (Pa)
0	7.5
200	40.0
500	70.0
10000	7.5

4.2.1.2.2 Ventilateur

La prise en compte des effets d'un ventilateur est déclarée dans le pré-processeur à l'aide du fichier suivant :

Ventilateur							
type d'effet	0	sous-type d'effet	0				
Regime maximum (tr/min)	1500	Regime minimum (tr/min)	400				
Caracteristique du ventilateur à	1500 tr/min						
Densite de reference	1.17 kg/m3						
Q (m3/s)	0		100	150	175	200	
H (mmCE)	1.34		1.34	1.34	1.34	1.34	
temps (s)	tr/min						
	0	10					
	50	200					
	100	600					
	150	800					
	200	1000					
	300	1200					
	10000	1200					

On remarquera que l'effet 'ventilateur' permet de rendre compte des caractéristiques principales de ce type de machine, soit :

- la prise en compte d'une courbe débit/pression caractéristique du ventilateur à un régime donné et à une densité de référence donnée.
- la conservation du débit volumique traversant le ventilateur pour un régime donné quel que soit la densité du fluide le traversant.

Comme pour les autres effets, le scénario est décrit par la variation du régime de ventilation pour lequel est calculée la courbe caractéristique correspondante en se basant sur la courbe caractéristique donnée par l'utilisateur pour le régime de rotation de référence.

4.2.1.2.3 Fonction de singularité

Cet effet permet la prise en compte d'une fonction de perte de charge dans une branche du réseau dépendante de la valeur de la pression dynamique et du sens de l'écoulement dans la branche. Cet effet permet de simuler les caractéristiques de perte de charge de certaines singularités comme les fuites, les rétrécissements/élargissements brusques.

Il existe de nombreuses caractéristiques de singularités. Nous n'avons pas cherché dans ce projet à implémenter l'ensemble des caractéristiques de tel ou tel élément mécanique particulier mais plutôt donner la possibilité de définir un polynôme général qui pourrait être représentatif de la singularité désirée. On modélise alors la perte de charge singulière par la fonction suivante :

$$\Delta P = \zeta P_{dyn} = \sum_i a_i x^{b_i} P_{dyn}$$

$$\text{avec } P_{dyn} = \frac{1}{2} \rho u^2$$

ζ = singularité (sans dimension),
 a_i, b_i = constantes et exposants de la fonction de singularité,
 x = paramètre variable dans le temps représentant les effets transitoires.

Perte de charge singulière orientée et dépendante de Pdyn		
type d'effet	3	sous-type d'effet
zeta+ (a_i+ , b_i+ , ...)	0.5	1
zeta- (a_i- , b_i- , ...)	1	0
Temps (s)	x	
	0	1
	60	1
	61	1
	62	1
	2401	1
	3000	1

Cette fonction permet de définir des singularités complexes ou relativement simples comme l'exemple qui est présenté ici. Cet exemple représente l'effet d'un élargissement brusque dans un sens et l'effet d'un rétrécissement brusque dans l'autre sens. C'est une façon simplifiée de prendre en compte un effet de tête de tunnel dans une simulation où le sens de l'écoulement dans le tunnel est inconnu a priori.

Notons toutefois qu'il s'agit d'être prudent dans l'utilisation de cet effet car une singularité forte peut conduire à bouleverser rapidement l'écoulement d'un réseau (ouverture / fermeture de porte) et rendre instable la solution du calcul. Sur ce point, des méthodes numériques permettraient de résoudre ces difficultés mais ce travail n'a pas été abordé dans ce projet.

4.2.1.2.4 Pistonnement d'un mobile sur un chemin

La mise en place d'un modèle de pistonnement d'un mobile fait appel à la notion de chemin. Le pré-processeur permet de définir un chemin comme une suite orientée de zones². L'effet est donc considéré mobile le long d'un chemin. Le scénario de l'effet définit sa vitesse de déplacement dans le temps et donc indirectement sa position sur le chemin. On sait ainsi dans quelle branche du réseau et à quel endroit du réseau s'applique l'effet mobile.

Cet effet est exprimé en utilisant un effet élémentaire tel que le saut de pression pour le pistonnement.

Le modèle de pistonnement de mobile a été développé sur la base de celui proposé pour les trains par Maeda *et al* [11] soit :

$$D_{tr} = \frac{1}{2} \rho S_{tr} \left\{ (C_{tr} + R) \left(\frac{u - u_{tr}}{1 - R} \right)^2 - \frac{\lambda_{tr}}{d} \frac{(u - Ru_{tr}) \cdot |u - u_{tr}|}{(1 - R)^3} + \frac{\lambda_{tr} l_{tr}}{d_{tr}} \frac{(u - u_{tr})^2}{(1 - R)^3} \right\}$$

avec :

² Une zone est dans ce contexte une fraction de chemin. Cette notion est donc très différente de la notion de zone de couplage 1D/3D.

- $R = S_{tr}/S$ le rapport des sections efficaces du train et du tunnel,
- ρ la densité de l'air,
- C_{tr} le coefficient de forme de la traînée du train,
- u et u_{tr} respectivement la vitesse de l'air et la vitesse du train,
- λ , λ_{tr} les coefficients de frottement du tunnel et du train,
- d , d_{tr} les diamètres hydrauliques du tunnel et du train,
- l_{tr} la longueur du train.

L'équation précédente permet de calculer D_{tr} la traînée aérodynamique du train. Dans [11], u est obtenue par un jeu de formules annexes. Dans New-Vendis, la vitesse u de l'air en galerie est directement évaluée par New-Vendis.

Ce modèle ne permet pas d'obtenir de résultats réalistes lorsque la vitesse de l'écoulement est proche de la vitesse du train. En effet, pour un écoulement presque aussi rapide que le train, la différence de pression calculée devient fortement négative. Cela n'est pas physique puisque le train a encore un effet d'entraînement sur l'air. Bien que l'air soit accéléré par le rétrécissement de section dans la partie annulaire entre le train et le tunnel, le train reste moteur sur une grande plage de vitesses. Le modèle de Maeda *et al* a été développé pour représenter la circulation rapide de trains. Le cas limite pour lequel la vitesse du train est du même ordre de grandeur que la vitesse de l'air est donc hors du domaine de validité de ce modèle.

Nous avons donc raccordé ce modèle à un modèle plus simple pour les faibles vitesses différentielles. Pour l'estimation de la variation de pression induite par le mobile, lors de faibles variations de vitesses, un simple calcul de perte de charge est alors effectué. La section alors considérée est la section libre entre le mobile et le tunnel.

$$D_{tr} = \frac{1}{2} \rho R (u - Ru_{tr}) \cdot |u - u_{tr}| \left(\frac{\lambda_{tr} l_{tr}}{d_{tr}} + \kappa_{tête} + \kappa_{queue} \right)$$

avec :

- $\kappa_{tête}$ et κ_{queue} les singularités en tête et en queue du train.

Les deux équations ainsi posées sont raccordées à leur 'point de croisement'.

On donne ci-après un exemple de fichier de déclaration d'un scénario de déplacement de train sur un chemin parcourant le réseau de ventilation déclaré par l'utilisateur (chemin n°1 dans l'exemple).

Scenario de déplacement de train						
Type	6		Sous-type	0		
Longueur vehicule (m)	Section vehicule (m ²)	Diamètre hydraulique (m)	Résistance vehicule (Cf)	Coefficient de tête	Coefficients de queue	
300	6	2.5	0.005	0.5	0.5	
Relative Time	Way	Velocity m/s				
0	1	0				
100	1	10				
500	1	20				
1000	1	20				
1500	1	10				
2000	1	0				

4.2.1.2.5 Modèle d'un trafic routier dans une partie du réseau

La circulation d'un grand nombre de véhicules dans un tunnel routier est un phénomène plus diffus et 'réparti' que le passage d'un train, et plus généralement d'un unique solide. En effet le grand nombre de véhicules et leur répartition dans l'ensemble de l'ouvrage n'est pas un phénomène local, bien qu'il reste localisé aux branches permettant la circulation.

Le positionnement de cette circulation dans le réseau est effectué de la même manière que pour le pistonnement d'un mobile, c'est-à-dire en utilisant la notion de chemin (chemin emprunté par le trafic routier). L'effet n'est pas de nature mobile puisqu'il n'effectue pas de déplacement dans le réseau. Cependant la valeur du pistonnement est susceptible de varier dans le temps. La création d'une congestion du trafic illustre bien cette problématique. L'effet doit être réévalué à chaque pas de temps en fonction des résultats du pas de temps précédent. Il est alors qualifié d'effet dynamique.

La circulation est représentée de façon moyenne. Pour cela, les véhicules sont triés par classes. Le format développé ici ne distingue que deux classes, les véhicules légers et les poids lourds. L'extension à un nombre de classes plus important reste possible en conservant le même schéma de calcul.

La densité de présence de véhicules permet de décrire la circulation pour chaque classe. Elle permet d'obtenir l'effet produit par l'ensemble de la circulation à partir de l'effet d'un seul véhicule. La variation de pression provoquée par un seul véhicule est donnée par :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \frac{S_v}{S_t} C_x (u_v - u) |u_v - u|$$

avec :

- ΔP variation de pression provoquée par la circulation d'un véhicule,
- S_v et S_t sections du véhicule et section du tunnel,
- C_x coefficient de traînée aérodynamique d'un véhicule,
- u_v et u vitesse de déplacement du véhicule et vitesse du courant d'air dans le tunnel,
- ρ masse volumique de l'air du tunnel.

La section du tunnel est généralement grande devant la section des véhicules, ce qui permet de négliger l'interaction avec les parois du tunnel. Cette approximation est satisfaisante pour des sections telles que : $S_v/S_t \leq 0,2$ si l'on considère de plus que l'espace entre les véhicules est suffisamment important pour que la perturbation occasionnée par un véhicule ne modifie pas l'effet du suiveur.

L'effet de pistonement provoqué par une circulation de véhicules est obtenu en sommant les contributions de chaque véhicule présent dans la partie du tunnel concernée.

On donne ci-dessous un exemple du fichier de déclaration d'un scénario de trafic routier.

Traffic Vehicules scenario									
Type	6		Sous-type		3				
LV section (m ²)	LV Cx	LV lenght (m)	HV section	HV Cx	HV lenght (m)				
	2	0.4	8	6	0.8	20			
Relative Time (s)	Veh. density+ (veh./km)	LV speed+ (m/s)	HV speed+ (m/s)	HV ratio+	Veh. Density- (veh./km)	HV speed- (m/s)	HV speed- (m/s)	HV ratio-	
0.00	1.00	19.44	13.89	0.16	1.00	19.44	13.89	0.16	
10000.00	1.00	19.44	13.89	0.16	1.00	19.44	13.89	0.16	

4.2.1.3 Effets accidentels

4.2.1.3.1 Débit imposé dans une branche

Imposer un débit dans une branche demande un traitement particulier au niveau numérique que l'on ne développera pas ici.

On donne ci-dessous un exemple de fichier permettant la prise en compte, dans une branche du réseau, d'un débit imposé dont l'intensité varie dans le temps. Le sens positif de l'écoulement imposé est donné à l'aide des curseurs du pré-processeur lorsque l'utilisateur demande la prise en compte de cet effet dans la branche.

Effet de débit imposé			
type d'effet	4	sous-type d'effet	0
Temps (s)	Débit (kg/s)		
0	-50		
60	-20		
61	50		
2400	100		
2401	200		
3000	200		

4.2.1.3.1.1 Débit et concentrations imposés dans une branche

Cet effet permet de simuler de façon simplifiée une fuite massive de gaz ou d'un mélange de gaz. Dans cet effet, on prend alors en compte un débit massique du rejet gazeux ainsi que la composition du mélange de gaz. A cette fin, des propriétés de différents gaz purs sont à renseigner dans New-Vendis. A ce jour il n'y a pas, a proprement parlé, de base de donnée des produits gazeux dans New-Vendis. Cependant, les lois concernant le calcul des propriétés de mélanges de gaz ont été implémentées de façon à pouvoir simuler l'injection de produit gazeux dans un réseau, et en tout point du réseau de ventilation, de pouvoir recalculer les propriétés physiques de base du mélange gazeux, soit : la composition en terme de concentrations massiques, les chaleurs spécifiques, la viscosité, la densité...

La simulation d'un rejet gazeux se fait en deux temps :

- l'utilisateur crée tout d'abord une branche d'injection factice,
- ensuite, l'utilisateur déclare dans cette branche un effet de type 'débit et concentrations imposées'.

L'outil de calcul prendra alors en compte l'injection désirée par la lecture du scénario d'injection que l'utilisateur aura préalablement préparé.

Le scénario d'effet porte ici sur le débit et la composition du mélange de gaz qui peuvent varier dans le temps.

Débit et concentrations imposées													
type d'effet	4	sous-type d'effet 1											
Scénario		Concentrations											
Temps (s)	débit (kg/s)	airsec	O	O2	Azote	Héliu	CO2	CO	H2O	Liq	SO2	HCN	HCL
0	20		0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0
60	20		0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0
61	20		0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0
2400	20		0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0
2401	20		0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0
3000	20		0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0

4.2.1.3.2 Débit, puissance thermique et concentrations imposées dans une branche

Dans le type d'effet injection d'un débit, il est également possible d'associer la dissipation d'une puissance thermique réchauffant de courant d'air circulant dans la branche ou au contraire le refroidissant (puissance négative).

Débit, puissance thermique et concentrations imposées														
type d'effet	4	sous-type d'effet 2												
Scénario		Concentrations												
Temps (s)	débit (kg/s)	puissance (MW)	airsec	O	O2	Azote	Héliu	CO2	CO	H2O	Liq	SO2	HCN	HCL
0	20	5	0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
60	20	10	0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
180	20	15	0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
240	20	20	0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
2401	20	20	0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
3000	20	20	0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0

4.2.1.3.3 Puissance thermique dissipée dans une branche

Cet effet est un développement de base ayant servi au développement du traitement réaliste d'un effet d'incendie (impact thermique et toxique).

Il consiste à dissiper une puissance thermique (scénario de puissance) de façon à en évaluer l'impact thermique sur le réseau de ventilation. Notons, que l'impact thermique se fait principalement en combinant quatre phénomènes physiques différents dans le réseau de ventilation :

1. réchauffement du flux de gaz circulant dans la branche concernée,
2. propagation du flux réchauffé,
3. échange de chaleur entre le fluide et les parois,
4. tirage thermique lorsque les galeries sont en pente.

