



HAL
open science

Analyse de risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de ventilation des tunnels

Fatima Ezzahra Ait Talhiq

► **To cite this version:**

Fatima Ezzahra Ait Talhiq. Analyse de risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de ventilation des tunnels. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. hal-02107291

HAL Id: hal-02107291

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02107291v1>

Submitted on 25 Nov 2020

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Université de Lorraine
Collégium Sciences et Technologies
Faculté des Sciences et Technologies

Master Ingénierie de Systèmes Complexes
Spécialité « sûreté de fonctionnement, soutien logistique et maintenance SSM »
Année universitaire 2013-2014

**Analyse de risques et sûreté de fonctionnement
des systèmes de ventilation des tunnels**

Mémoire présenté par « Fatima-Ezzahra Ait Talhiq »
Soutenu le « 12 Septembre 2014 »

Stage effectué chez Setec TPI
Immeuble Le Crystallin 191-193 Cours Lafayette 69003 Lyon

Tuteurs industriels : Anne-Charlotte Coupier – Ait Ouakrim
Guillaume Planchenault

Tuteur universitaire : Pierre Cocheteux

SOMMAIRE

Remerciements	4
Introduction générale.....	5
1 Environnement de travail.....	6
1.1 Groupe Setec.....	6
1.2 Historique de la Setec.....	6
1.3 Setec tpi.....	7
1.4 Pôle Equipements et Sécurité	8
2 Organisation du projet de stage.....	9
2.1 Découpage des activités.....	9
2.2 Planification des principales activités	9
2.3 Revues de projet.....	9
3 Prise de connaissance des systèmes de ventilation.....	10
3.1 Présentation des systèmes de ventilation	10
3.2 Synoptique d'un système de ventilation dans un tunnel bidirectionnel	11
3.3 Représentation des processus d'un système de ventilation.....	11
4 Etude d'ingénierie dans le cadre du projet de stage.....	13
4.1 identification du besoin des parties prenantes.....	13
4.1.1 Enoncé de la problématique	13
4.1.2 Finalité, mission et objectif :	14
4.1.3 Délimitation du périmètre de l'étude	14
4.1.4 Exigences des parties prenantes	15
4.2 Définition des exigences techniques.....	15
4.3 Architecture du système support.....	16
4.3.1 Description du système support	16
4.3.2 Architecture fonctionnelle	16
4.4 Architecture organique et physique du système support.....	17
4.5 Réalisation du système support	18
4.6 Intégration du système support.....	18
5 réalisation du projet de stage	19
5.1 Phase préliminaire.....	19
5.1.1 Définition du système de ventilation du tunnel de la Croix Rousse.....	19
5.1.2 Objectif de l'étude de sûreté de fonctionnement	21
5.2 Analyse fonctionnelle du système de ventilation	21
5.3 Analyse dysfonctionnelle du système de ventilation.....	23
5.3.1 Le profil de mission du système de ventilation.....	23
5.3.2 Description des méthodes appliquées	24
5.3.3 Choix de la/les méthode(s).....	28
5.3.4 Déploiement des méthodes AMDE et Arbres de défaillances sur l'intégralité du système de ventilation du tunnel de Croix-Rousse.....	29
5.4 Synthèse	30

6	Activités Hors projet.....	33
6.1	Visite des tunnels	33
6.2	Participation aux réunions de direction de groupe.....	33
6.3	Participation à la présentation de l'outil de Gestion Electronique des Données (GED)	33
	Conclusion	34
	Glossaire	35
	Résumé.....	36
	Abstract	36
	Listes des figures	37
	Liste des annexes.....	38
	Bibliographie	39

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur Bruno SOLER pour m'avoir accueillie au sein de son agence à Lyon et pour m'avoir permis de mener mon stage dans de bonnes conditions.

Je souhaite témoigner toute ma gratitude à Anne-Charlotte COUPIER et Guillaume PLANCHENAULT, d'une part pour avoir accepté de prendre la responsabilité d'être mes tuteurs de stage et, d'autre part, pour leurs qualités humaines. Ils ont su me guider tout au long de ces 24 semaines, endossant successivement les rôles d'encadrant, d'ingénieurs d'études et d'examineurs critiques pour m'aider à prendre du recul sur mes travaux et cela de manière toujours constructive.

Un grand merci à Julien MATHELON qui s'est chargé de me faire visiter le tunnel du Fréjus et de répondre à toutes mes questions.

De la même manière, je tiens à remercier Pauline KERGOMARD et Romain DEBACQUE pour leurs précieux conseils.

Je suis très reconnaissante envers Monsieur Eric LEVRAT, le responsable du master, et Monsieur Benoit IUNG, le responsable de formation, pour m'avoir assistée dans ma recherche de stage et je remercie également tous mes professeurs de l'université de Lorraine.

Enfin, je souhaite remercier Monsieur Pierre COCHETEUX, pour son implication dans son rôle de tuteur universitaire. Sa visite sur mon lieu de stage était bénéfique dans le sens où les discussions échangées ont été intéressantes et ses remarques pertinentes.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ce document constitue mon rapport de stage de fin d'études qui s'est déroulé au sein du pôle Equipements et Sécurité de la société Setec tpi (filiale du groupe Setec), dans l'agence lyonnaise.

Ce stage a pour finalité de mettre en application les connaissances et le savoir-faire inculqués au cours de ma formation en répondant à la problématique exprimée par mon organisme d'accueil. Conjointement, ces 6 mois de stage écoulés symbolisent la porte d'entrée dans la vie active grâce à l'expérience professionnelle que j'ai acquise.

Dans le cadre de sa démarche d'amélioration continue, la société Setec tpi et plus particulièrement le pôle Equipements et Sécurité a suscité le besoin d'apporter une méthode de sûreté de fonctionnement (noté SdF dans la suite du rapport) structurée et adaptée aux systèmes de ventilation dans les tunnels routiers. Le but étant de cerner les modes de défaillances possibles des équipements concourants à la ventilation et leurs conséquences potentielles sur l'exploitation de l'ouvrage.

Cette démarche sera appuyée par la production d'un guide aux ingénieurs du Pôle Equipements et Sécurité. Cet outil de documentation leur permettra de trouver les définitions et démarches nécessaires pour le déploiement des méthodes SdF. Par ailleurs, ce guide permettra de se référer à une préconisation d'analyse appliquée à un système de ventilation existant.

Selon ce contexte s'introduit mon sujet de stage qui vient clôturer mes deux années d'études en master d'Ingénierie des Systèmes Complexes. Le rapprochement entre mon sujet de stage et ma spécialité : sûreté, soutien et maintenance, est un excellent tremplin pour mettre à l'épreuve le savoir-faire qui m'a été inculqué via diverses unités d'enseignement.

A travers mon rapport, je présenterai en premier lieu mon organisme d'accueil en allant du général – groupe Setec, vers le particulier – Société Setec tpi et Pôle Equipements et Sécurité. Après, je décrirai l'organisation de mon travail et notamment le cadre de la démarche de management de projet. Par la suite, j'expliquerai la méthode suivie pour m'approprier le fonctionnement des systèmes de ventilation, puis j'exposerai les différents processus d'ingénierie système que j'ai développés pour définir le besoin du Pôle Equipements et Sécurité, la fonction et les composants du système à mettre en œuvre pour répondre à ce besoin. Enfin, j'expliquerai la réalisation du projet en la concluant par une synthèse des résultats et le plan d'actions à suivre pour les ingénieurs du pôle Equipements et Sécurité.

1 ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

1.1 GROUPE SETEC

Créé en 1957, le groupe Setec (Société d'Etudes Techniques et Economiques) est aujourd'hui une des plus importantes sociétés d'ingénierie françaises. Il rassemble plus de 2400 collaborateurs et a réalisé un chiffre d'affaires de plus de 265 millions d'euros en 2013. La totalité de son capital est détenue par ses principaux collaborateurs. Il bénéficie ainsi d'une totale indépendance vis-à-vis des entreprises, des banques et des groupes d'industriels.

Présent en France et à l'étranger (Maroc, Tunisie, Egypte, Russie, Brésil, Hongrie, etc.) avec ses 26 filiales, le groupe Setec assure la totalité des prestations couvrant toute la vie d'un projet, depuis les études de faisabilité jusqu'à la mise en service.



Figure 1 : Filiales du groupe Setec

1.2 HISTORIQUE DE LA SETEC

La société d'Etudes Techniques et Economiques est née en 1957 de la rencontre de deux anciens élèves de l'école Polytechnique et ingénieurs du corps des Ponts et Chaussées : Henri GRIMOND et Guy SAIAS. La Setec a deux spécificités très visionnaires pour l'époque :

- L'indépendance financière
- L'analyse des problématiques sous un œil non seulement technique mais aussi économique

Devant la croissance rapide de la société, les fondateurs ont mis en place une organisation décentralisée en plusieurs « business units » permettant aux managers de garder la même qualité de contact avec leurs clients et collaborateurs.

Voici quelques exemples de projets qui ont été réalisés :

- Tours à la Défense
- Tunnel de la Croix Rousse
- Pistes de Paris – Charles de Gaulle et de Lyon – Saint Exupéry

- Tunnel sous la Manche
- Pont de Normandie
- L'opéra Bastille et le Ministère des Finances
- Viaduc de Millau
- Pont Charles de Gaulle à Paris
- LGV Est
- Grand Palais à paris



Figure 1: Projets de grandes infrastructures réalisés par le groupe Setec

1.3 SETEC TPI

Avec un effectif d'environ 300 personnes, Setec tpi (Travaux Publics et Industriels) est présente dans toutes les opérations à fort potentiel, qu'il s'agisse d'infrastructures de transports, d'ouvrages de génie civil, de bâtiments complexes ou d'équipements industriels.