L'échauffement du fluide circulant dans le réseau est calculé au point d'injection de cette puissance thermique et considérant un mélange homogène de la puissance thermique dissipée dans l'écoulement par :

$$\Delta T_{fl} = \frac{10^6 P_{thermique}}{Cp_{fl} Qm_{fl}}$$

où ΔT_{fl} est l'écart de température homogène générée immédiatement à l'aval de l'incendie, $P_{thermique}$ est la puissance thermique convectée de l'incendie, Cp_{fl} la capacité calorifique du fluide présent à l'amont aéraire de l'incendie et Qm_{fl} le débit massique circulant dans la galerie où a lieu l'incendie.

Cet effet est obtenu en utilisant de façon simplifiée (pas de dégagement toxique) l'effet d'incendie, on arrive alors à un fichier d'effet paramétré comme ci-dessous :

Incendie		Concentrations														
type d'effet	5	sous-tyr 2														
		Puissance	Qm	Qm												
		(MW)	consommation O2	produit de combustion												
Temps (s)		(kW)	(kg/s)	(kg/s)	airsec	O	O2	Azote	Helium	CO2	CO	H2O -		SO2	HCN	HCL
												vapeur	Liq			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
360	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4200	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les autres phénomènes physiques (propagation, échange de chaleur, tirage thermique) ne sont pas considérés comme des effets particuliers que l'utilisateur doit explicitement demander mais sont pris en compte automatiquement pour toutes les branches d'un réseau³.

On remarquera que la propagation consiste à évaluer d'un pas de temps à un autre du calcul le déplacement des masses de fluide dans l'ensemble du réseau de ventilation en tenant compte de la vitesse de déplacement de celles-ci dans chaque branche (vitesse différente selon l'endroit du réseau et la densité du fluide à cet endroit) ainsi que des mélanges qui s'opèrent aux nœuds du réseau.

Le tirage thermique est directement issu de la simplification des équations de la mécanique des fluides et exprime la poussée engendrée par un fluide environnant sur une masse fluide de densité différente à celui-ci. Dans une galerie en pente cette poussée s'exprime par :

$$\Delta P = \rho_m g \Delta z$$

où $\rho_m = \frac{1}{L} \int_0^L \rho dz$ est la densité moyenne du fluide sur la longueur L de la portion de galerie considérée.

Concernant les échanges de chaleur, ceux-ci peuvent être pris en compte avec des niveaux de complexité différents regroupant tout ou partie des contributions convective et radiative ainsi que divers comportements de la surface d'échange : adiabatique, isotherme, à flux constant ou à flux variable, cette dernière méthode permettant de rendre compte des phénomènes éventuels de stockage et déstockage de chaleur dans une paroi.

Ces phénomènes physiques sont traités dans le modèle numérique général, on ne les développe pas dans ce rapport.

³ Notons qu'il est toutefois possible de désactiver globalement la prise en compte des effets thermiques.

4.2.1.3.4 Concentrations imposées dans une branche

Cet effet n'a pas été implémenté car il n'a pas vraiment de signification dans la réalité. Cependant, il est réalisable et servira probablement pour la réalisation du couplage 1D/3D, de façon à prendre en compte dans le réseau de ventilation un débit de fluide provenant de la zone tridimensionnelle et ayant des caractéristiques de concentration imposée par cette zone (Cf. § 3.5.3.). Il peut être écrit sous la forme donnée ci-dessous :

Concentrations imposées														
type d'effet		sous-type d'effet												
2		1												
Concentrations imposées														
Temps (s)	airsec	O	O2	Azote	Helium	CO2	CO	H2O -						
								vapeur	Liq	SO2	HCN	HCL		
0	0.00		0.00	0.23	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Notons que les développements réalisés actuellement permettraient, avec quelques modifications de l'outil de prendre en compte d'autres gaz que ceux représentés ici.

4.2.1.3.5 Température imposée dans une branche

Cet effet n'est pas non plus très 'réaliste', il représente une fonction de climatiseur 'idéal' qui serait capable, quel que soit le débit circulant dans une branche, d'y imposer une température désirée.

Cet effet, non implémenté à ce jour, ne pose pas de problème particulier et peut être réalisé selon les mêmes principes que ceux employés pour imposer les valeurs de concentration d'un mélange gazeux. On donne un exemple de ce que pourrait être ce fichier d'effet de ce type.

Température imposée		
type d'effet		sous-type d'effet
2		0
Temps (s)	Température (K)	
0	288	
60	300	
61	400	
2400	500	
2401	500	
3000	500	

4.2.1.3.6 Simulation d'un incendie dans une branche

L'effet incendie a été développé de façon à permettre une évaluation simplifiée mais réaliste des effets thermiques et toxiques d'un incendie.

Ainsi, pour les effets thermiques, nous prenons en compte une puissance convectée par les fumées de l'incendie qui a pour effet, en se mélangeant avec le débit de fluide circulant dans la branche où il est déclaré, d'augmenter la température homogène du courant d'air à l'aval de l'incendie. De plus, le modèle développé permet d'évaluer les effets toxiques par mélange d'un débit de fumée produit par l'incendie ainsi qu'une consommation d'oxygène par le foyer. Par la définition d'un scénario donnant les divers produits de combustion majoritairement présents dans un incendie et éventuellement des toxiques aigus, il est alors possible d'évaluer l'impact toxique des fumées de l'incendie dans le réseau de ventilation.

Incendie					Concentrations											
type d'effet	5	sous-tyr 2														
Temps (s)	Puissance (MW)	Qm	Qm	airsec	Concentrations											
		conso n O2	produit s de combu		O	O2	Azote	Helium	CO2	CO	H2O -		SO2	HCN	HCL	
											vapeur	Liq				
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.11	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.21	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.32	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.43	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.53	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.64	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	0.75	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Le modèle retenu pour la dissipation de la puissance dans le fluide circulant dans la branche est le même que celui retenu au § 4.2.1.3.3.

Le modèle de mélange des fumées est défini de la façon suivante en exprimant le bilan des produits présents à l'aval de l'incendie :

- Pour la concentration en un gaz i , autre que O_2 on a :

$$[C_i]_{aval} = \frac{Qm_{amont} [C_i]_{amont} + Qm_{produits\ de\ combustion} [C_i]_{produits\ de\ combustion}}{Qm_{amont} + Qm_{produits\ de\ combustion} - Qm_{conso.O_2}}$$

- Pour la concentration en O_2 on a :

$$[O_2]_{aval} = \frac{Qm_{amont} [O_2]_{amont} - Qm_{conso.O_2}}{Qm_{amont} + Qm_{produits\ de\ combustion} - Qm_{conso.O_2}}$$

A ce stade, et pour faciliter la prise en compte d'un incendie dans un réseau de ventilation, il a été choisi de négliger la variation du débit massique de fluide circulant à l'amont et à l'aval de l'incendie. On estime ainsi que le débit massique induit par un incendie, c'est à dire le débit de produits de combustion diminué de la consommation d'oxygène, est faible. comparé au débit d'air ventilant l'incendie (dilution forte des fumées).

Dans la pratique, la dilution des fumées d'un incendie est souvent forte (sauf pour les cas de feux sous-ventilés). Cette hypothèse de base sur le calcul de la toxicité des incendies n'est donc pas très contraignante, d'autant plus que les données théoriques sur les feux sous-ventilés sont peu nombreuses et ne permettent pas à ce jour d'appliquer un modèle général dont la simplicité serait en adéquation avec le présent outil de calcul. On notera tout de même les travaux expérimentaux de Marlair *et al.* [12] concernant la production de données sur les caractéristiques des feux sous-ventilés.

4.2.2 Le processeur

Le processeur permet à l'utilisateur de réaliser toutes les phases principales d'une simulation d'effets accidentels en réseaux maillé:

- le calcul de la connectivité du réseau ainsi que la préparation numérique de la résolution,
- la définition des paramètres physiques, numériques et informatiques de la simulation,
- le suivi du calcul et le stockage de résultats,

Le calcul automatique de la connectivité du réseau est une fonctionnalité importante de NewVendis par rapport aux versions précédentes. De cette façon, il est possible pour l'utilisateur de récupérer les coordonnées spatiales d'un réseau de branches sans avoir à se préoccuper des connexions entre les branches. La détermination 'à la main' de la connectivité d'un réseau peut être extrêmement lourde à réaliser et une source importante d'erreur. Le calcul automatique de la connectivité du réseau permet de diminuer ce risque d'erreur et, quasiment de l'annuler lorsque l'on visualise le résultat de la connectivité avec le mailleur. Bien sûr la vérification ultime du réseau maillé peut également être faite par une analyse poussée des résultats de calcul.

Le calcul de la connectivité peut être réalisé de plusieurs façons, selon que la géométrie du réseau est renseignée de façon complète ou allégée par l'utilisateur. En fait, soit l'utilisateur déclare tous les nœuds du réseau de branches, soit il ne déclare que les branches (Figure 4—3).

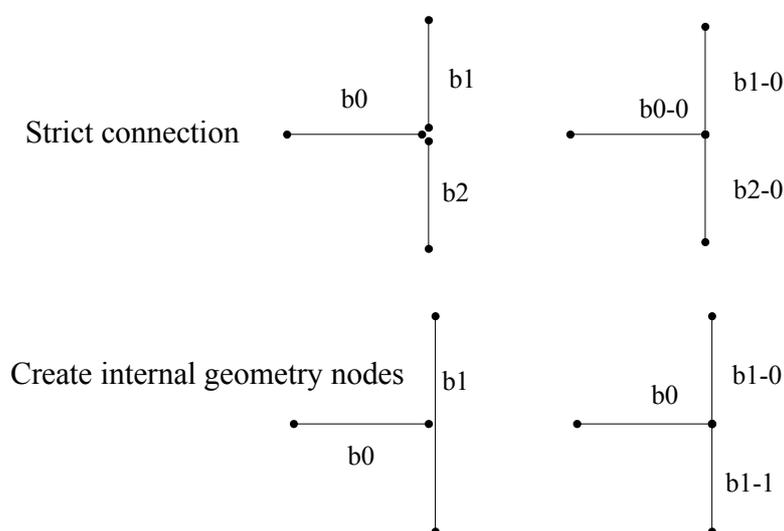


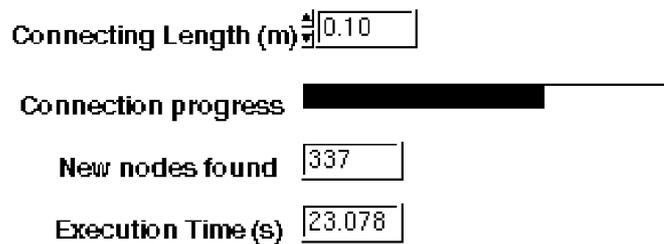
Figure 4—3 : présentation des deux méthodes possibles pour décrire un réseau de ventilation. 'strict connection' correspond au cas où l'utilisateur déclare tous les points nécessaires à la description des nœuds du réseau, 'create internal geometry nodes' correspond au cas où l'utilisateur ne déclare pas explicitement tous les nœuds du réseau.

Selon l'option choisie par l'utilisateur, le calcul de la connectivité intégrera ou non une recherche des points nodaux manquants. Dans tous les cas, le calcul fait l'hypothèse que deux branches sont connectées si les points nodaux vérifient la relation suivante pour chaque coordonnée :

$$| X_{i1} - X_{i2} | < \text{longueur de connectivité}$$

(i variant de 1 à 3 pour les trois dimensions de l'espace géométrique)

Lors du calcul des connexions entre branches du réseau, la boîte de dialogue suivante apparaît à l'écran :



The dialog box contains the following information:

- Connecting Length (m)**: 0.10
- Connection progress**: A progress bar that is approximately 75% full.
- New nodes found**: 337
- Execution Time (s)**: 23.078

Figure 4—4 : Boîte de dialogue informant sur la progression du calcul de la connectivité.

Ceci permet de se rendre compte de l'avancée du calcul de la connectivité, qui peut être longue s'il y a recherche des points nodaux non déclarés et s'il y a beaucoup de branches. Typiquement, les temps de calcul de la connectivité varient de quelques secondes à une vingtaine de minutes dans le cas de réseaux de plusieurs centaines de branches.

A l'issue de cette étape les connexions sont regroupées dans la structure de données suivante (Figure 4—5). Tous les nœuds, y compris les nœuds éventuellement créés, sont numérotés à partir de 0. Toutes les branches, y compris les branches nouvellement créées sont également numérotées. Pour chaque nœud, on mémorise alors quelles sont les branches connectées en ce nœud et par quel bout elle le sont. Sur l'exemple qui suit, on voit que pour le nœud 0 il y a deux branches connectées. Il s'agit des branches numérotées 4 et 0. La branche 4 est affectée de l'index 0 ainsi que la branche 0. Cela signifie que ces deux branches sont connectées par leurs nœuds de départ (noté *ndd*, nœud d'arrivée étant noté *nda*). Si l'index est différent de 0, cela signifie que la branche correspondante est connectée par son *nda*.

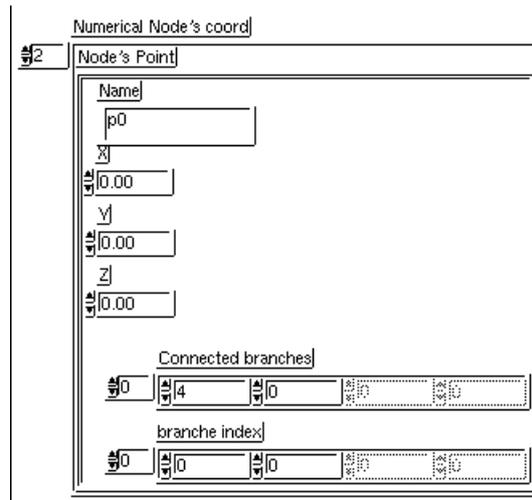


Figure 4—5 : Structure de donnée des nœuds d'un réseau.

Le processeur permet également de définir les paramètres physiques globaux du calcul. On citera principalement les paramètres suivants :

- choix des valeurs de références de pression et de température à l'instant initial pour le fluide contenu dans le réseau et l'air extérieur,
- choix de la température initiale des galeries (massif),
- choix de l'équation d'état permettant de calcul de la densité du fluide circulant dans les galeries,
- choix du type de transfert thermique (convection, rayonnement, conduction),
- choix des effets globaux pris en compte (modèle de frottement aux parois, prise en compte des tirages thermiques...)

En ce qui concerne les paramètres numériques, le processeur permet de régler les choix concernant la convergence du calcul (méthode de calcul de l'erreur et valeur de l'erreur tolérée) ainsi que la définition des temps de simulation et du nombre de pas de temps de calcul.

Le processeur permet aussi la sauvegarde des résultats. Celle-ci nécessite la création de deux fichiers.

Le premier fichier est identifiée par le suffixe '*case*'. Il permet de sauvegarder la configuration de calcul ainsi que la description complète du cas test ce qui correspond à la liste des branches, la liste des points numériques, la liste des branches numériques, les caractéristiques du mélange initial, les paramètres globaux, la table des effets et les branches atmosphères.

Le second fichier permet de sauvegarder les résultats de calcul. Les éléments conservés sont choisis à partir d'un menu de présélection comme l'illustre la Figure 4—6. Il est donc alors possible de sauvegarder, pour chaque pas de temps, le débit massique, les fractions massiques composant l'air de l'ouvrage, la résistance, la densité, les pertes de charge, la pression relative, la température de l'air, la température en paroi, la viscosité dynamique, le nombre de Reynolds et la vitesse de l'air.

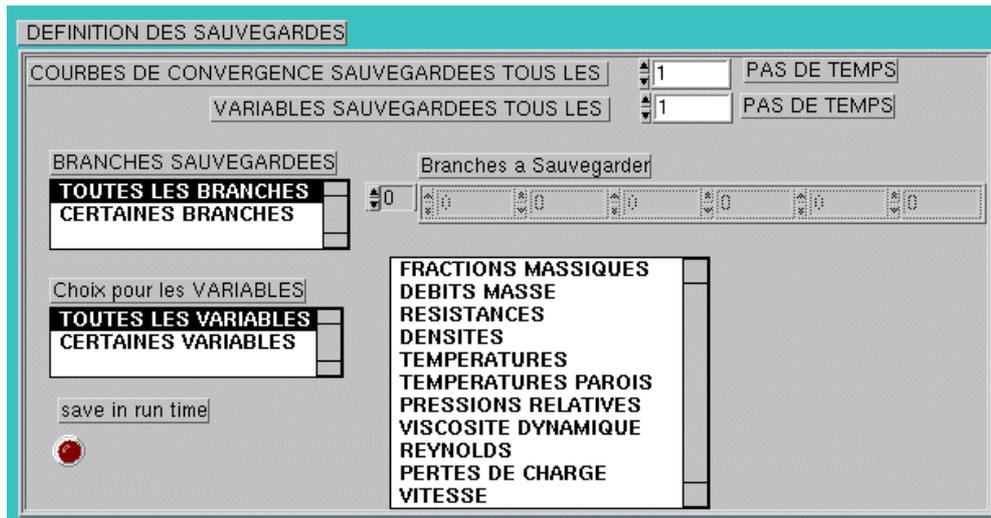


Figure 4—6: présélection des structures sauvegardées

Deux formats de sauvegarde sont disponibles.

- Le premier format, suffixé *.save*, permet une sauvegarde a posteriori une fois le calcul terminé. Les données présélectionnées sont alors intégralement gardées en mémoire. Ce fonctionnement peut inutilement encombrer la mémoire de l'ordinateur et par conséquent considérablement diminuer ses performances.
- Le second format, suffixé *.rave*, permet une sauvegarde en cours de calcul. A l'issu du calcul de chaque pas de temps, les éléments présélectionnés sont ajoutés au fichier de sauvegarde ouvert en début de calcul. Cette approche permet de limiter l'encombrement mémoire. Cependant, la relecture doit, elle aussi, s'opérer de façon itérative ce qui implique d'importantes manipulations en mémoire à l'origine d'un temps de relecture plus important.

La relecture des résultats est fonction du format de stockage mais le type de post-traitement possible par la suite est indépendant du format de sauvegarde.

La simulation est alors calculée en explicitant les équations caractéristiques de chaque branche. Nous effectuons alors une analogie avec les réseaux électriques en écrivant la loi des nœuds pour les débits et la loi des mailles pour les pertes de charges. A ces équations nous ajoutons les termes supplémentaires caractérisant les effets particuliers présents sur celles-ci ainsi que les éventuels raffinements locaux du cas de calcul.

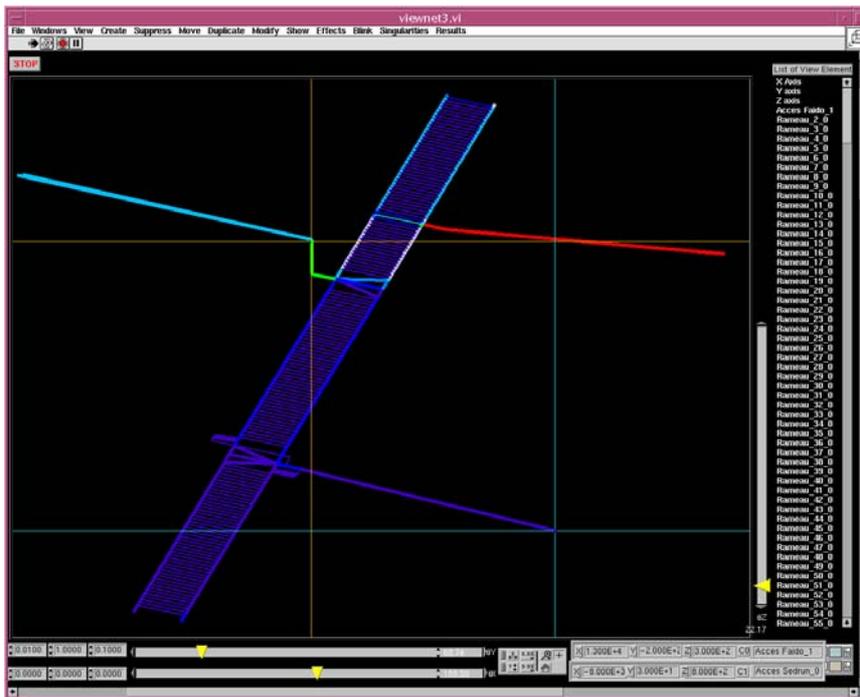
La théorie des réseaux maillés permet alors de déterminer les inconnues et de choisir des équations indépendantes parmi toutes celles représentatives de l'équilibre du réseau. Pour résoudre ces équations, nous employons la méthode numérique de relaxation de Hardy Cross. [8]. Les méthodes numériques ne sont pas développées dans ce rapport de synthèse.

4.2.3 Le post-processeur

Le post-processeur est en fait composé de plusieurs outils permettant l'analyse des résultats.

Les principales possibilités sont :

- une vision globale des débits atteints par niveaux de couleur intégrant éventuellement le marquage du sens de l'écoulement.




 Débit élevé


 Débit faible

Figure 4—7 : Visualisation des débits circulant dans un réseau par affichage de niveaux de couleur.

L'analyse des résultats peut également porter sur le sens de l'écoulement dans les différentes gaines.

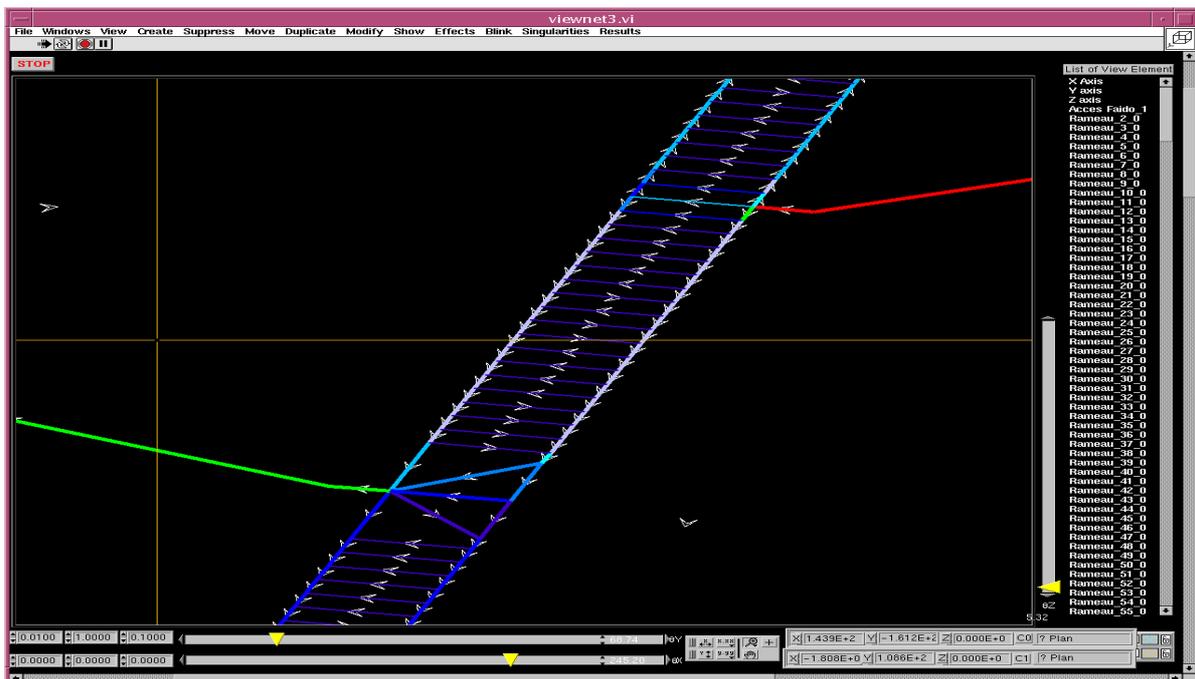


Figure 4—8 : Affichage des niveaux de couleur et des sens d'écoulement.

- la visualisation des différents paramètres de l'écoulement le long d'une branche donnée ou, la variation dans le temps des paramètres de l'écoulement à un endroit donné du réseau peut être obtenue par la génération de fichiers textes utilisables sur un tableur (e.g. Excel),

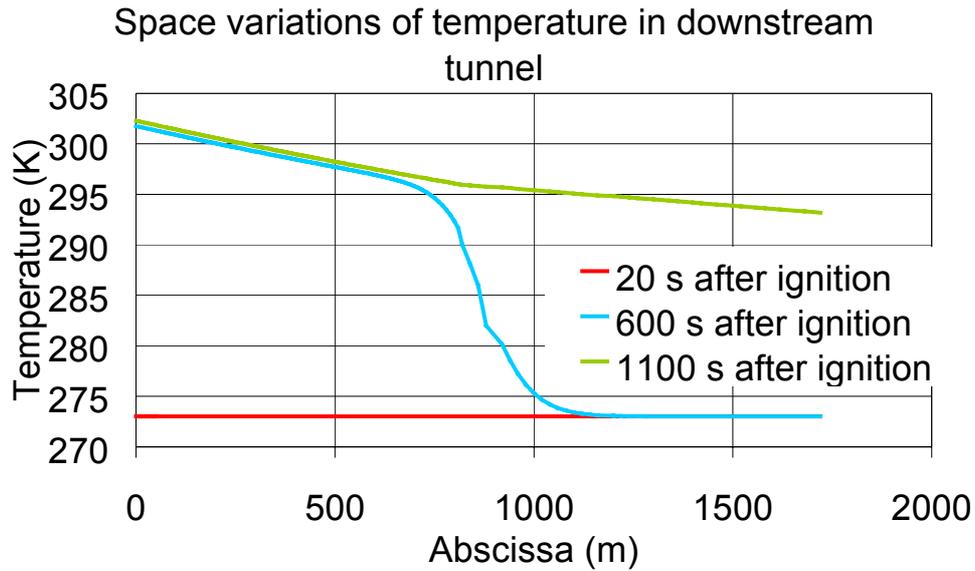


Figure 4—9 : Exemple de l'évolution de la température dans une branche à différents instants.

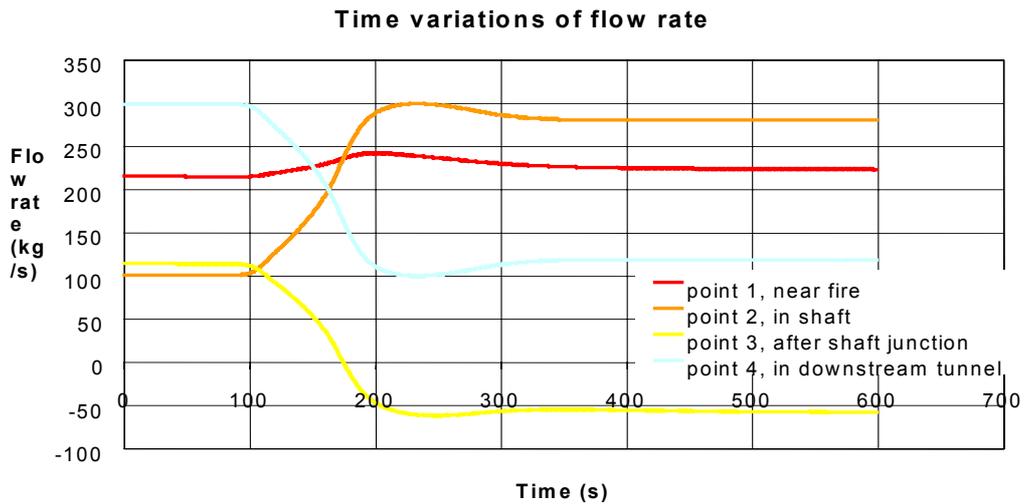


Figure 4—10 : Exemple de l'évolution temporelle de débits dans différentes branches d'un réseau en un état de départ et un état d'arrivée.