Setec tpi est très réputée auprès des maîtres d'ouvrages et des entreprises. Elle a pour but d'apporter une réponse globale et pérenne à toutes les questions posées par un projet en termes d'environnement, d'architecture et de techniques. Elle s'organise autour de différents pôles :

- Ouvrages souterrains
- Structures complexes
- Ouvrages d'art
- Infrastructures linéaires et urbaines
- Equipements et sécurité
- Conservation et rénovation
- Transports et aménagements urbains

Elle est impliquée dans les projets d'infrastructures majeurs de ces dernières années, entre autre :

- Tunnel de la Croix Rousse.
- Tunnel du Fréjus

1.4 POLE EQUIPEMENTS ET SECURITE

Le pôle regroupe une vingtaine d'ingénieurs qui présentent des compétences dans tous les domaines liés aux équipements électriques et mécaniques (ventilation, énergie, fluides) et dans la réalisation de diagnostics et d'études sécurité pour les ouvrages souterrains et en particulier dans les tunnels.

Le pôle regroupe également des experts agréés en matière de sécurité des ouvrages routiers ou ferroviaires afin de répondre aux questions primordiales relatives à la sécurité des ouvrages et de l'exploitation des équipements.

Le pôle Equipements et Sécurité est divisé en deux équipes localisées respectivement à Paris-Central Seine (15-20 personnes) et Lyon-le Crystallin (7 personnes)

2 ORGANISATION DU PROJET DE STAGE

Afin de mener à bien mon projet de fin d'études, je me suis appuyée sur la norme ISO 15288 pour le structurer dans les règles de l'art.

2.1 DECOUPAGE DES ACTIVITES

Dans le cadre de ce projet, mes missions principales se scindent en plusieurs activités basées majoritairement sur le processus technique de la norme ISO 15288 (Voir Annexe 4):

- Prise en main des systèmes de ventilation.
- Identification des besoins du Pôle Equipements et Sécurité.
- Conception de l'architecture fonctionnelle et organique du système que je suis amenée à développer.
- Réalisation technique du système à réaliser en :
 - Développement d'une démarche de sûreté de fonctionnement utilisant différentes méthodes d'analyse SdF
 - Déploiement de la méthode retenue sur un système de cas réel
- Elaboration du guide.

2.2 PLANIFICATION DES PRINCIPALES ACTIVITES

Selon la norme ISO 15288, le processus de planification de projet a pour finalité la production d'un plan de projet efficace et réalisable. Ainsi, après la prise en connaissance du besoin, j'ai produit un planning prévisionnel.

Cette approche m'a permis de fixer un cadre initial au projet et de structurer les différentes tâches et jalons.

J'ai également créé un autre planning relatant mes réelles tâches effectuées. Celui-ci a accompagné le déroulement de mon stage et a permis l'analyse des écarts potentiels par la suite. Cela correspond au processus d'évaluation et contrôle de projet.

« Le planning prévisionnel est disponible en Annexe 1 »

« Le planning réel est disponible en Annexe 2 »

2.3 REVUES DE PROJET

Les revues de projet consistent à garder la traçabilité des décisions prises au cours du déroulement de stage et d'assurer son suivi.

Chaque revue de projet est consolidée par un compte rendu soumis à mes responsables pour validation. Il inclut le bilan de la phase validée et les objectifs de la phase suivante. C'est la finalité du processus de management des décisions.

« Quelques exemples des revues de projets sont disponibles en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** »

3 PRISE DE CONNAISSANCE DES SYSTÈMES DE VENTILATION

Avant d'entamer toute démarche d'études, il est primordial de faire un tour d'horizon des systèmes de ventilation installés dans les tunnels routiers en règle générale et de leur fonctionnement.

3.1 **PRESENTATION DES SYSTEMES DE VENTILATION**

Le système de ventilation d'un tunnel routier peut être défini comme étant un organe de sécurité permettant de limiter les conséquences d'un évènement dangereux dans un tunnel.

En exploitation normale, la ventilation des tunnels a pour objectif de limiter les niveaux de polluants dégagés par les véhicules, elle est communément appelée « ventilation sanitaire ». En cas d'incident, elle assure la sécurité des usagers du tunnel en canalisant au mieux le phénomène dangereux – en général l'incendie. C'est le principe de ce que l'on appelle la « ventilation de désenfumage ».

Il faut savoir que le besoin en ventilation dans un tunnel est toujours aussi essentiel qu'elle que soit la taille de l'ouvrage. Cependant, c'est le type de ventilation qui diffère d'une situation à l'autre.

On distingue deux stratégies de ventilation :

- La ventilation mécanique dédiée aux longs tunnels (longueur généralement supérieure à 500 m), subissant un trafic important.
- Dans le cas contraire, à savoir les tunnels courts avec un faible trafic, la ventilation naturelle peut suffire.

Pour la ventilation mécanique on distingue aussi deux grandes familles :

- **La ventilation longitudinale** : cette stratégie consiste à renouveler l'air du tunnel par des équipements de ventilation appelés accélérateurs et dont le but est de pousser les polluants ou fumées provenant de l'incendie dans un sens du tunnel, ceci afin de protéger les usagers présents en amont¹ de la zone dangereuse. Ce type de ventilation est le plus souvent dédié aux tunnels unidirectionnels non congestionnés (c'est-à-dire dont le trafic peut être important mais ne crée pas de ralentissement ou blocage de la circulation).

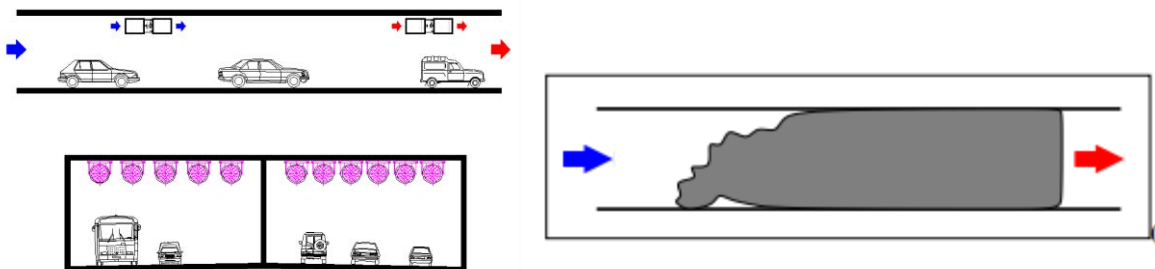


Figure 2 : Principe de la ventilation longitudinale

- **La ventilation transversale** : le concept de cette stratégie permet de souffler de l'air frais provenant de l'extérieur par le biais de bouches de soufflage, reliées à des gaines de ventilation spécifiques. Une autre gaine, dite d'air vicié ou de désenfumage, est utilisée pour contenir et acheminer vers l'extérieur l'air pollué extrait en cas de ventilation sanitaire, ou encore l'air vicié et/ou la fumée extrait(e)s en cas d'incendie. Ce type de système de ventilation est généralement utilisé pour les tunnels bidirectionnels et tout tunnel dont les

¹ Le terme amont désigne ici la zone située avant le point dangereux dans le tunnel (incendie ou zone polluée), dans le sens de circulation.

phénomènes de congestion de trafic sont récurrents (cas des ouvrages urbains en particulier).

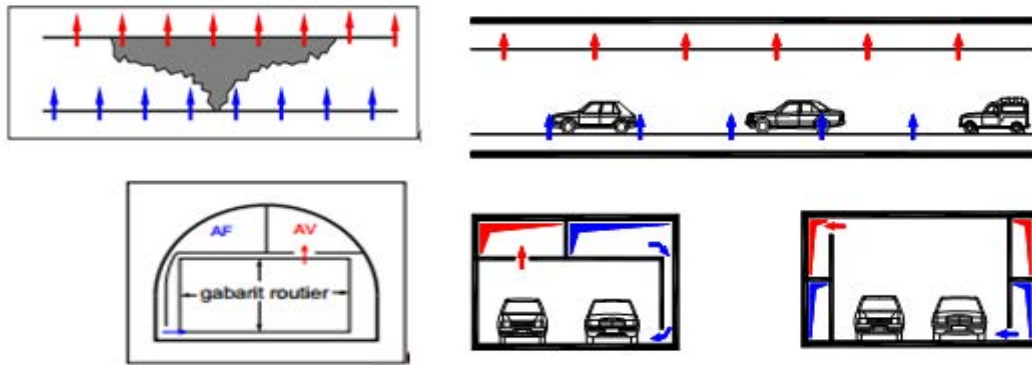


Figure 3 : Principe de la Ventilation transversale

3.2 SYNOPTIQUE D'UN SYSTEME DE VENTILATION DANS UN TUNNEL BIDIRECTIONNEL

Les ingénieurs du pôle avec qui j'ai collaboré ont jugé intéressant de développer un synoptique « personnalisé » d'un système de ventilation transversal de base. Il est basé sur l'arborescence technique que j'ai réalisée initialement pour prendre connaissance du système.