- la visualisation de différents paramètres de l'écoulement sous la forme de diagrammes espace-temps (exemple factice de dispersion du CO₂ présent dans les fumées d'un incendie en tunnel)

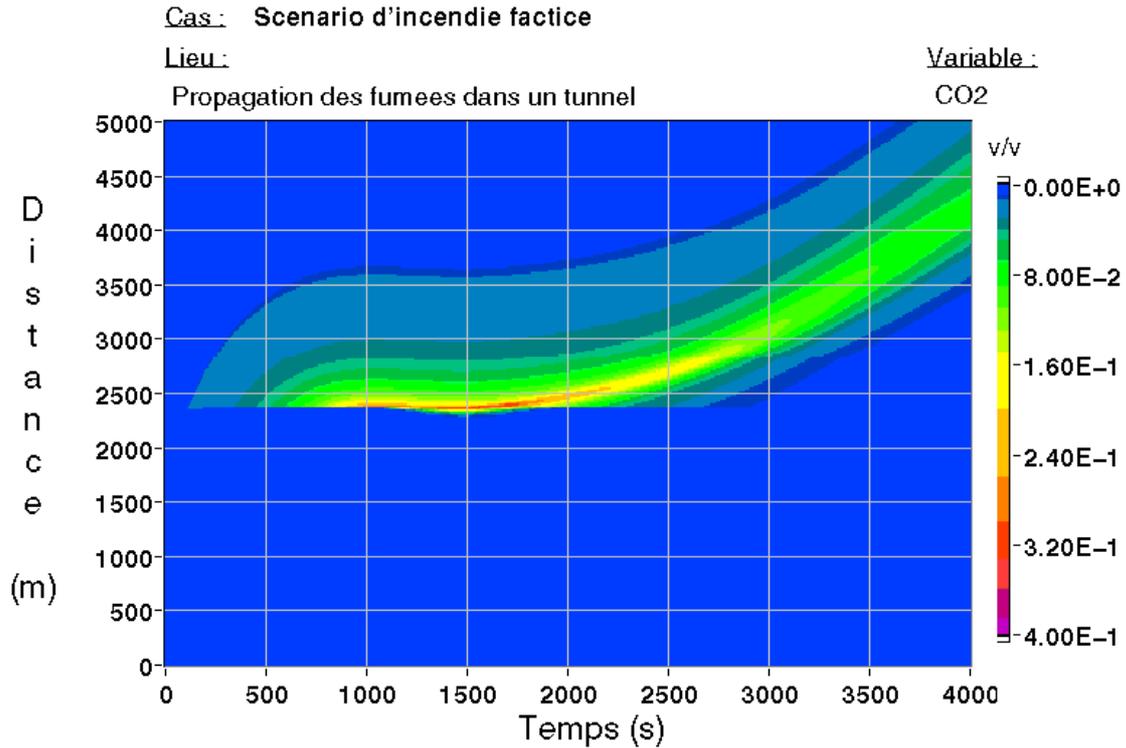


Figure 4—11 : Exemple d'un diagramme Espace/Temps de la propagation de fumées dans une galerie d'un réseau.

4.3 LE COUPLAGE 1D/3D

Pour cette étude, le couplage mis en œuvre implique un modèle 1D (New-Vendis) avec un modèle 3D (Phoenics). La structure logique du couplage reste cependant ouverte à un fonctionnement plus général. Elle a donc été développée pour permettre des couplages du New-Vendis avec d'autres modèles.

4.3.1 Architecture fonctionnelle

Le couplage entre plusieurs modèles numériques peut être mis en œuvre de plusieurs façons différentes.

La première solution, et certainement la plus naturelle, est de fusionner les différents modèles en un seul. Le couplage est alors résolu mathématiquement lors de la phase de résolution mathématique. Le principal inconvénient de cette technique est de nécessiter le développement de l'ensemble des modèles à coupler. Ceci implique aussi une difficulté importante des évolutions possibles du couplage. Le couplage 1D/1D présenté au § 3.5.1. est construit ainsi, bien qu'il reste relativement aisé à externaliser.

Les autres solutions impliquent de faire communiquer des éléments de calcul spécifiques à chaque modèle. Ceci signifie de faire fonctionner un code de calcul 1D avec, par exemple, un code de calcul 3D. Si les deux modèles simulent des phénomènes instationnaires, la synchronisation des calculs, en terme d'exécution et de discrétisation en temps, devient indispensable.

Les schémas de couplage suivants sont possibles. Il s'agit du modèle maître/esclaves comme le montre la Figure 4—12 et du modèle à distribution équitable aussi appelé modèle réparti (Figure 4—13).

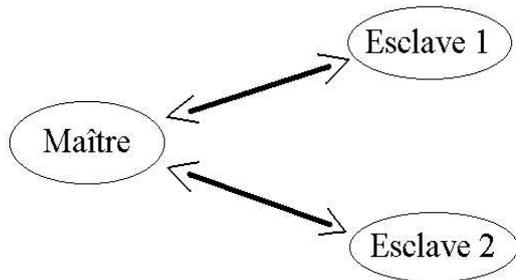


Figure 4—12: modèle maître/esclaves

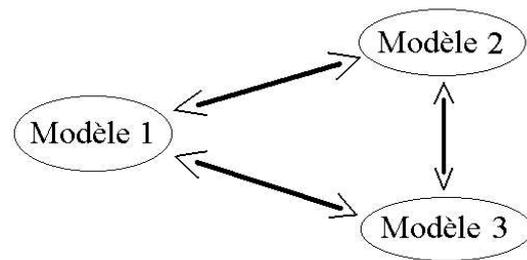


Figure 4—13 : modèle réparti

Le modèle réparti affecte un rôle identique à chacun des modèles et par conséquent à chacun des codes de calcul qui les implémentent. Les liens entre chaque entités sont complètement symétriques. L'élément principale de cette architecture est la notion de liens entre les modèles. Le couplage s'exprime alors comme une entité numérique et informatique liant de façon homogène un ensemble de modèles.

Le modèle maître/esclave considère qu'un des éléments a la responsabilité du couplage. Il pilote et gère complètement les autres éléments couplés, ainsi qu'il en extrait des informations.

Si l'on considère que dans notre contexte, la distinction entre modèle global et modèle local est naturelle, la structure de type maître/esclave semble la plus adaptée pour réaliser le couplage. Dans ce schéma le maître est alors NewVendis (modèle global) et les esclaves sont les différents codes qui contiennent les modèles servant à calculer les phénomènes locaux. Ce choix permet de centraliser la gestion du couplage dans NewVendis et ainsi de limiter les interventions spécifiques sur les codes externes. Il permet aussi de conserver la cohérence de la notion de couplage, dans NewVendis, puisque de la même façon le couplage 1D/1D est piloté par la méthode de Hardy Cross qui est le cœur de NewVendis.

La principale différence entre le couplage 1D/1D et le couplage 1D/autre modèle est l'externalisation de l'autre modèle.

4.3.2 Implantation dans NewVendis

Le modèle 3D est utilisé pour simuler l'écoulement dans une partie du réseau. Cette résolution ne doit pas être redondante ni concurrente avec le modèle unidimensionnel. Ceci signifie l'unicité de la représentation de chacune des parties du réseau.

Notons qu'un certain recouvrement des modèles peut parfois être utile à la résolution de problèmes de stabilité numérique.

4.3.2.1 Création d'un réseau équivalent

La zone calculée par le modèle 3D ne fait plus partie du réseau 1D, ce qui signifie qu'il est ouvert en tous points de couplage. Cependant pour permettre le calcul d'équilibrage, il est nécessaire de fermer le réseau. Pour cela, la notion de réseau équivalent est introduite.

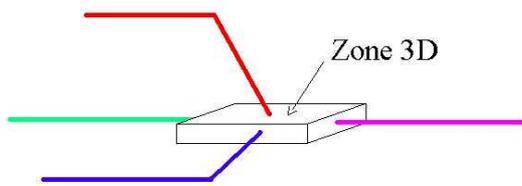


Figure 4—14 : représentation schématique d'un couplage

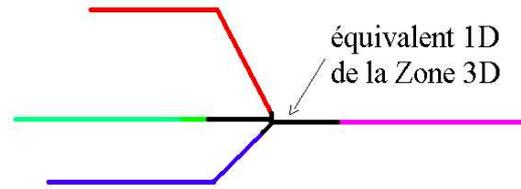


Figure 4—15 : représentation du réseau 1D équivalent

Il s'agit comme le montre les figures Figure 4—14 et Figure 4—15 de remplacer la zone de calcul 3D par un réseau 1D équivalent. La représentation géométrique de ce réseau est obtenue par le prolongement de toutes les branches connectées à la zone 3D jusqu'à un nœud central. D'un point de vue pratique, le centre de gravité des extrémités des branches permet une détermination simple de ce point central. la position de ce dernier peut cependant être choisie de façon quelconque puisque les caractéristiques de ces nouvelles branches sont entièrement déterminée par la fonction de couplage sans tenir compte de leurs caractéristiques géométriques.

La déclaration des zones de couplage ainsi que la création du réseau équivalent sont faite avec le pré-processeur de NewVendis. Celui-ci permet de déclarer éventuellement plusieurs zones de couplage. Une zone de couplage désigne une zone géographique du réseau de galerie pour laquelle un code externe à NewVendis est utilisée. Cette zone est donc décrite par son identifiant, l'identifiant du calcul externe, le type de couplage effectué et par la liste des branches entrantes dans la zone de couplage. Cette structure permet de déclarer plusieurs zones de couplage. Une fois la zone de couplage complètement déclarée, un outil permet de construire le nœud central de la zone et d'associer à chaque branche de réseau équivalent ainsi créée un effet dynamique de couplage qui est associé au type de couplage choisit.

On réutilise ici la même notion d'effet que celle présentée au § 3.5.2.1.1.

Les Figure 4—16 et Figure 4—17 montrent le résultat de la construction du réseau équivalent à l'aide du pré-processeur.

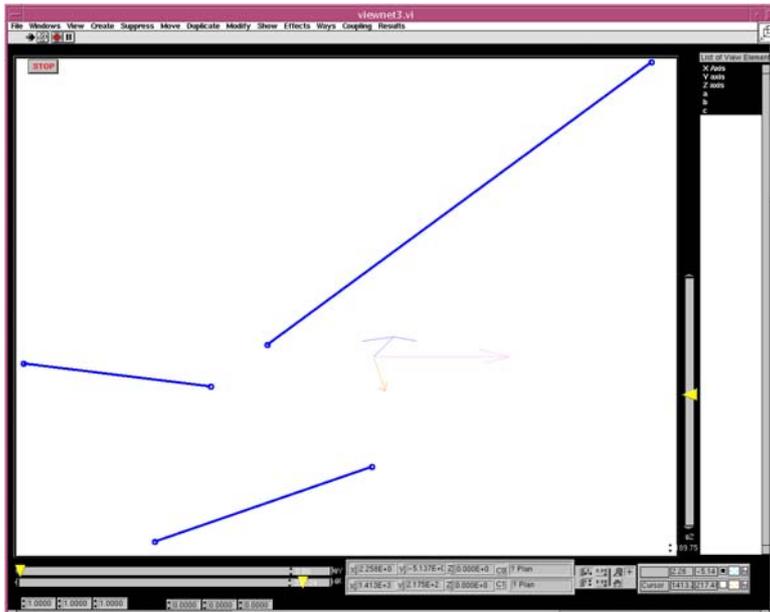


Figure 4—16 :

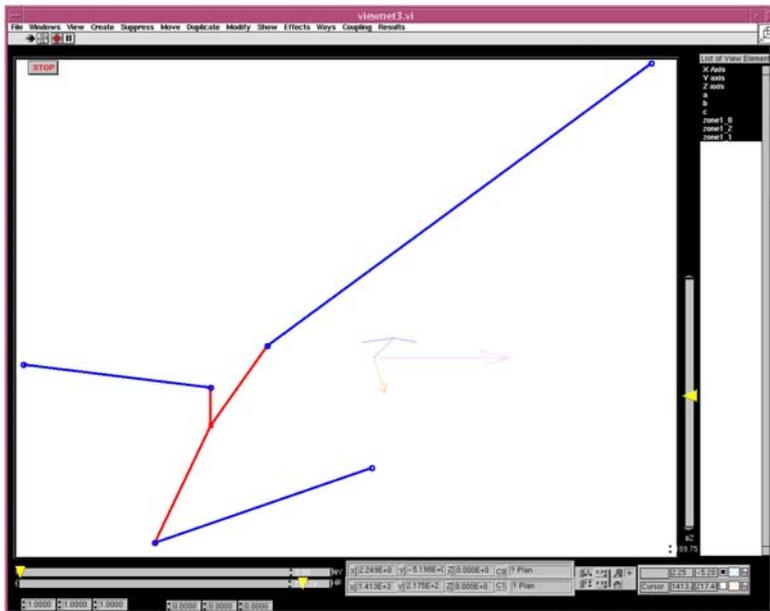


Figure 4—17 :

4.3.2.2 Rôle des effets dynamiques de couplage

Le réseau équivalent permet de conserver un réseau fermé pour la résolution de Hardy-Cross. Cependant la fermeture géométrique est associée à un jeu de paramètres et d'effets pour chaque nouvelle branche numérique créée. Ces branches n'étant qu'un artifice numérique, la résolution qui leur est associée doit impérativement n'être pilotée que par le couplage. Les effets globaux comme les pertes de charges linéiques n'ont donc aucun sens pour ces branches. A cet égard, les paramètres des branches sont fixés de telle sorte que ces effets soient annulés. La variation de pression le long de ces branches ne sera due qu'aux uniques effets de couplage, représentatifs du raffinement local.

Du point de vue de la zone de couplage, les courants d'air dans les branches sont soit entrant soit sortant. Les effets de couplage associés à chaque branche du réseau équivalent permettent de donner ou de prendre au réseau 1D l'information adéquate. Cependant la répartition entre branche entrante ou sortante est susceptible de changer dans le temps ce qui correspond à une modification de l'équilibrage du réseau. Les effets de couplage prennent donc des formes différentes dans le temps, ce sont des effets dynamiques.

Les effets élémentaires nécessaires tels que imposer un débit, une température, une puissance thermique ou des concentrations et des sauts de pression, sont donc mis en place, à chaque pas de temps, pour chaque zone de couplage.

4.3.3 Réflexions sur le couplage avec Phoenix

Le couplage entre NewVendis et Phoenix (code de calcul CDF 3D) a été plus approfondi d'un point de vue conceptuel sans toutefois être effectivement réalisé et expérimenté.

Phoenix est de code de calcul 3D construit pour simuler des écoulements de fluides faiblement compressibles et incompressibles. Il prend en compte les phénomènes de transferts thermiques tels que le transfert radiatif et la conduction de chaleur dans les solides. Les calculs peuvent être réalisés pour des écoulements turbulents en utilisant l'un des modèles de turbulence proposés. Les fermetures du système sont principalement du premier ordre avec l'utilisation de deux équations de conservation propres au modèle de turbulence. Il s'agit par exemple pour le modèle k- ϵ de l'équation de l'énergie cinétique de turbulence et de la dissipation de la turbulence.

Le schéma de discrétisation est de type "volumes finis", "centré cellules" permettant, soit la collocation de toutes les inconnues, soit un maillage décalé pour certaines d'entre elles. La méthode de résolution est de type SIMPLE, c'est-à-dire un schéma de type prédicteur/correcteur sur la pression.

Pour ce type de code calcul, les conditions de bord entrantes sont généralement imposées via une formulation faible pour toutes les variables hormis la pression. Celle-ci est généralement la seule variable imposée pour les conditions de bord sortantes. Cette configuration des conditions aux limites permet de laisser s'établir les ondes de pression. En effet, les régimes d'écoulement considérés ici sont subsoniques, par conséquent il existe une onde pression qui se propage dans l'écoulement jusqu'aux bords du domaine de calcul. Si la pression est fixée sur tous les bords, l'onde ne peut pas 'sortir' librement et la pression calculée (si la méthode de résolution parvient à converger) présente alors des oscillations purement numériques pouvant affecter la quasi totalité du domaine de calcul.

Les quantités nécessaires aux calculs 3D sont donc les suivantes :

- en entrée : les trois composantes de la vitesse, la température (ou l'enthalpie), les fractions de chaque espèces chimiques calculées, l'énergie cinétique de la turbulence et sa dissipation (dans le cas où le modèle k- ϵ est employé),
- en sortie : la pression.

Ces quantités doivent donc être fournies par NewVendis.

Du point de vue du modèle 1D, les informations provenant de la zone 3D doivent être communiquées. Il s'agit de la température, des fractions massiques des gaz et de la pression. Puisque les pertes de charges linéiques sont nulles dans les branches de couplage, la pression ne peut être imposée que par un saut de pression.

La température et les fractions massiques fournies par le code 3D sont les valeurs moyennes dans chaque section de sortie de zone. Cela permet de raccorder le modèle 3D à un modèle 1D dont les quantités sont constantes par section de galerie et sont conservatives. Pour la pression les valeurs homogénéisées sont obtenues de façon identique. Cependant, pour l'itération de Hardy-Cross, il est nécessaire de disposer de sauts de pression entre le nœud central du réseau équivalent et les branches de raccordement au réseau 1D. Ces sauts de pression sont obtenus par différence à la moyenne des pressions homogènes aux entrées et sorties du domaine 3D.

Les données d'entrée du code 3D posent un problème différent. Il est ici nécessaire de construire une information surfacique (dimension du bord entrant 3D) à partir d'une information scalaire (dimension des quantités sortantes du modèle 1D). Plusieurs solutions sont possibles. La première consiste à appliquer uniformément la valeur scalaire dans la surface. Cette solution impose un déclenchement non physique du développement de la couche limite. Une autre solution consiste à utiliser un profil adimensionné tel que sa moyenne soit l'unité. Il suffit alors de multiplier le profil par le scalaire d'adimensionnement. La difficulté réside alors dans la détermination de profils d'entrée et de sortie réalistes. Cette technique permet toutefois l'utilisation de conditions de bord moins difficiles pour la résolution du modèle 3D, notamment pour les variables de la turbulence, elle a été utilisée avec succès dans le cadre de la modélisation fine de jets gazeux, [13]. Selon les cas, la précision apportée par l'utilisation de profils est plus ou moins pertinente et dépend des singularités à représenter (rétrécissement brusque, élargissement, injection provenant d'un tube ou directement d'un réservoir...).

Le rôle du calcul avec Phoenix revient à chaque pas de temps à déterminer les valeurs affectées aux effets dynamiques de couplage. Il semble ainsi possible de prendre en compte les conséquences des effets locaux tridimensionnels mais aussi l'influence de l'équilibrage du réseau sur les phénomènes locaux.

4.3.4 Eléments informatiques

D'un point de vue informatique, le couplage peut être réalisé de plusieurs façons différentes.

Une première solution consiste à intégrer un code de calcul dans l'autre. Pour cela, il est nécessaire que les codes de calcul importés soient accessibles sous la forme de bibliothèques informatiques⁴.

Une seconde solution consiste à utiliser un processus⁵ différent pour chaque code de calcul. La communication peut alors se faire de plusieurs manières différentes. La lecture et l'écriture dans des fichiers est certainement la technique la plus simple bien qu'elle soit difficile à automatiser et surtout peu efficace. Les communications directes entre processus différents sont possibles avec des techniques telles que la mémoire partagée⁶, les sémaphores⁷, les pipes⁸ ou les sockets⁹. Cependant seule l'utilisation de sockets permet de communiquer entre des processus exécutés sur des ordinateurs différents.

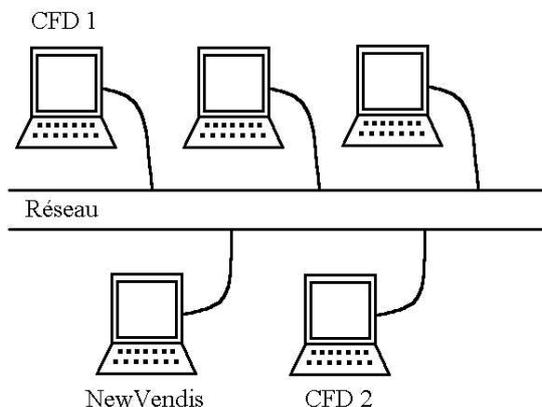


Figure 4—18: schéma d'une configuration possible de calcul couplé

⁴ Fichier contenant la forme exécutable d'un ensemble de procédures, de fonctions ou d'objets

⁵ la notion de processus fait référence à un emplacement mémoire, à code binaire et à son exécution par l'unité de calcul. Il s'agit de l'ensemble des éléments associés à l'exécution d'un programme.

⁶ Plusieurs processus se partagent le même segment physique de mémoire de l'ordinateur. Cette technique nécessite une parfaite maîtrise de la coordination des processus.

⁷ Il s'agit d'une forme binaire de mémoire partagée souvent utilisée pour la synchronisation de processus.

⁸ Les pipes peuvent être représentées comme des tuyaux de communication entre processus. Leur gestion complète est fournie par les systèmes d'exploitation de type UNIX.

⁹ Les sockets sont des connecteurs virtuels accessibles par le processus qui le crée mais aussi par tous les autres processus autorisés depuis un ordinateur autorisé. Ces connexions virtuelles sont fréquemment utilisées dans les technologies réseau de haut niveau telles que le WEB.

L'architecture choisie est donc basée sur des techniques permettant le couplage de processus sur des ordinateurs différents comme l'illustre la Figure 4—18. L'objectif est donc de s'appuyer sur les outils logiciels mis en œuvre pour les réseaux informatiques professionnels et grand public tel que le protocole de communication TCP/IP. Ce choix satisfait pleinement une contrainte de portabilité. En effet, le choix de Labview pour le développement de NewVendis est aussi justifié par la grande portabilité offerte par ce produit. Cette difficulté est complètement gérée par le fournisseur dans le cas de Phoenixics. Les communications réseau permettent ainsi de conserver une importante souplesse de ce point de vue.

Un autre critère important de ce type de choix est lié à la possibilité de répartition des ressources informatiques. Des processus fonctionnant sur des machines distinctes ne partagent pas les ressources (unité de calcul, mémoire, système d'exploitation). Il est donc tout à fait possible d'utiliser un calculateur puissant pour le code 3D et un ordinateur plus modeste pour NewVendis.

4.3.4.1 Stratégie de communication

NewVendis intègre des procédures lui permettant de gérer des communications bidirectionnelles avec plusieurs autres processeurs. La séquence de fonctionnement de la chaîne de calcul pour effectuer un calcul couplé, peut se décliner comme suit :

- Préparation du calcul :
 - construction des parties 1D (utilisation usuelle du mailleur),
 - définition des zones de couplage,
 - construction des réseaux équivalents,
- Processus de calcul :
 - démarrage de NewVendis, attente en mode serveur que tous les clients se connectent,
 - boucle de simulation, NewVendis est principalement en attente de réponse des clients,
 - envoi de l'ordre de fin de calcul aux clients, et arrêt de la simulation.
- Post-traitement réalisé avec les outils propres à chaque modèle.

Le travail effectué dans le pré-processeur de NewVendis permet de définir les couplages effectués. Chaque zone de couplage est associée à un client, c'est-à-dire à un processus. Le nom de la zone est l'identifiant utilisé lors de la demande de connexion. Le type de couplage est aussi déclaré lors de la création de la zone. Il désigne la stratégie d'effet associé au couplage.

Lors de la phase de calcul, NewVendis reste toujours en attente de requêtes de la part de clients. Le protocole de communication permet à NewVendis de déterminer si le client souhaite fournir des informations ou si il souhaite en recevoir. Ainsi la gestion bidirectionnelle de la connexion est faite par NewVendis sur demande des clients. La synchronisation est, elle, complètement gérée par NewVendis puisque le client reste en attente de réponse tant qu'il n'a pas obtenu les données demandées.

4.3.4.2 Protocole de connexion

Lors de la phase de connexion, NewVendis est en attente de connexion sur un port socket prédéfini et connu de tous les clients. A chaque tentative de connexion, l'autorisation est donnée pour un temps prédéfini pendant lequel le client doit s'identifier en fournissant son nom au serveur. Si le nom n'est pas reconnu, la connexion est annulée par le serveur.

L'attente de connexion en mode serveur est maintenue tant que tous les clients escomptés (déclarés dans le pré-processeur) ne sont pas connectés. Chaque client dispose ainsi d'une connexion différente sur le même port socket ouvert par NewVendis.

4.3.4.3 Protocole de communication

4.3.4.3.1 Protocole de haut niveau

Le protocole dispose de trois commandes. Elles sont exprimées sous la forme des chaînes de caractères suivantes :

- « -> » le client va envoyer des données,
- « <- » le client attend des données,
- « stop » l'autre interlocuteur signal son arrêt.

L'annonce d'envoi d'information est immédiatement suivie de l'information elle-même. NewVendis se met alors en lecture sur le port socket.

La demande de donnée est suivie pour le client par une attente en lecture et pour NewVendis par l'envoi des données dès qu'elles sont disponibles.

Le signal d'arrêt permet de conserver la mise à jour des clients connectés, mais aussi de leur signaler la fin de leur activité.

4.3.4.3.2 Protocole de bas niveau

Bien que les communications utilisées de type TCP/IP soient sécurisées, un protocole de bas niveau est mis en place de façon à garantir l'intégrité de l'information transmise.

Toutes les informations transmises sont communiquées sous la forme de chaînes de caractères. Cette technique permet de garantir la lisibilité des messages sur tous types d'ordinateurs. En effet, les 128 premiers caractères du code ASCII sont standards et comprennent tous les caractères alphanumériques. Cependant, ceci implique un changement de type avant l'écriture et après la lecture pour tous les messages non-alphabétiques.

Afin de garantir au processus en lecture que toute l'information qui lui a été communiquée a été lue, les communications sont construites en deux messages. Le premier de longueur fixe de 4 caractères donne la longueur du message utile. Le suivant contient l'information utile, et a exactement la dimension annoncée. Ainsi, le processus lecteur sait quand il peut traiter et utiliser les données reçues.

4.3.4.3.3 Bibliothèques de communication

Deux bibliothèques de communication ont donc été développées en langage C. La première implémente le protocole de bas niveau, ainsi que les procédures d'ouverture et de fermeture de connexion. La seconde propose une interface de plus haut niveau pour FORTRAN. Elle est donc directement utilisable dans un code source en FORTRAN et implémente le protocole de haut niveau.

Ces deux bibliothèques ont été expérimentées et validées sur un couplage purement informatique entre NewVendis et Phoenix. Ceci a permis de montrer la viabilité des choix technologiques retenus.

5. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES DEVELOPPEMENTS EXPERIMENTAUX

Comme il a été précisé dans le § 3.3 il a été choisi de développer les besoins expérimentaux relatifs au présent projet dans l'objectif d'une utilisation plus large, à l'avenir, des moyens mis en place à l'occasion du projet, et donc de la simulation d'accidents à échelle réduite.

C'est donc un laboratoire d'essai à échelle réduite, totalement nouveau, qui a été construit au cours de ce projet en y intégrant les besoins de données de validation propres à celui-ci.

Le laboratoire créé est brièvement décrit ainsi que la configuration d'essai mise en place pour la validation du couplage 1D/3D et les principaux objectifs et résultats d'essais obtenus à ce jour.

5.1 LE LABORATOIRE MAQUETTE

Le laboratoire (Cf. Schéma 5—1 et Photo 5—1) dans lequel se trouve la maquette mesure 21 m de long, 4 m de large et 3,5 m de haut. Il est ventilé par un apport d'air contrôlé, réparti sur 3 bouches de soufflage, chacune pouvant délivrer 1000 m³/h. L'apport d'air est également filtré et régulé en température, ce qui étend les périodes d'utilisation de la maquette aux saisons froides.

Quatre cheminées d'extraction d'un diamètre de 250 mm sont prévues pour l'évacuation des gaz et des fumées (non toxiques et non inflammables) qui seront générées lors des essais pour simuler les effets accidentels ainsi que l'apport d'air frais excédentaire aux besoins de ventilation de la maquette. En jouant sur l'ouverture des cheminées, on peut aussi agir sur la pression interne du local.

L'intérêt d'avoir une ventilation du local adaptée à ces applications expérimentales réside dans le fait qu'elle permet de réaliser la simulation d'effets accidentels de longue durée sans polluer le local et donc, sans altérer les conditions de référence dans lesquelles sont réalisées les mesures.