« L'arborescence technique est disponible en Annexe 5 »

« Le synoptique est disponible en Annexe 6 »

3.3 REPRESENTATION DES PROCESSUS D'UN SYSTEME DE VENTILATION

Dans le but de comprendre le fonctionnement de la ventilation sanitaire et de désenfumage, j'ai élaboré une analyse fonctionnelle d'un système de ventilation standard.

Cette démarche d'analyse m'a conduit à la fois à obtenir une vue d'ensemble du système de ventilation et aussi une description structurelle des différentes fonctions qu'il doit remplir.

En effet, dans un premier temps, j'ai réalisé un découpage fonctionnel regroupant les processus et sous-processus qui décrivent le système de ventilation ainsi que les systèmes et sous-systèmes permettant de les réaliser. Un premier exemple, le processus « Insuffler l'air frais » est réalisé par le sous-système « ventilateur d'air frais ».

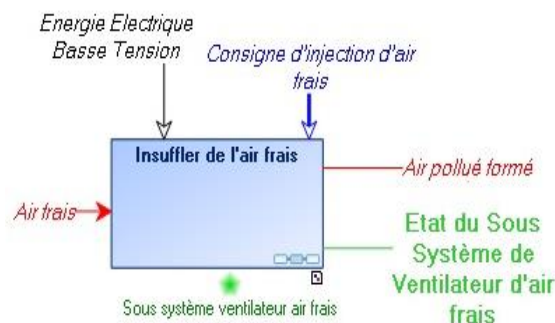


Figure 4 : Représentation du sous processus "Insuffler de l'air frais"

Dans un second temps, sur la base du synoptique, j'ai raffiné la description du système de ventilation en intégrant les composants élémentaires. Ce découpage organique représente le niveau le plus bas souhaité par les ingénieurs du pôle Equipements et Sécurité.

A titre d'exemple, le sous-processus « Convertir l'énergie électrique en énergie mécanique » est réalisé par le composant « Ensemble moteur ».



Figure 5 : Représentation du sous processus "Convertir l'énergie électrique en énergie mécanique"

De plus, j'ai illustré à travers l'analyse fonctionnelle les entités et flux externes qui sont en interaction avec le système de ventilation, notamment les opérateurs, les flux d'information et d'énergie.

J'ai réalisé l'analyse fonctionnelle selon une démarche de modélisation de processus. Elle a été développée en utilisant l'outil MEGA.

Cette modélisation est composée:

- D'un diagramme d'environnement pour la Ventilation Transversale (V.T) et la Ventilation Longitudinale (V.L)
- Des diagrammes de décomposition des processus et sous-processus de la ventilation sanitaire et désenfumage pour la VT.
- Des diagrammes de décomposition des processus et sous-processus de la ventilation sanitaire et désenfumage pour la VL.

« La suite de l'analyse fonctionnelle ainsi que l'explication de chaque processus de ventilation sont disponibles en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** »

4 ETUDE D'INGÉNIERIE DANS LE CADRE DU PROJET DE STAGE

D'après « Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système » (noté IS dans la suite de mon rapport), « *L'ingénierie système est un mode de pensée et une façon d'apprendre les affaires par une approche structurée pour passer du besoin à la solution* ». Mon projet de fin d'études a été élaboré suivant cette démarche en réalisant les différents processus de la norme ISO 15288 (voir annexe) permettant de :

- Définir le système par le biais de la définition des besoins du client et des exigences techniques qui en découlent ;
- Concevoir le système en choisissant l'architecture fonctionnelle et l'architecture organique de la solution la plus adaptée aux exigences exprimées.

Cependant, il faut savoir que l'IS est une démarche abstraite qui nécessite une modélisation selon le niveau d'analyse décrit. Chaque processus fera l'objet d'une illustration suivant le langage Sysml en utilisant la démarche Harmony.

Afin d'avoir un fil conducteur entre les différentes étapes de la démarche IS, j'ai suivi l'approche par cycle de vie représenté en V qui recouvrira l'ensemble des processus de l'IS.

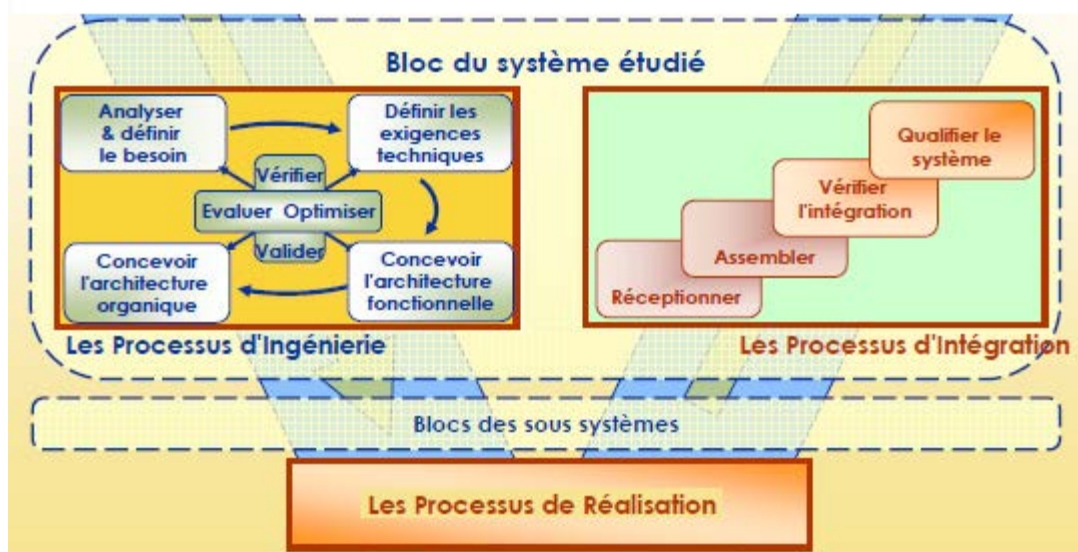


Figure 6 : Cycle en V et les différents processus de l'ingénierie système

4.1 IDENTIFICATION DU BESOIN DES PARTIES PRENANTES

4.1.1 Enoncé de la problématique

Dans le cadre de marchés à maîtrise d'œuvre sur la mise en sécurité ou la construction de nouveaux tunnels routiers, les ingénieurs d'études sont amenés à réaliser le dimensionnement des équipements et notamment des systèmes de ventilation. Ce dernier est axé aussi bien sur l'aspect fonctionnel, à savoir les différents modes de fonctionnement, les caractéristiques techniques des équipements composant le système que sur leur robustesse pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Jusqu'à présent, l'analyse de robustesse était réalisée uniquement sur la connaissance théorique du système et sans méthodologie cadrée. Il est donc arrivé à plusieurs reprises que certains événements

redoutables, non pris en compte dans l'analyse, soient apparus pendant la phase d'essai des systèmes de ventilation voire même après la mise en exploitation de l'ouvrage.

4.1.2 Finalité, mission et objectif :

Dans le cadre du processus de l'amélioration continue et afin que l'on puisse avoir des installations de ventilation en bon état de fonctionnement tout au long de leurs phases de vie, j'ai développé un **système à faire** qui est représenté par **un système support de ventilation** dans la suite de l'étude.

Pour mieux comprendre le système support de ventilation que j'ai été amenée à développer, j'ai décrit :

- Finalité : Le processus d'analyse de robustesse des systèmes de ventilation est structuré
- Mission : Fournir les informations nécessaires pour étudier la robustesse des équipements concourants à la ventilation aux ingénieurs du Pôle Equipement et Sécurité.
- Objectif : Prévenir la production des événements redoutés que peut courir le système de ventilation

4.1.3 Délimitation du périmètre de l'étude

4.1.3.1 Parties Prenantes

Les entités qui interagissent avec le « système support » en permanence sont appelées des Parties Prenantes. Dans mon projet d'études, elles sont les suivantes :

- Ingénieurs Pôle Equipement et Sécurité
- MOE (stagiaire)
- Assistance à la MOA (stagiaire)
- Système de ventilation

4.1.3.2 Diagramme de contexte

Dans le but d'avoir une meilleure compréhension du besoin suscité, le langage SysML permet à travers le diagramme de contexte d'explicitier les interactions physiques du système support avec les différentes entités se trouvant dans son environnement.

Le système support que j'ai été amenée à développer dans le cadre de ce projet peut être appliqué aussi bien pour la phase de conception du tunnel (lors de sa construction) que pour la phase de rénovation.

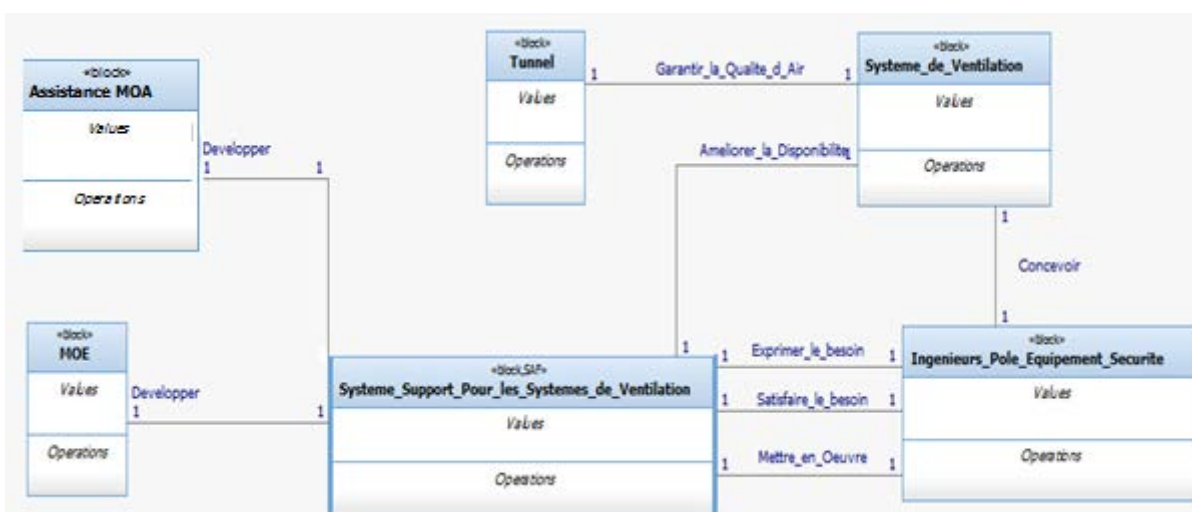


Figure 7 : Diagramme de contexte du système support

4.1.4 Exigences des parties prenantes

Les besoins exprimés par les ingénieurs du Pôle Equipements et Sécurité représentent des exigences que le système support doit satisfaire et respecter dans la mesure du possible.

La présentation du contexte de stage par mes deux tuteurs, lors de la réunion d'initialisation, m'a permis de traduire leur besoins sous forme d'exigences parties prenantes.

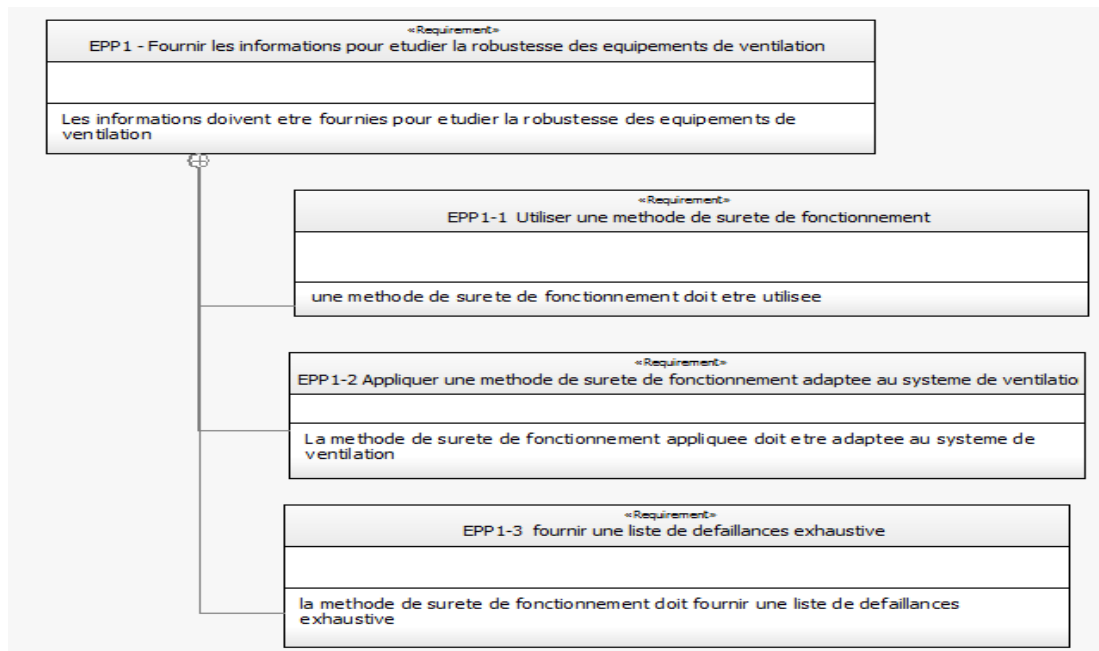


Figure 8 : Diagramme des exigences parties prenantes

4.2 DEFINITION DES EXIGENCES TECHNIQUES

La spécification des exigences parties prenantes précédemment décrites m'a permis de dresser le diagramme d'exigences systèmes. Ces exigences techniques constituent une base pour développer le système support.

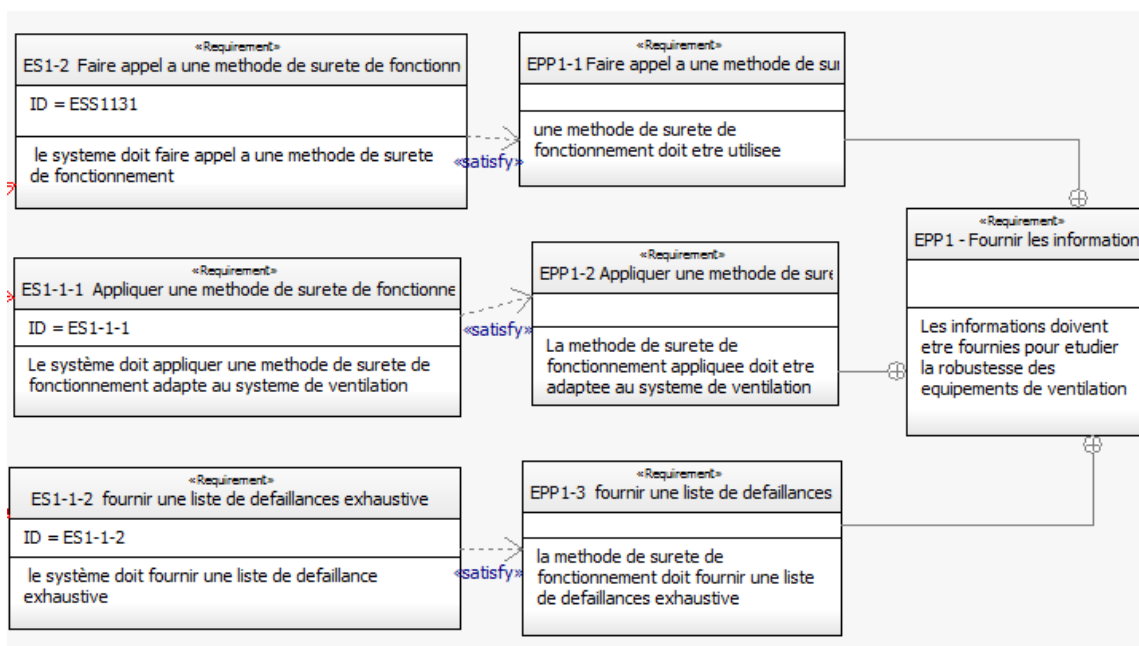


Figure 9 : Diagramme des exigences techniques

4.3 ARCHITECTURE DU SYSTEME SUPPORT

4.3.1 Description du système support

Par le biais de ce digramme, j'ai mis l'accent sur la fonction fondamentale du système support et ses interactions fonctionnelles avec les ingénieurs qui seront amenés à l'exploiter.

Dans le contexte de mon projet, on distingue une relation d'association entre les ingénieurs et les systèmes de ventilation. Elle découle du simple fait que ce sont les ingénieurs qui sont chargés de réaliser les études de conception de ces systèmes.

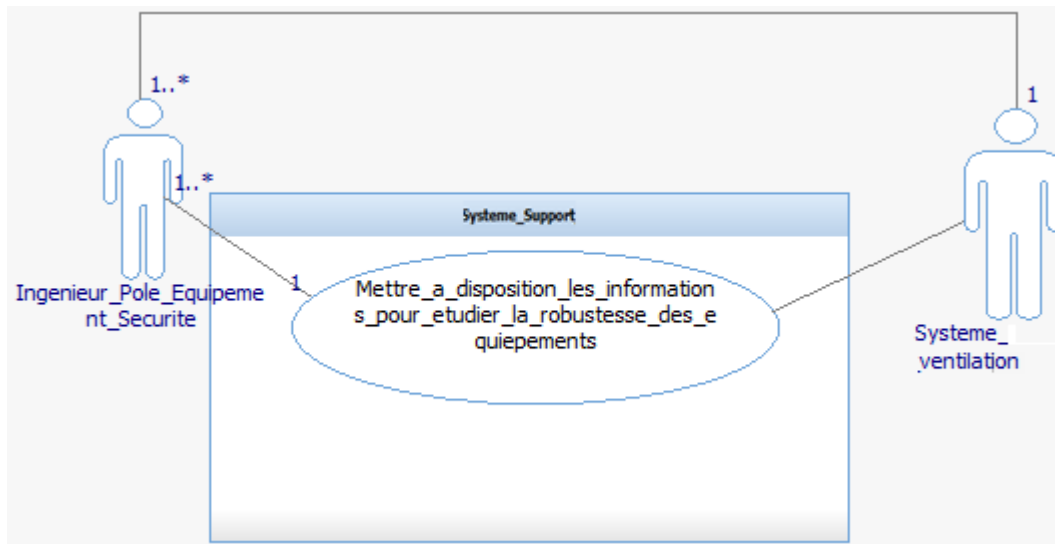


Figure 10 : Diagramme de Cas d'utilisation

4.3.2 Architecture fonctionnelle

L'architecture fonctionnelle dynamique décrit les échanges séquentiels entre les ingénieurs et le système support.