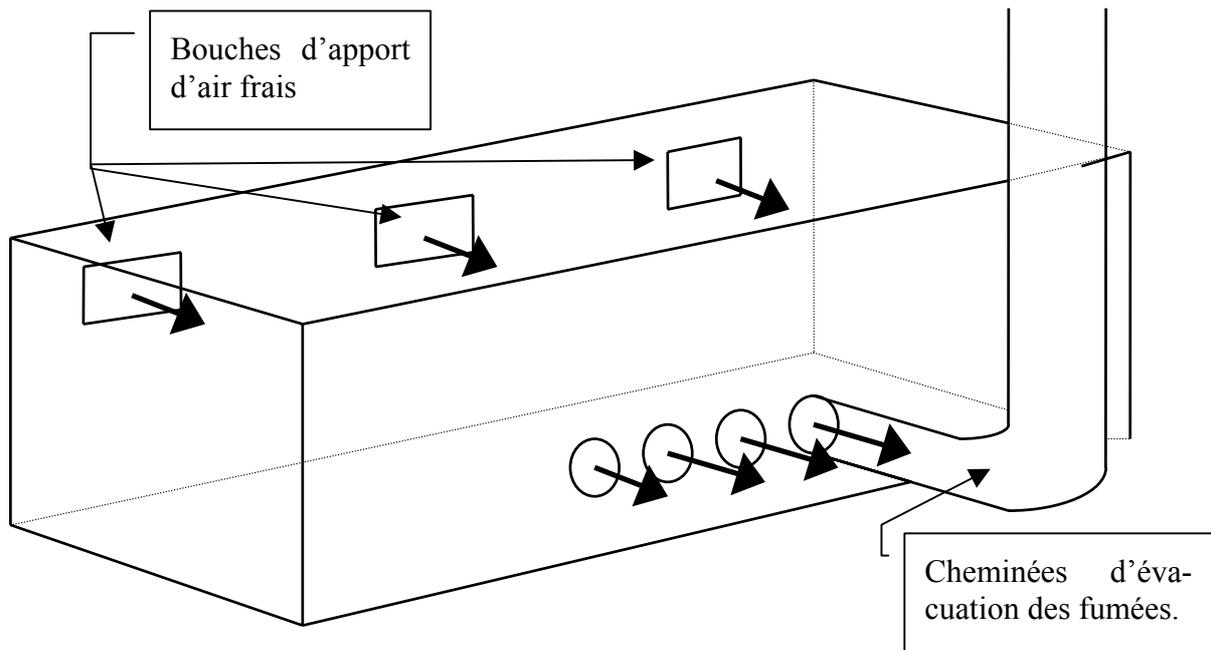


Schéma 5—1: Ventilation du laboratoire maquette.



Photo 5—1: Vue d'ensemble du local maquette montrant le support maquette et le volume de dispersion tridimensionnelle composé de plaques translucides.

Le support maquette est une plate forme de 15 m de long, de 1.5 m de large sur 1.5 m de haut. Sa grande longueur est justifiée par le fait qu'il est prévu pour pouvoir également accueillir des configurations de maquette de type 'tunnel'. De plus, il peut s'incliner à droite ou à gauche autour d'un axe situé au niveau du sol, lui permettant de simuler une pente maximale de +/- 10 %.

Monté sur 6 roulettes, 2 techniciens peuvent le déplacer dans le local, il peut également être déplacé à l'extérieur du local.

Au support de la maquette sont ajoutées des arches métalliques (Cf. Schéma 5—2) qui ont pour fonction de supporter un réseau de ventilation.

5.2 LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE VALIDATION DU COUPLAGE 1D/3D

Le dispositif expérimental mis en place servira à valider le modèle numérique de couplage 1D/3D dont le développement a débuté dans ce projet. L'objectif final du projet ayant pour but le couplage d'un code de calcul de dispersion 3D et d'un calcul en réseau de galeries (code 1D) l'outil expérimental prend en compte deux zones d'écoulement distinctes raccordées entre elles :

- une zone formée par un parallélépipède représentatif d'une cellule,
- une zone formée par un réseau de ventilation.

Ce dispositif est installé dans le local qui a été aménagé spécifiquement.

Le volume tridimensionnel est visible sur la photo 1 dans sa configuration 'cellule', il est aussi visible sur le schéma 2 donnant une vue générale du réseau de ventilation.

Les matériaux constituant le volume tridimensionnel de la maquette ont été choisis afin d'obtenir une bonne qualité visuelle et ainsi de pouvoir procéder à des visualisations qualitatives des comportements de fumées (e.g. plan Laser) ainsi que dans le futur à des mesures anémométriques par méthodes optiques (e.g. LDA, PIV).

Une grande modularité du volume tridimensionnel fut un des buts de sa conception. Ainsi, avec les éléments visibles sur la photo 1 il est possible de simuler aussi bien un local à échelle réduite qu'un tunnel routier qui ferait 300 m dans la réalité. D'autres configurations sont également envisageables à l'avenir, comme les parkings ou les entrepôts.

Pour recréer les volumes des différentes configurations d'essais possibles, il a été conçu un ensemble de plaques transparentes en Plexiglas. Ces plaques ont une largeur de 30 cm et sont conçues pour s'encastrent entre elles. La hauteur que forme ainsi un mur constitué de plusieurs plaques est alors un multiple de 30 cm. Il est cependant possible d'ajuster précisément une hauteur définie en utilisant d'autres plaques réalisées spécifiquement.

Les armatures métalliques verticales sont constituées de piliers de même dimension que les plaques, que l'on fixe bout à bout. Les armatures et les parois s'emboîtent à volonté afin d'obtenir la longueur de cellule désirée.

Tous les éléments de fixation des panneaux de Plexiglas sont placés à l'extérieur de la cellule, ainsi les écoulements internes ne rencontrent pas d'obstacles. Il est ainsi possible de générer des écoulements ayant des conditions aux limites bien maîtrisées, ce qui est nécessaire à l'interprétation et à l'exploitation des résultats de mesures.

5.3 LA MAQUETTE D'ESSAI

Le réseau de ventilation (Cf. Schéma 5—2) qui est raccordé au volume tridimensionnel est conçu de manière à être utilisable pour les différentes configurations du volume tridimensionnel. Le montage exposé sur le Schéma 5—2 est celui qui a été fait pour reproduire le plus fidèlement possible les écoulements des différents essais de feux réels qui ont été réalisés dans la cellule 80 m³ de l'INERIS (Cf. Photo 5—2). Cette cellule, également mise en œuvre à l'INERIS dans d'autres projets de recherche concernant l'incendie, permet de réaliser des feux réels en espace confiné sous différents régimes de ventilation.

Les paramètres généraux de conception du réseau de ventilation de la maquette sont :

- la possibilité de reproduire à échelle réduite les feux étudiés dans la cellule 80 m³ de l'INERIS,
- son adaptabilité à de nombreux cas de fonctionnement pour des débits et des proportions d'air et d'hélium¹⁰ très différents,
- une branche de re-circulation du mélange air-fumées qui permet d'observer les phénomènes que l'on retrouve dans la réalité lorsque la ventilation est équipée d'un recyclage d'air neuf,

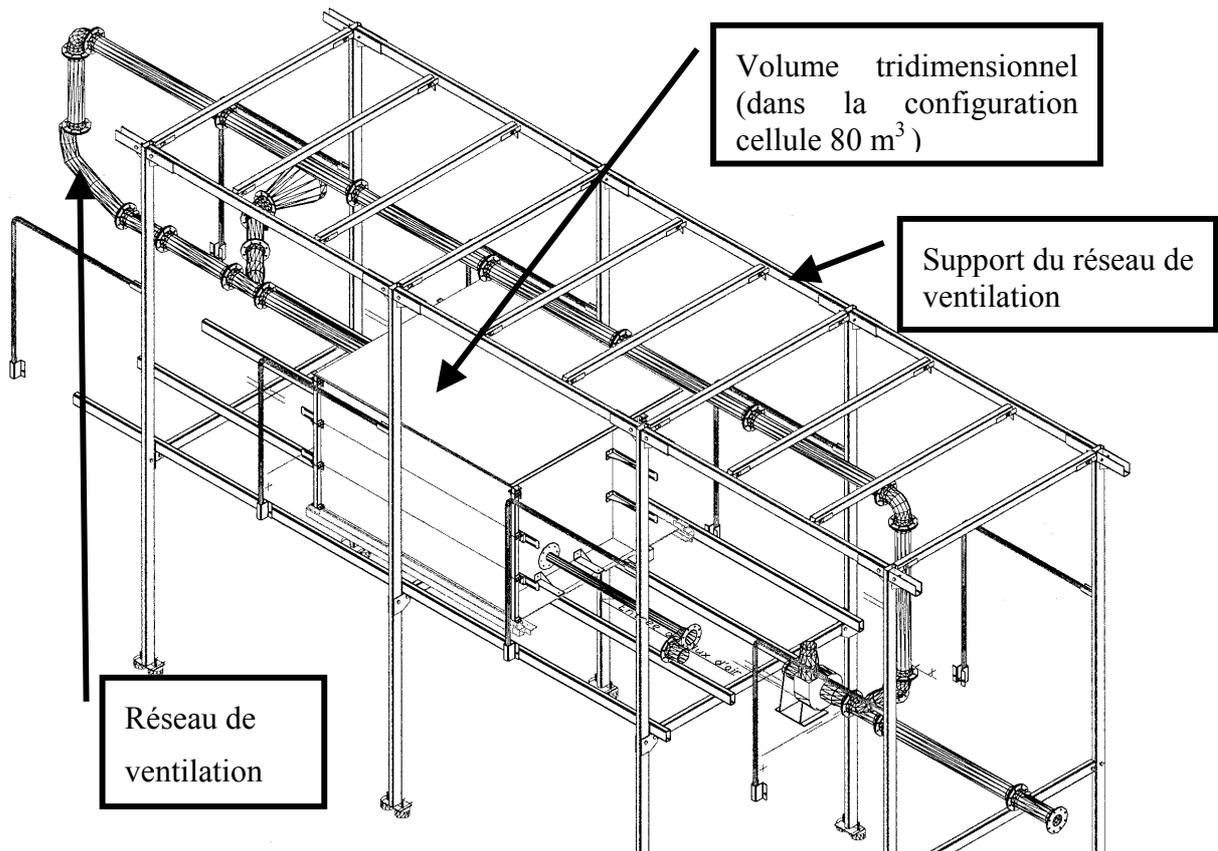


Schéma 5—2 : Volume tridimensionnel d'étude de dispersion raccordé au réseau de ventilation

¹⁰ Pour mémoire les fumées d'incendie seront simulées par des mélanges Air-Hélium.

- cette re-circulation permet également de caractériser les mélanges de fumées simulées et de générer des phénomènes transitoires de déséquilibre du réseau, induits par la source d'incendie elle-même ou par l'ouverture et la fermeture de clapets,
- sa modularité pour la simulation d'autres cas d'étude (tunnels, parking souterrains, entrepôts...) imposant des éléments constituant le réseau de ventilation (tuyauteries, coude, registre) facilement démontables et réutilisables.



Photo 5—2 : Vue d'ensemble de l'essai dédié à la ventilation du couplage 1D13D

5.4 SIMULATION DES SOURCES ACCIDENTELLES (INCENDIE, FUITE DE GAZ)

Un système de génération de fumées a été développé (Cf. Schéma 5—3). Ce système permet la génération de fumées simulant les fumées chaudes d'un incendie réel. La génération des fumées simulées est basée sur la similitude thermique/massique des fumées. C'est-à-dire que les variations de densité, liées à l'élévation de température dans le cas des fumées d'incendie, sont simulées par un mélange air-hélium dont la concentration en hélium est adaptée. La génération des fumées simulées comprend également l'apport d'un aérosol de type 'fumées de spectacle' permettant de visualiser les trajectoires empruntées par les écoulements. L'ensemencement des écoulements qui est indispensable à l'application de la technique de mesure des vitesses par Anémométrie Laser à effet Doppler (LDA) sera réalisé dans un premier temps à l'aide de ce dispositif.

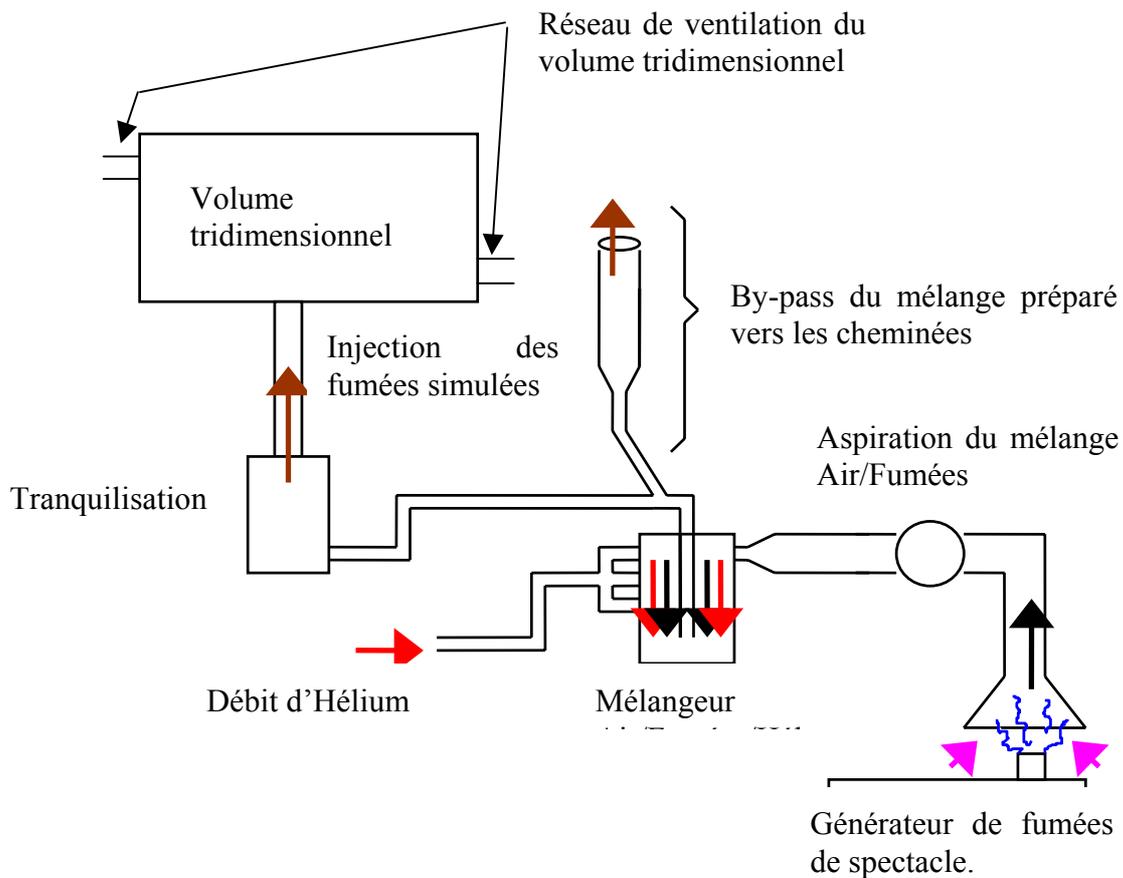


Schéma 5—3 : Système d'injection de fumées simulées d'incendie

5.5 PRINCIPES DES ESSAIS REALISES

Les principes qui ont été adoptés pour les essais réalisés à ce jour ont fortement été influencés par les délais raccourcis en fin de projet. A ce titre, ils ont été limités à la réalisation d'une seule expérience complète de validation du couplage 1D/3D.