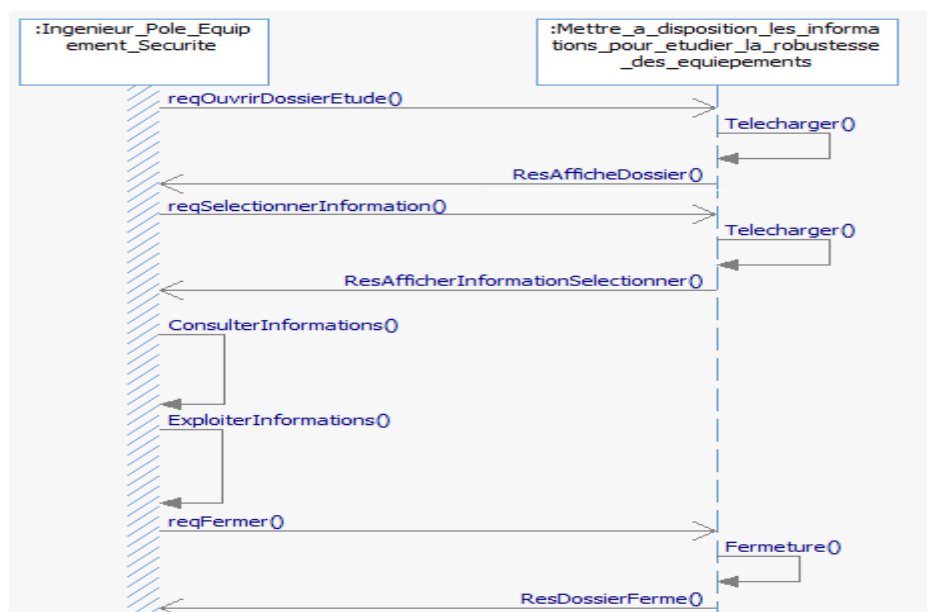


Figure 11 : Diagramme de séquence

4.4 ARCHITECTURE ORGANIQUE ET PHYSIQUE DU SYSTEME SUPPORT

Après la définition de l'architecture fonctionnelle, il faut allouer les fonctions à des composants organiques. Le bloc « Mettre à disposition les informations pour l'étude de robustesse » a alors fait l'objet d'une étude afin de déterminer de la solution la plus adaptée.

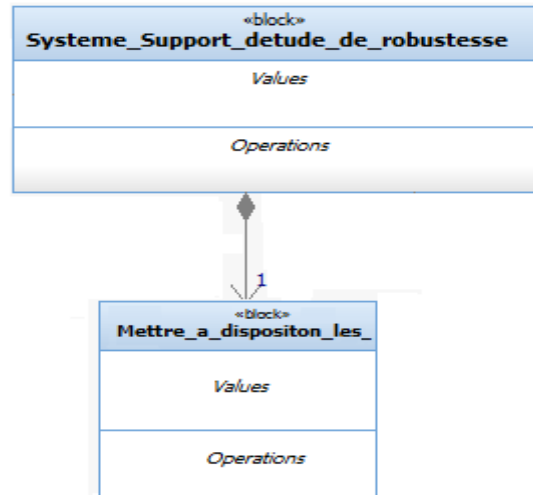


Figure 12 : Diagramme de bloc - Architecture organique du système support

Pour cela, j'ai élaboré une analyse multicritères, appelée « étude de commerce » dans méthode Harmony en me servant des critères d'évaluation (Measures Of Effectiveness MOE) pour choisir parmi les composants (méthodes de sûreté de fonctionnement) listés. Ces critères sont alors classés selon leur importance par rapport aux autres et notés pour pouvoir les comparer.

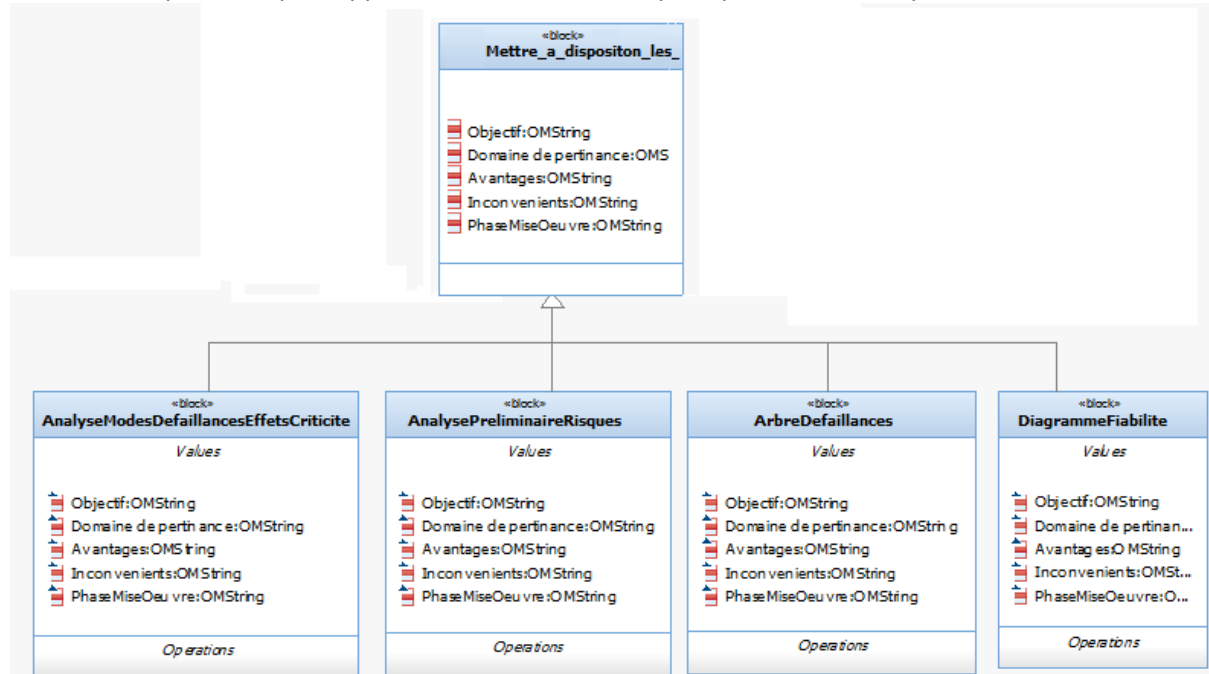


Figure 13 : Diagramme de bloc - Trade study

Cependant, pour consolider cet outil de comparaison, j'ai développé les différentes méthodes de SdF sur une partie limitée du système de ventilation d'un tunnel routier situé dans la ville de Lyon (tunnel de Croix-Rousse). Ce développement s'est effectué uniquement sur la partie « Ventilation sanitaire » de l'ouvrage, pour laquelle les différentes méthodes pouvaient déjà montrer leurs avantages et inconvénients au regard du besoin exprimé par les ingénieurs.

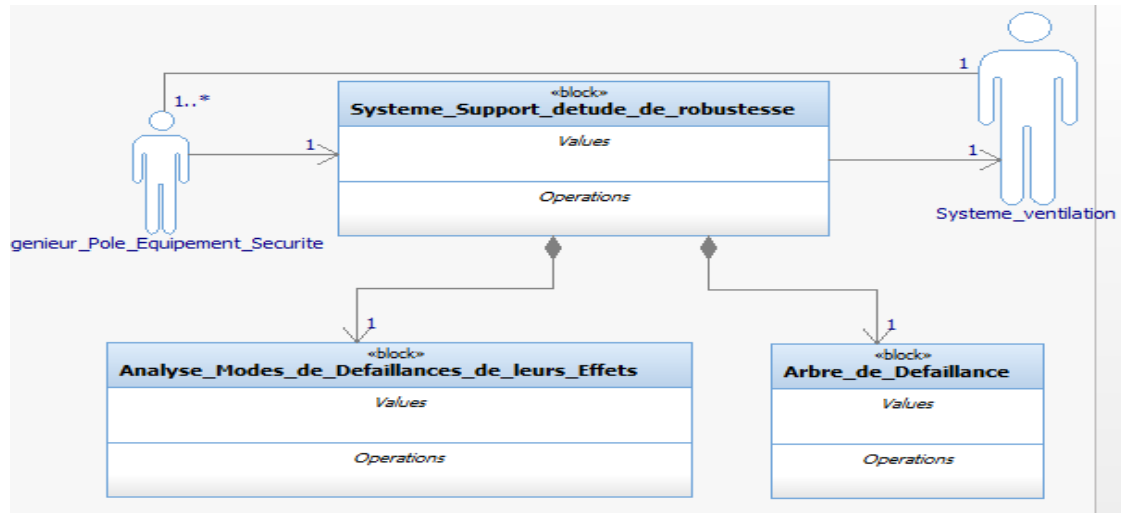


Figure 14 : Diagramme de bloc Composition retenue du « Système Support »

L'architecture physique du système support est alors composée d'une analyse des modes de défaillances de leurs effets et criticité et d'un arbre de défaillance.

Chaque processus a été soumis aux clients représentés par mes tuteurs pour vérification et validation afin de s'assurer qu'il satisfaisait aux exigences.

4.5 REALISATION DU SYSTEME SUPPORT

Le choix final a donné lieu à une réalisation technique et didactique des méthodes retenues sur la globalité du système de ventilation du tunnel de la Croix-Rousse. L'ensemble des études techniques développées font l'objet du chapitre suivant car la réalisation ne fait pas partie des activités de l'IS.

4.6 INTEGRATION DU SYSTEME SUPPORT

La conception des tunnels routiers demande la réalisation d'études des différents systèmes parfois très longues et complexes. De plus, chaque ouvrage étant différent, les études doivent être adaptées au cas par cas, selon les besoins définis par le maître d'ouvrage. C'est pour cette raison que l'intégration de mon système sera réalisée au cours de la prochaine étude de conception de ventilation pour un ouvrage en construction ou en phase de rénovation. La mise en application sera mise en œuvre par les ingénieurs du pôle Equipement et Sécurité.

5 RÉALISATION DU PROJET DE STAGE

La sûreté de fonctionnement est la science des défaillances des systèmes. Elle est axée sur quatre points primordiaux : la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité.

Pour mon projet, je me suis limitée aux techniques qui permettent de prévoir et de supprimer les pannes des équipements de ventilation.

Pour obtenir le référentiel, j'ai été amenée à développer une étude de sûreté de fonctionnement durant laquelle il m'a été indispensable de suivre une démarche d'analyse spécifique dont les principales étapes sont :

- La phase préliminaire :
 - Définition du système de ventilation et de son environnement.
 - Définition de l'objectif de l'étude SdF
- La Phase de l'analyse fonctionnelle:
 - Compréhension des différents modes de fonctionnement du système de ventilation
 - Identification et description des processus et sous processus principaux du système de ventilation
- La Phase de l'analyse dysfonctionnelle :
 - Identification des défaillances intrinsèques et extrinsèques au système de ventilation par le biais des différentes méthodes SdF sur une partie définie du système de ventilation de la croix rousse
 - Déploiement de la/les méthodes retenue(s) sur l'ensemble du système de ventilation
- La Synthèse.

5.1 PHASE PRELIMINAIRE

5.1.1 Définition du système de ventilation du tunnel de la Croix Rousse

5.1.1.1 Environnement du système de ventilation

Le diagramme ci-dessous illustre les différents acteurs et systèmes présents dans l'environnement du système de ventilation du tunnel de la Croix Rousse (notamment l'implantation du tunnel de la Croix Rousse). Je cite également le système support qui va permettre d'étudier la robustesse des équipements concourant à la ventilation de ce tunnel.

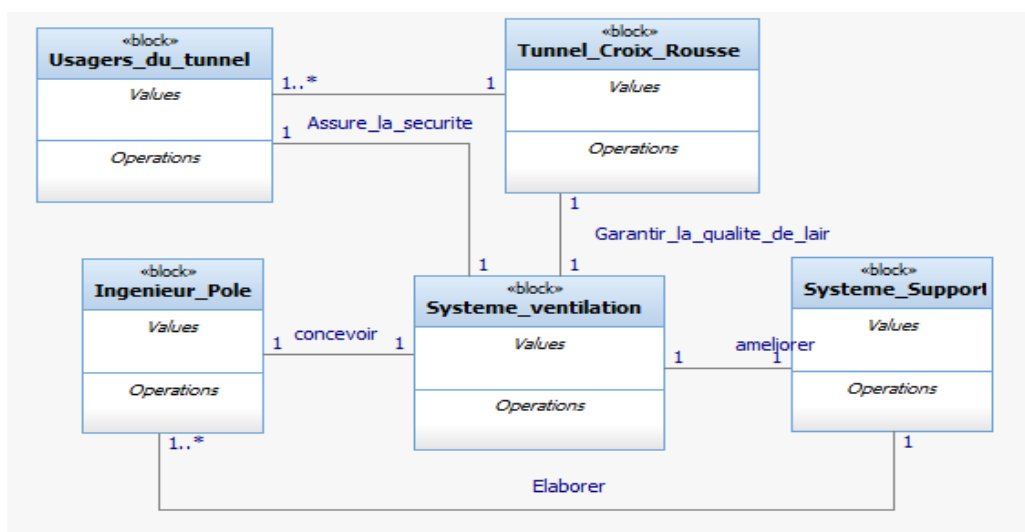


Figure 15 : Diagramme de contexte d'un système de ventilation

5.1.1.2 Description du système de ventilation du tunnel de la Croix Rousse

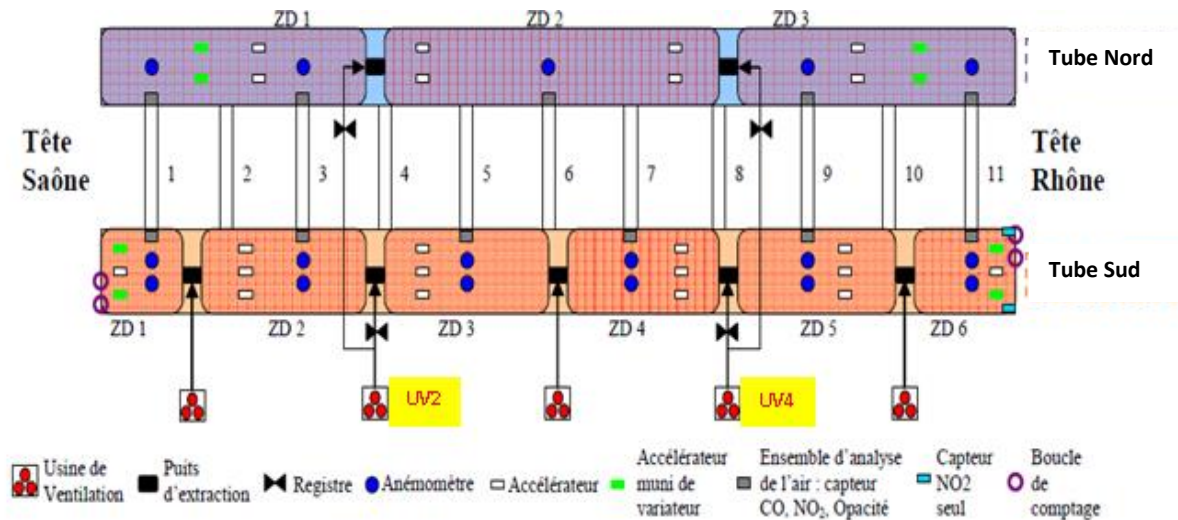


Figure 16 : Schéma de l'organisation du système de ventilation du tunnel de la Croix Rousse

Le tunnel de la Croix Rousse et plus particulièrement son système de ventilation peuvent être définis de la manière suivante :

- Le tunnel de la Croix Rousse est constitué de deux Tubes : Sud et Nord.
- Le tube Sud est bidirectionnel sur 2 fois 2 voies, emprunté par des véhicules légers.
- Le tube Nord est réservé uniquement pour les piétons, les cyclistes et des bus dans le sens Rhône Saône (il est appelé aussi le tube « modes doux »).
- Afin de pouvoir exploiter les modes de ventilation de l'ouvrage, le schéma suivant représente les équipements utilisés :
- Les zones de désenfumage sont les zones délimitées par les puits d'extraction dans lesquels on souhaite confiner les fumées au maximum en cas d'incendie.
- Les puits sont des conduites verticales permettant d'acheminer l'air extrait ou soufflé. Ils sont reliés chacun à une usine de ventilation (UV). Les puits des usines 2 et 4 (UV2, UV4) sont reliés à la fois au tube Nord et au tube Sud.
- Les registres d'aiguillage se comportent comme des vannes. Ils permettent d'isoler le réseau aéraulique du tube sain (tube dans lequel l'incendie n'est pas survenu) en empêchant les communications avec le tube incendié (tube dans lequel survient l'incendie) et de permettre le désenfumage de l'un ou l'autre des deux tubes.

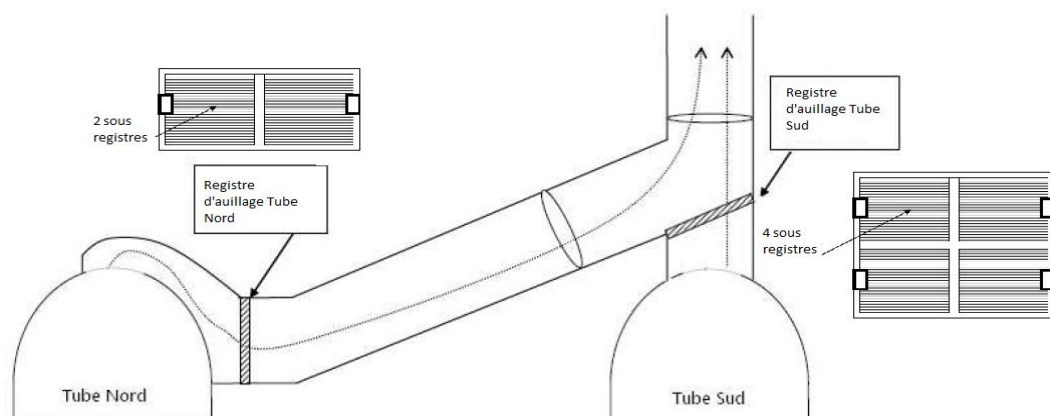


Figure 17 : Position des registres d'aiguillages dans les tubes Nord et Sud du tunnel de la Croix Rousse

- Le registre d'aiguillage du tube Sud est composé de 4 sous-registres, le tube Nord est composé de 2 seulement. Cela est dû au fait de la taille du réseau aéraulique.
- Les 5 usines de ventilation sont composées chacune de 3 ventilateurs.
- Les ventilateurs sont de nature réversible. Ils peuvent servir aussi bien pour le soufflage d'air frais que pour l'extraction de l'air pollué/fumée.
- Chaque ventilateur est équipé d'un registre d'isolement.
- Les accélérateurs uniquement positionnés aux deux extrémités du tunnel sont équipés de variateurs, afin de pouvoir orienter le sens de la poussée d'air (Rhône-> Saône/Saône->Rhône).
- Une école se trouve à côté de la tête Rhône du tunnel de la Croix Rousse. De ce fait, l'évacuation de l'air pollué et les fumées est dirigée dans le sens Saône->Rhône afin de protéger l'école des effets toxiques des émissions des véhicules. Des capteurs NO₂ (dioxyde d'azote) et NO (monoxyde d'azote) sont donc mis en place à cet effet. Le niveau du flux de NO₂ définira le sens de la poussée d'air dans le tunnel.
- Les capteurs d'opacité, CO (monoxyde de carbone), NO servent à relever le niveau de pollution dans le tunnel.
- Les boucles de comptage permettent de calculer le taux de trafic qui traverse le tunnel. Ainsi, pour chaque niveau critique, on incrémente le nombre d'accélérateurs en marche dans le but d'anticiper le taux de polluants dans le tunnel. Actuellement cette fonctionnalité est inhibée.