Il a finalement été possible de réaliser un ensemble de mesures et visualisations sur un régime d'écoulement incluant deux variantes de fin de protocole d'essai. L'écoulement simulé correspond à une cellule dont le débit de ventilation en air frais est constant durant tout l'essai et dans laquelle on simule la présence d'un incendie par un mélange air-hélium. Les débits et réglages choisis n'ont pas pour but de représenter un incendie déterminé mais ont été choisis pour obtenir un régime stratifié des fumées dans la cellule et ainsi, avoir des hétérogénéités fortes entre un endroit et un autre de la zone tridimensionnelle (la cellule), hétérogénéité qu'il est important de bien savoir calculer et prendre en compte dans un écoulement global incluant une zone 1D et une zone 3D.

On donne ci-dessous des visualisations chronologiques (Photo 5—3 à Photo 5—6) recueillies au cours d'un de ces essais.

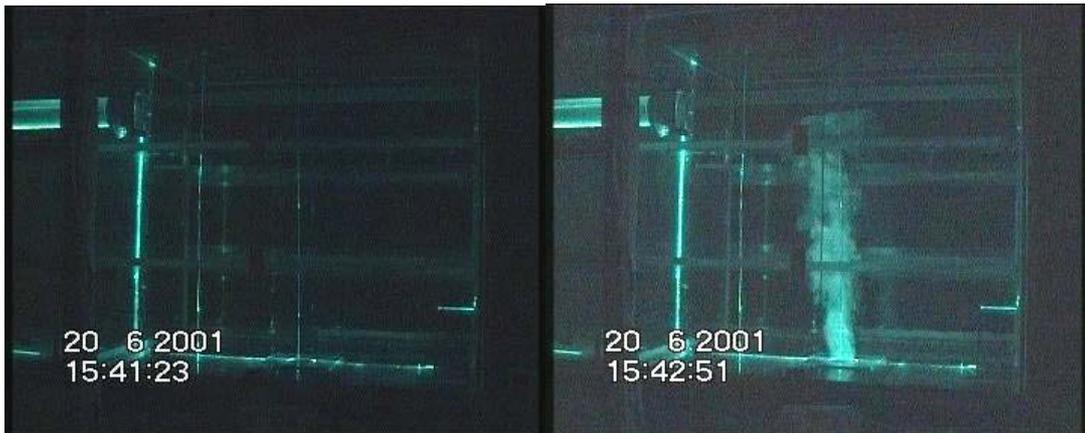


Photo 5—3: Visualisation de référence avant essai (gauche) et début de l'injection de la source accidentelle de type 'incendie' (droite).

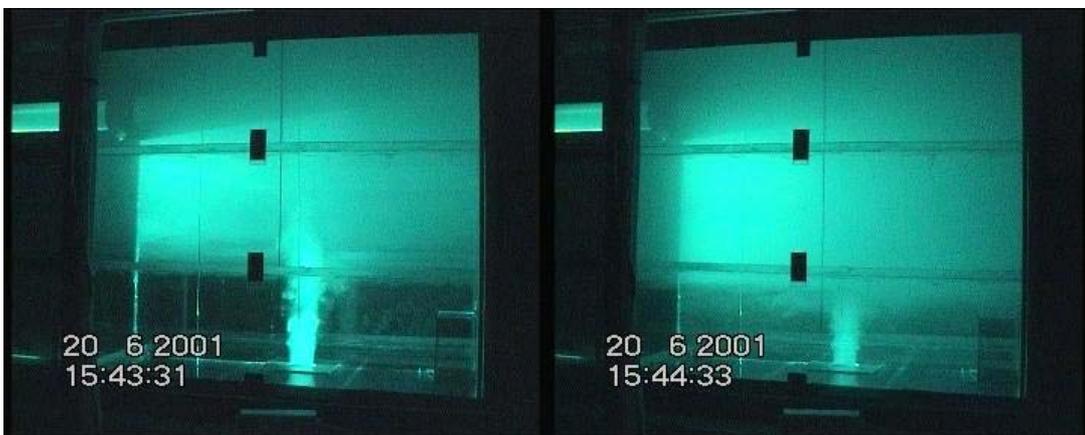


Photo 5—4: Evolution de la stratification.



Photo 5—5 : Stratification durant l'état stationnaire de l'essai (gauche) et durant la ventilation de la cellule après arrêt de la source (droite) impliquant la destratification

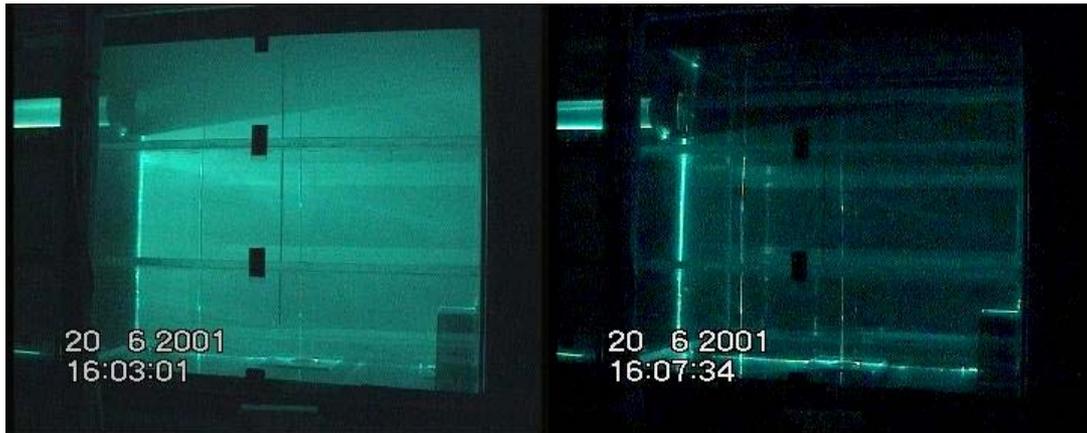


Photo 5—6 : Ventilation de la cellule après arrêt de la source (gauche) et visualisation de référence après essai (droite).

La connaissance d'un seul régime d'essai ne suffira certainement pas pour réaliser une validation complète du couplage 1D/3D. Cependant, les données recueillies sur le régime d'essai exposé ici sont assez complètes, tant du point de vue de la connaissance précise du réseau aéraulique (1D) mis en place autour de la cellule tridimensionnelle (3D) que de la cellule 3D elle-même.

En effet, pour un régime d'essai, nous avons obtenu une description complète des débits, pressions et concentrations relatifs au réseau 1D ainsi qu'une description fine de la répartition des concentrations en hélium (représentatives de la source accidentelle) dans la zone tridimensionnelle. De plus ces mesures intéressent, pour ce régime d'essai, à la fois les phases stationnaires et les phases instationnaires du régime.

D'une façon générale, les essais entrepris l'ont été dans un souci de qualité et d'exploitabilité des mesures obtenues. Ainsi, des essais de répétabilité ont été menés de nombreuses fois et l'ensemble des mesures a été validé par des étalonnages raccordés COFRAC. Des essais ont aussi porté sur la vérification de l'influence de la méthode de visualisation sur les mesures. Ces tests ont montré que le système de visualisation d'écoulement n'avait pas d'influence sur l'écoulement lui-même et se comportait donc comme un traceur représentatif de la teneur en fumées d'incendie simulées.

6. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES VALIDATIONS NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE

Comme il a été précisé au § 3.3 la validation du modèle numérique de couplage 1D/3D nécessite une bonne maîtrise des différents maillons de cette recherche. En effet, pour valider le couplage 1D/3D, il s'agira de savoir déterminer la part des erreurs relatives à la partie 1D du calcul, ou à la partie 3D du calcul ou encore, et de façon tout aussi importante aux données expérimentales de validation.

6.1 VALIDATIONS NUMERIQUES

Les principaux développements de base de New-Vendis se sont achevés en 2000 sur la programmation des effets de base d'un réseau : pertes de charges linéiques et courbes de fonctionnement des ventilateurs. La prise en compte des variations de densité de l'air sur ces effets de base a également été programmée. Une étape de validation importante a été réalisée sur cette version de base du code 1D. Elle a permis de valider les différentes parties du code (mailleur, déclaration des scénarios, résolution, post-traitement des résultats) sur des cas simples et d'évaluer les possibilités de l'outil sur des cas complexes [10]. Cette étape de validation a permis ensuite l'implantation et le test d'effet plus complexes tels que les effets mobiles et l'implantation de modèles de transfert de chaleur précis. Puis, finalement l'implantation du système de communication entre New-Vendis et Phoenix a été réalisée. On ne présente ici que certaines validations parmi celles qui ont été effectivement réalisées aux différents stades du développement.

6.1.1 Cas d'un réseau avec un ventilateur

Le cas test suivant a également servi à valider la partie préparatoire au calcul mais nous ne détaillons pas ici les résultats obtenus. Nous avons testé 3 effets :

- Ecoulement induit par une branche à débit imposé
- Ecoulement induit par un ventilateur
- Détermination du point caractéristique d'un ventilateur auxiliaire

L'article de référence pour cette validation est de Scott et al. [14].

La configuration du réseau est la suivante :

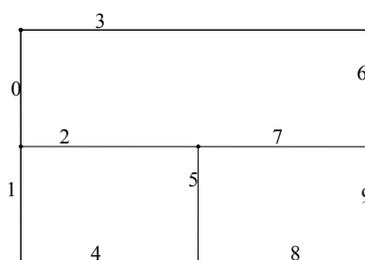


Figure 6—1: Représentation des branches du réseau de référence.

On ne présente ici que le cas de l'écoulement induit par un ventilateur.

La courbe de ventilateur est donnée par les points suivants :

Débit	0	0.5	1	1.5	2.5	2.75	2.77	2.78	2.95	100
Pression	35.60	33.60	32.80	31.20	28.40	26.50	26.30	26.20	24.40	28.80

Tableau 1: Caractéristique du ventilateur

Branche	0	1	2	3	4	5	6	7	8 et 9
Débits de référence	-1.167	0.833	0.333	-1.167	0.833	1.667	-1.167	-1.333	2.5
Débits calculés	-1.168	0.834	0.334	-1.168	0.834	1.666	-1.168	-1.332	2.5

Tableau 2: Tableau des résultats obtenus

La valeur du test d'arrêt correspond à la valeur minimale que la somme des contributions (sur les mailles au cours d'un cycle complet) doit atteindre pour que l'on considère le calcul comme convergé. Pour ce cas, cette valeur valait 10^{-3} , on peut voir que les résultats calculés sont effectivement exacts à 10^{-3} près.

6.1.2 Validation du transfert thermique par convection et rayonnement

La validation du transfert thermique a été réalisée en reproduisant le modèle théorique à la fois sur tableur et dans New-Vendis. L'indépendance du pas de temps choisi dans New-Vendis par rapport à la solution stationnaire obtenue a été vérifiée. Cet exemple fait intervenir le raffinement local 1D.

Les résultats obtenus qui font intervenir à la fois le transfert thermique par rayonnement et par convection montrent (figure ci-dessous) la très bonne concordance des résultats théoriques et les résultats de simulation.

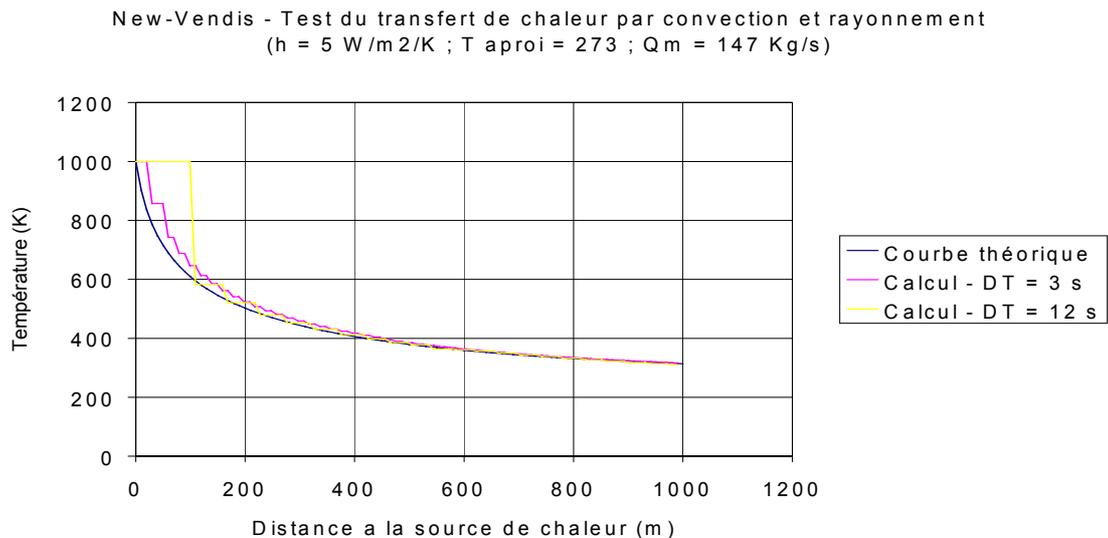


Figure 6—2 : Exemple de validation du transfert thermique fluide/paroi – comparaison entre le résultat théorique et le résultat produit par NewVendis.

On remarque que les effets de marche existent, ils sont liés au modèle général de propagation du fluide utilisé dans les branches. Cependant, la solution théorique est bien respectée par le modèle. Cette solution est améliorée lorsque l'on augmente le raffinement local (DT=3s) ce qui est l'effet recherché. On note aussi que le modèle reste proche de la solution tout en la surestimant par palier lorsque le raffinement est dégradé (DT=12s) ce qui va, a priori, dans le sens de la sécurité.

6.1.3 Validation de l'instationnarité

Cet effet est modélisé par l'estimation d'une contre-pression qui traduit les effets d'inertie des masses fluides. Pour le terme d'inertie, nous estimons cette contre-pression en appliquant le principe fondamental de la dynamique à la masse fluide (ici d'air) contenue dans la branche concernée et nous écrivons que cette force est égale à la contre-pression sur la section de la branche. Nous obtenons l'expression pour P_{instat} :

$$P_{instat} = \rho L \frac{Q_i^{t+1} - Q_i^t}{S_i \Delta t}$$

L'article de référence [15] contient des mesures réelles en tunnel. Le tunnel long de 6560 mètres et d'un dénivelé de 57 mètres, est parcouru par un courant d'air naturel initial d'une vitesse de 1 m/s. Il se trouve dans le tunnel une masse d'air d'environ 400 tonnes. Nous supposons qu'il s'agit d'air sec. Le coefficient de rugosité de la paroi vaut 0.025. Le graphique ci-dessous représente la comparaison des montées et descentes de la vitesse de l'air dans le tunnel lors de la mise en fonctionnement et de l'arrêt de ventilateurs.

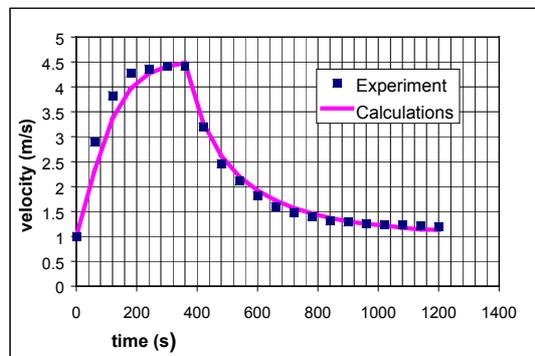


Figure 6—3 : Evolution en fonction du temps de la vitesse de l'écoulement dans le tunnel.

Les résultats obtenus par New-Vendis sont très satisfaisants. Nous voyons que la phase de mise en route est un peu moins bien simulée que le retour à l'écoulement initial. Nous expliquons cela par les hypothèses faites sur le cas test qui sont légèrement imprécises notamment sur la densité qui a été estimée et conservée constante.

6.2 VALIDATIONS EXPERIMENTALES

On appelle dans ce paragraphe 'validations expérimentales', la validation des mesures elles-mêmes réalisées sur le dispositifs d'essai.

Comme il est précisé plus haut, il est effectivement important de connaître les erreurs expérimentales de façon à savoir quelle seront les différences acceptables entre des résultats numériques et les résultats expérimentaux lorsque ceux-ci seront confrontés.

D'une façon générale, pour l'ensemble des mesures réalisées, une attention particulière à la qualité de celles-ci a été portée. De plus, les essais ont été répétés plusieurs fois de façon à s'assurer de la bonne maîtrise des conditions d'essai. Ceci est extrêmement important lorsqu'il s'agit de valider des développements numériques pour lesquels les conditions limites et initiales doivent être bien connues.

On donne ci-dessous quelques indications sur la vérification des mesures réalisées durant les essais ainsi que sur le dispositif d'acquisition de données.

6.2.1 Capteurs de pression.

La précision de la mesure est de +/- 0,25 % de la lecture. Pour chaque appareil, un certificat d'étalonnage raccordé au COFRAC est disponible. Des essais préliminaires ont permis de définir les gammes des appareils selon leur emplacement sur le dispositif d'essai. Ainsi, des transmetteurs de pression allant de la gamme +/-50 Pa à +/- 3000 Pa ont été disposés sur les dix points de mesure.

6.2.2 Capteurs de vitesse d'écoulement.

6.2.2.1 Anémomètres à moulinet.

La vitesse de rotation de l'hélice varie à peu près linéairement avec la vitesse d'écoulement, de plus elle est pratiquement indépendante des paramètres tels que pression, température, densité et humidité. La gamme de mesure est de 0,5-20 m/s. La précision de la mesure est de +/-3 % de la lecture. Pour chaque appareil, un certificat d'étalonnage raccordé au COFRAC est disponible.

6.2.2.2 Anémomètre à fil chaud.

La vitesse du gaz est proportionnelle à la chute de température du fil chaud. Ce principe de mesure est donc sensible à la composition du gaz compte tenu des différentes capacités calorifiques des gaz. La gamme de mesure est de 0,1-20 m/s. La précision de la mesure est de +/-0,03 % de l'affichage et +/- 2 digits pour le transmetteur et de +/- 0,06 m/s pour le capteur. La précision du capteur est issue d'un certificat d'étalonnage raccordé au COFRAC. Ce capteur a été positionné à un endroit où le gaz circulant est uniquement de l'air (l'étalonnage étant réalisé dans les mêmes conditions).

6.2.3 Capteurs de concentration.

Le suivi de la teneur en hélium est assuré par un spectromètre de masse réglé sur la masse de l'hélium. L'appareil est conçu pour une gamme de mesure linéaire comprises entre 10^{-6} et 1 % en volume. Les teneurs en hélium à mesurer étant comprises entre 0 et 100 % (0%=air de ventilation, 100%=hélium pur représentant des fumées d'incendie à une température d'environ 2000K), un système de dilution des gaz à analyser a été mis en place permettant de se situer à l'intérieur de la gamme (0-1%). Le spectromètre est calibré à une valeur de 1% au moyen de débitmètres massiques. Une étude consistant à générer de l'hélium à différentes teneurs et à analyser en parallèle les teneurs en hélium (spectromètre) et en oxygène (analyseur SERVOMEX paramagnétique) a permis de démontrer la linéarité du spectromètre et son aptitude à mesurer successivement des teneurs d'hélium faibles et élevées. La précision relative de la mesure a été estimée à +/- 5 %.

6.2.4 Chaîne d'acquisition de données

La chaîne d'acquisition de données est constituée d'un ordinateur portable de type PC sur lequel est installé un logiciel de programmation en langage graphique (labVIEW 6i) et de matériels d'acquisition de données National Instruments.

Le matériel d'acquisition de données est composé d'une centrale de mesure et d'une carte d'entrées/sorties PCMCIA.

La carte d'E/S est de type PC-AO-2DC. Elle possède deux sorties tension et deux sorties courant analogiques. Un bloc connecteur de type CB-27 assure la liaison entre les sorties tension (0-10 V) de la carte et les entrées analogiques de pilotage des ventilateurs. Le convertisseur analogique/numérique (CAN) de la carte possède une résolution de 12 bit. Sa précision est de $\pm (0,0005 \text{ V} + 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ U})$ ou U représente la tension de sortie.

La centrale de mesure est composée de matériels de type SXCI. Le SCXI (Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation) est un système d'instrumentation et de conditionnement de signaux adapté à l'acquisition de données sur PC :

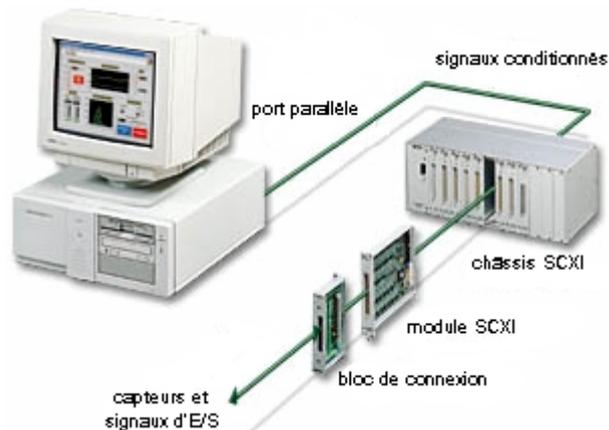


Photo 6—1 : Système d'acquisition de données.

Les modules ont fait l'objet d'un étalonnage et leurs incertitudes de mesure (ramenées à deux écarts types) sont les suivantes :

- SCXI-1200 + SCXI-1302 : $\pm (0,001 \text{ V} + 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{U})$,
- SCXI-1100 + SCXI-1300 : $\pm (0,0021 \text{ V} + 3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{U})$,
- SCXI-1100 + SCXI-1308 : $\pm (0,008 \text{ mA} + 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{I})$.

L'étendue de mesure du CAN du module SXCI-1200 est de 0-10 V et sa résolution est de 12 bit. La résolution du CAN vaut donc $q = 10/(2^{12}-1) = 2,44 \text{ mV}$ pour les mesures de tension et de 0,001 mA pour les mesures de courant.

L'acquisition des données et la commande des registres et des ventilateurs est effectuée à partir d'un VI (Virtual Instrument) développé sous labVIEW. Ce VI s'occupe de paramétrer la carte et les modules SCXI (gain, sélection des voies de mesures, fréquence d'échantillonnage,...) et de contrôler l'acquisition. Une interface, Measurement & Automation Explorer (MAX), permet de rentrer des renseignements pour chaque voie de mesures (nom de la voie, description de la voie, unités physiques de la mesure, échelle, courbe d'étalonnage,...). Les données en unités physiques sont enregistrées en temps réel dans un fichier sur le disque dur de l'ordinateur.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le présent rapport de synthèse permet d'avoir une vue générale sur le travail réalisé au cours de ce projet.

En fait, le lecteur aura compris que ce projet jette les bases d'un nouveau développement pour la recherche dans le domaine de la sécurité dans les espaces confinés, qu'ils soient souterrains ou non. On peut schématiser la contribution de ce projet par l'identification de trois sous-projets qui pourront, soit trouver leur achèvement à un niveau opérationnel d'ingénierie à court ou moyen terme, soit être une base de développement de nouvelles recherches.

Le premier a consisté au développement d'un nouveau code de calcul de réseau de ventilation prenant en compte des scénarios accidentels : New-Vendis. Ce code de calcul bénéficie maintenant de l'évolution informatique actuelle y compris celle liée aux réseaux de communication Internet.

Le deuxième consiste en la prise en compte des réseaux de communication dans NewVendis, de façon à simuler un écoulement global en faisant converger les atouts respectifs de différents types de codes de calculs de la mécanique des fluides. C'est ce que l'on a appelé le couplage de codes. Dans le futur, ces principes de simulation pourront devenir un moyen efficace de calculer des scénarios accidentels complexes. Ce projet a produit les premières bases informatiques du couplage de codes de calculs ainsi que les concepts prévus pour les développements à venir.

Le troisième a consisté à mettre en place un nouveau laboratoire d'essai pour la simulation à échelle réduite de situations accidentelles dans les espaces confinés. Durant ce projet, la conception de ce laboratoire et de son instrumentation, la qualification des essais prévus et de leur instrumentation, l'étude de la faisabilité d'autres types d'essais en milieux confinés et la production de données de validation pour le couplage numérique de codes ont été réalisées.

Chacun de ces trois sous projets connaît un état d'avancement différent.

Le premier et le troisième sont opérationnels en tant qu'outil de recherche pour la sécurité en milieu confiné et ont produit dans ce projet des premiers résultats : simulation de situations accidentelles en tunnel, et production de données expérimentales de validation.

Le deuxième est moins achevé mais certains des concepts prévus ont déjà été validés : structure du code New-Vendis opérationnelle pour le couplage de code, principes des communications informatiques entre codes implémentés et validés.

Enfin ce projet constitue un point de départ selon au moins deux points de vue. D'une part, l'outil de recherche NewVendis a été pensé pour être à moyen terme adaptable à différents contextes d'ingénierie du risque en milieux confinés (transport routier ou ferroviaire, exploitation minières, stockages, réseaux de canalisations...). NewVendis pourrait donc être la base de départ pour produire des outils adaptés spécifiquement à tel ou tel contexte. D'autre part, les développements expérimentaux réalisés au cours du projet, et en particulier la réalisation d'un nouveau laboratoire d'essai, ouvre une voie complémentaire d'étude des risques accidentels en milieux confinés : la simulation sur maquette. Cette voie est complémentaire à celles déjà existantes à l'INERIS qui sont : les essais en grand et la simulation numérique.

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **International Congress CNPP-INERIS** « fire safety in hazardous Enclosed Spaces- Tunnels, Underground spaces, Parkings, Storages », Vernon, France, Novembre 1999.
- [2] **Lacroix, D.**, « Capabilities and complementarities of full size tests, model experiments and numerical simulations, for the study of tunnel fires. », International Conference on fire protection in traffic tunnels, Dresden, 12-13 Sept. 1995.
- [3] **Rhodes, N.**, « CFD code predictions of memorial Tunnel fires tests », Interflam'96.
- [4] **E.Ruffin, A.Carrau, C. Cwiklinski**, Numerical simulations of locomotive fires in the Lyon-Turin tunnel, Conference ITC "Tunnel Fires and Escape from Tunnels", 5-7 May 1999, Lyon, France.
- [5] **Charters, A., C., Gray, W.A., McIntosh, A., C.**, « A computer Model to Assess Fire Hazards in Tunnels (FASIT), Fire technology, first Quarter 1994, pp134-154.
- [6] **Gunther J., d'Albrun N.** « VENDIS, Ventilation network with color display », CdF/CERCHAR, 1984.
- [7] Secours dans les incendies en tunnel. Groupe de travail dirigé par la 'Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles'. Janvier 2000.
- [8] **Cross, H.**, « Analysis of flow in networks of conduits or conductors », Bull. Ill. Engng. Exp. Sta No. 286,Urbana , 1936, 29p.
- [9] **E. Ruffin, S. Daëron**, « Mise au point d'un outil de simulation de situations accidentelles en réseaux souterrains », Rapport d'Avancement annuel 1999, INERIS.
- [10] **S. Daëron, E. Ruffin** « Calculations of fire smoke behaviour in long rail tunnels », 1st International Conference 'Tunnels and Underground Station Fires', Hong-Kong, 3-4 mai 2000.
- [11] **T. Maëda, M. Kinoshita, H. Kajiyama and T. Tanemoto**, « Estimation of aerodynamic drag of shinkansen trains from pressure rise in tunnel », proceeding of 6th international symposium on the aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, Durham, England, 1988.
- [12] **G. Marlair, JP Bertrand et S. Brohez**. 'The Use of the ASTM E 2058 for the evaluation of Under-ventilated Fires'. 7th Int Congress of Fire and Materials, San Francisco, Jan 2001 (22-24) , Proc p 301-313.
- [13] **Ruffin E., Schiestel R., Anselmet F., Amielh M., Fulachier L.** "Investigation of characteristic scales in variable density turbulent jets using a second-order model". Physics of Fluids A, vol. 8, n°6, août 1994.
- [14] **D.R., Scott, F.B., Hinsley**, Ventilation Network Theory, Colliery Engineering, 1951, 1952
- [15] **Lotsberg, G.**, « Measurement of the wall friction factor and the installation efficiency of jet fans. », 9th International symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, 1997.