5.1.2 Objectif de l'étude de sûreté de fonctionnement

En tant que concepteurs des systèmes de ventilation, le besoin principal pour les ingénieurs du pôle Equipements et Sécurité est d'identifier les modes de défaillances et évènements redoutés des équipements de ventilation d'une manière fiable et efficace. L'objectif étant de consolider la robustesse des architectures des systèmes de ventilation par la spécification des mesures nécessaires pour garantir leur disponibilité en cas de sollicitation.

5.2 ANALYSE FONCTIONNELLE DU SYSTEME DE VENTILATION

Pour chaque tube, il existe deux modes de fonctionnement programmés de la ventilation :

- La ventilation sanitaire pour le tunnel de la Croix-Rousse se fait selon deux sous-modes :
 - le sous-mode 100% longitudinal,
 - le sous-mode Extraction et Soufflage.
- La ventilation de désenfumage pour le tunnel de la Croix-Rousse se fait selon deux sous-modes :
 - le sous-mode Evacuation des usagers,
 - le sous-mode Intervention des secours.

Les explications de ces sous-modes sont données ci-après :

Résumé du sous-mode Longitudinal:

Le sous-mode 100% longitudinal est le sous-mode principal pour la ventilation sanitaire (le sous-mode soufflage-extraction est le mode activé uniquement en cas de fort trafic ou de forte pollution). Ses actionneurs principaux sont des accélérateurs. Ils permettent de renouveler l'air du tunnel en fonction du niveau de pollution relevé.

Résumé du sous-mode Soufflage/Extraction:

Le mode Extraction + Soufflage réparti est utilisé lorsque le trafic se densifie, et que le niveau de pollution atteint un seuil prédéfini. Il consiste en l'utilisation de plusieurs usines en soufflage ou en

extraction de manière à répartir les rejets d'air. En outre, il est utilisé pour limiter la consommation énergétique due à l'utilisation d'un grand nombre d'accélérateurs. En effet, les ventilateurs permettent de faire circuler la même quantité d'air en consommant moins d'énergie.

Résumé du sous-mode Évacuation des usagers :

L'objectif de ce sous-mode est de maintenir une vitesse d'air inférieure à 0,5m/s dans la zone incendiée (de manière à stratifier les fumées provenant de l'incendie et maintenir une couche d'air frais à hauteur d'homme). De plus, il faut pouvoir confiner les fumées sur une seule zone de désenfumage (ZD) pour le tube Nord et deux pour le Tube Sud. Cette action se réalise par l'application d'une vitesse d'air de 1,5 m/s de part et d'autre de la zone incendiée par le biais des accélérateurs situés dans le tunnel. En même temps, il faut extraire un débit défini par les ventilateurs d'extraction localisés dans les usines.

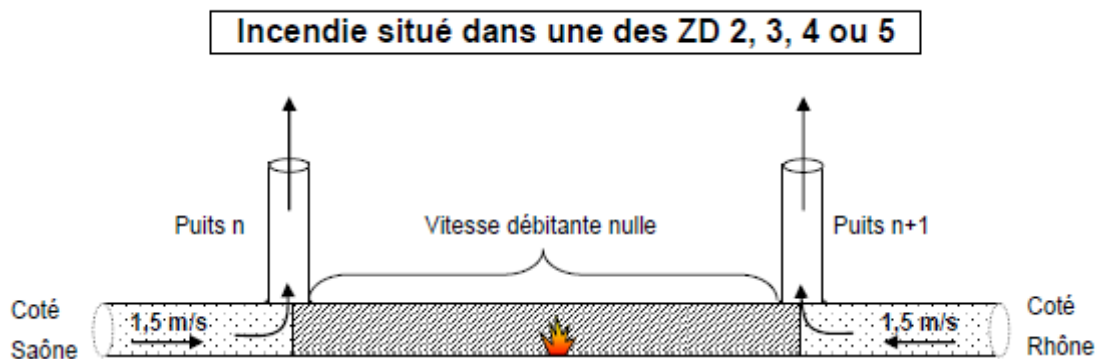


Figure 18 : Illustration du sous mode Evacuations des usagers

Résumé du sous-mode Intervention des secours :

Afin que les pompiers puissent atteindre la zone incendiée pour intervenir sur le sinistre, une vitesse d'air supérieure à 3 m/s dans la zone incendiée est injectée à travers les accélérateurs. Le sens d'injection de l'air reste à définir par l'opérateur en fonction de la localisation de l'incendie, de la zone d'évacuation des usagers, de l'intervention des secours, etc. Le confinement des fumées dans ce cas se fait sur deux zones de désenfumage pour le Tube Sud et une seule pour le Tube Nord en appliquant une vitesse d'air 1,5 m/s. Il faut également extraire un débit défini par les ventilateurs d'extraction localisés dans les usines.

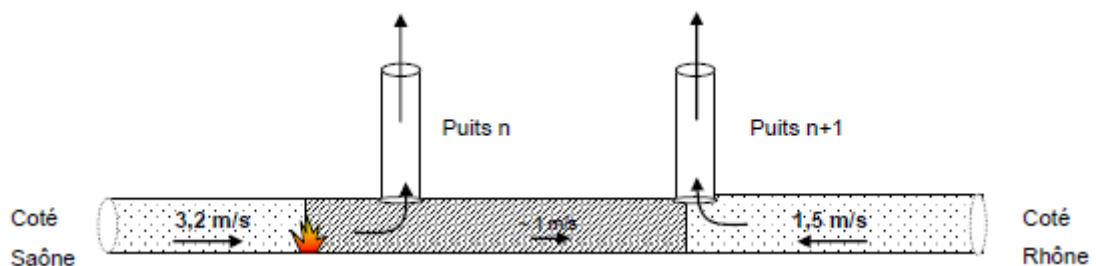


Figure 19 : Illustration du sous mode Intervention des secours

Avant d'entamer la modélisation fonctionnelle du système de ventilation de la Croix-Rousse, l'analyse des différentes données recueillies (descriptif du système de ventilation dans le tunnel de la Croix Rousse et le fonctionnement des différents modes de ventilation) m'a permis de dresser la liste de différentes fonctions concourant à la ventilation.

Elles sont illustrées dans le diagramme ci-dessous. Ce fonctionnement est propre au tunnel de la Croix-Rousse.

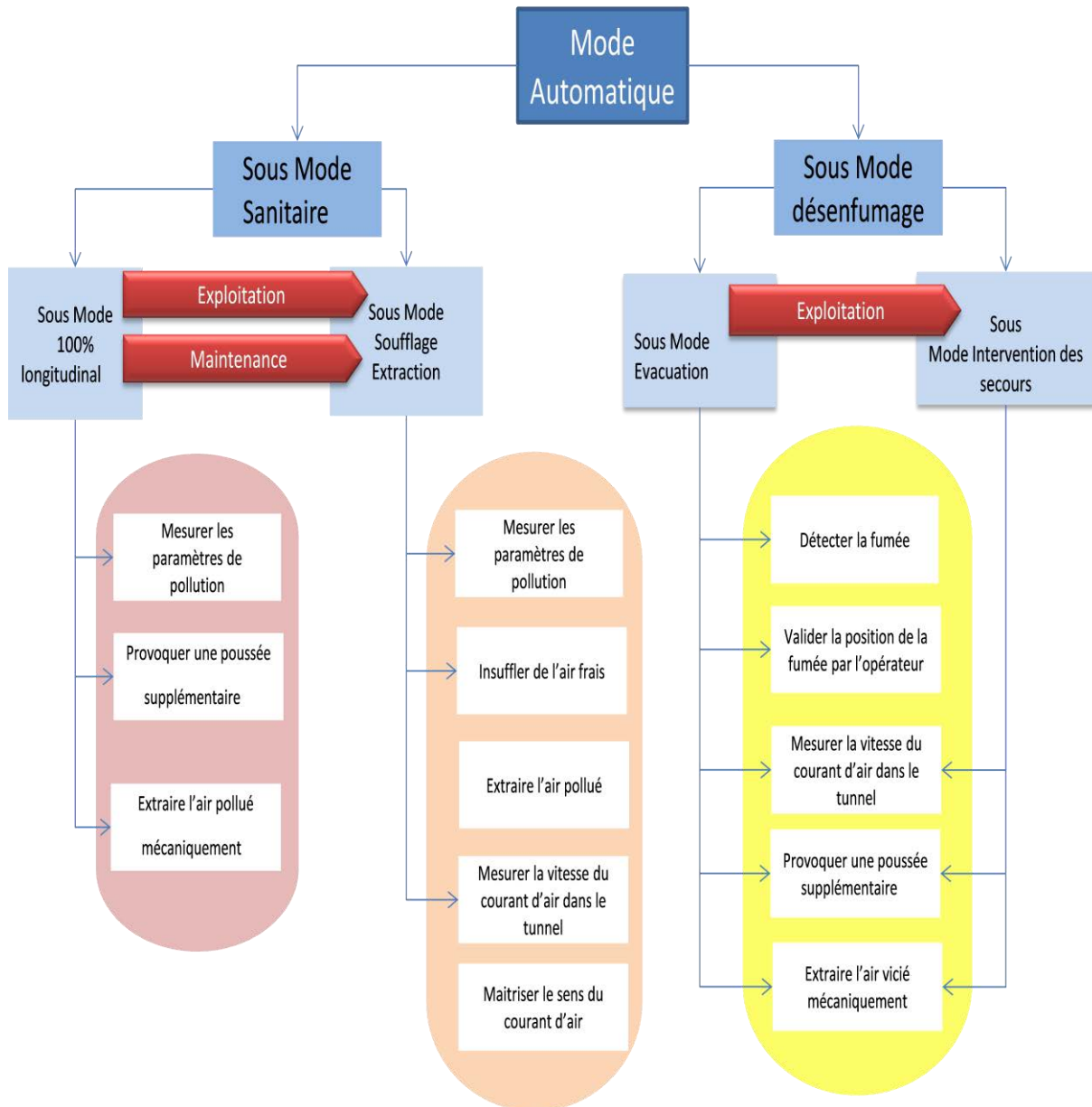


Figure 20 : Organisation du fonctionnement du mode automatique de ventilation dans le tunnel de la Croix Rousse

Sur la base de ce descriptif de fonctions, j'ai pu adapter mon analyse fonctionnelle modélisée initialement pour le cas général d'un système de ventilation standard.

« Un extrait de cette analyse fonctionnelle est disponible en Annexe 8 »

5.3 ANALYSE DYSFONCTIONNELLE DU SYSTEME DE VENTILATION

5.3.1 Le profil de mission du système de ventilation

En dehors du fait que le profil de mission du système de ventilation décrit les phases distinctes de son fonctionnement et les fonctions associées, il prend en compte également les contraintes environnementales qui peuvent conduire à un dysfonctionnement du système.

	Phases de la mission							
	Sanitaire				Désenfumage			
	100% longitudinal		Soufflage Extraction		Evacuation		Intervention des secours	
	Dans le tunnel	Dans les usines de ventilation	Dans le tunnel	Dans les usines de ventilation	Dans le tunnel	Dans les usines de ventilation	Dans le tunnel	Dans les usines de ventilation
Température extérieure	15°C				/			
Contre pression de l'air	/				80 Pa	120Pa	125 Pa	160Pa
Altitude (densité de l'air)	162m							
Température max supportée par les équipements de ventilation	200°C/2h				200°C/2h			

Tableau 1 Profil de mission du système de ventilation du tunnel de la Crois Rousse

Malgré le fait que les accélérateurs peuvent supporter une température atteignant 200°C, on considère de manière systématique que ceux qui sont positionnés au-dessus de l'incendie sont indisponibles.

Comme les équipements de ventilation sont généralement fabriqués dans des conditions environnementales différentes de celles où ils seront exploités, il faut penser à adapter le dimensionnement de ces équipements en fonction de leur rendement théorique délivré par les essais en usine de fabrication et fonction de la densité de l'air (le risque étant d'obtenir des fonctions qui ne répondent pas au niveau de performances souhaité et cela pourrait engendrer un dysfonctionnement du système de ventilation à part entière). Par exemple, un ventilateur conçu dans une usine positionnée à 0m par rapport au niveau de la mer. Le fait de l'implanter dans un tunnel localisé à 1000m d'altitude diminuera ses performances. Dans ce cas, il faut bien penser à prendre en considération la correction sur la densité de l'air dans le dimensionnement du système en question.

Les contrepressions atmosphériques externes ont tendance à influencer le sens du courant dans le tunnel. Dans le cas où elles sont combinées avec la défaillance de certains équipements, cela risque de causer également un dysfonctionnement du système de ventilation.

Ces causes de défaillances à caractère environnemental seront rappelées dans la suite de l'analyse SdF.

5.3.2 Description des méthodes appliquées

J'ai appliqué chacune des méthodes décrites ci-dessous sur le sous-mode **Soufflage/Extraction**, pour **le Tube Sud**.

5.3.2.1 Analyse préliminaire des risques (APR)

L'APR est une méthode inductive. Elle permet d'identifier les dangers d'un système et leurs causes, d'évaluer les risques correspondants et de définir les mesures de prévention à mettre en œuvre.

J'ai décliné cette méthode en :

- Une APR système : elle décrit la cartographie des dangers et des situations dangereuses ;
- Une APR scénario : elle décrit les scénarios et le niveau de criticité à partir de la gravité de l'évènement dangereux ainsi que sa probabilité d'apparition.

La cartographie des dangers est décrite par la définition :

- Des dangers génériques qui précisent la nature ou l'origine des dangers
- Des dangers spécifiques qui précisent la classe de dangers génériques
- Des événements dangereux qui précisent l'événement dangereux associé à la classe de danger

« La grille d'analyse préliminaire des risques est disponible en Annexe 9 »

5.3.2.2 Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)

L'AMDEC est une méthode inductive d'analyse systématique qui permet de recenser les modes de défaillances et d'en rechercher leurs effets. Par ailleurs, elle permet d'identifier les causes des défaillances et éventuellement d'évaluer leurs conséquences. Cependant avant d'aborder l'AMDEC, je me suis intéressée à l'AMDE pour la simple raison que c'est la définition de la criticité qui vient compléter l'AMDE pour donner l'AMDEC (on met généralement en place la partie AMDE mais on ne procède pas toujours à l'évaluation de la criticité).

La définition de la notion de criticité est en fonction de la fréquence d'apparition des défaillances, la gravité des conséquences et la probabilité de non détection des effets.

La définition du profil de mission et la décomposition fonctionnelle du sous-mode Extraction Soufflage m'ont permis d'avoir une bonne base pour développer l'AMDE.

Dans un premier temps, mon étude s'est concrétisée par la réalisation d'une AMDE fonctionnelle n'allant pas jusqu'au composant. Elle présente les éléments suivants :

- Dans les deux premières colonnes, j'ai indiqué le système ou sous-système concerné et sa fonction.
- Les modes de défaillances pour chaque fonction décrivent la façon dont se manifeste la défaillance. Ils peuvent avoir quatre formes :
 - Pas de fonction : La fonction ne se réalise pas au moment de sa sollicitation
 - Perte de la fonction : la fonction cesse de se réaliser
 - Dégradation de la fonction : la fonction se réalise avec des performances dégradées
 - Fonction intempestive : la fonction se réalise alors qu'elle n'est pas sollicitée

« Une illustration plus claire des différents types de mode de défaillance est disponible en Annexe 10 ».

- Les causes potentielles sont de nature extrinsèque (absence de l'énergie électrique, absence de l'ordre de commande ...) ou intrinsèque au système ou sous-système (défaillance structurelle, blocage en position ouverte,...) tout en restant dans un niveau supérieur d'analyse.
- Les effets décrits représentent les répercussions sur le système ou sous-système concerné.

Dans un second temps, l'analyse est orientée vers des défaillances des composants :

- Dans les deux premières colonnes, j'ai cité les composants et leurs fonctions respectives.
- Les modes de défaillances sont en relation avec la fonction technique du composant et sont extraits de la norme AFNOR X60510 (« voir Annexe 10 »).
- Les causes de défaillances sont de caractère intrinsèque.
- Les effets sont décrits comme précédemment.

A ce stade, l'analyse est réalisée sans tenir compte du niveau de criticité, du fait du manque d'informations permettant de quantifier les défaillances. L'étude de sûreté de fonctionnement est donc arrêtée au niveau AMDE.

Remarque :

Les unités de commande et d'énergie sont intégrées dans l'étude comme étant un système à part entière et indépendant du système de ventilation. Pour cette raison, ils sont traités sans analyse approfondie. Les modes de défaillances qui figurent dans l'analyse sont ceux qui donnent lieu à un niveau d'exploitation dégradé voir à l'arrêt de l'exploitation du tunnel.

« La grille de l'analyse AMDE est disponible en Annexe 11 »

5.3.2.3 Arbre de défaillances (AdD)

La méthode AdD permet une représentation graphique des effets et causes des défaillances à l'aide d'une structure d'arbre logique. Son objectif est de suivre une logique déductive en partant de l'évènement redouté pour déterminer de manière exhaustive l'ensemble des combinaisons de causes intermédiaires jusqu'aux plus élémentaires.

A partir des probabilités d'occurrence des événements de base, on peut estimer la probabilité d'occurrence de l'évènement sommet et ainsi d'hiérarchiser les différentes causes possibles pour les contourner par la suite

J'ai exploité l'APR précédemment réalisée pour identifier les événements indésirables susceptibles d'être liés au dysfonctionnement d'un voire plusieurs systèmes. Par la suite, j'ai décrit l'ensemble des causes nécessaires et suffisantes pour sa production selon l'organigramme suivant.

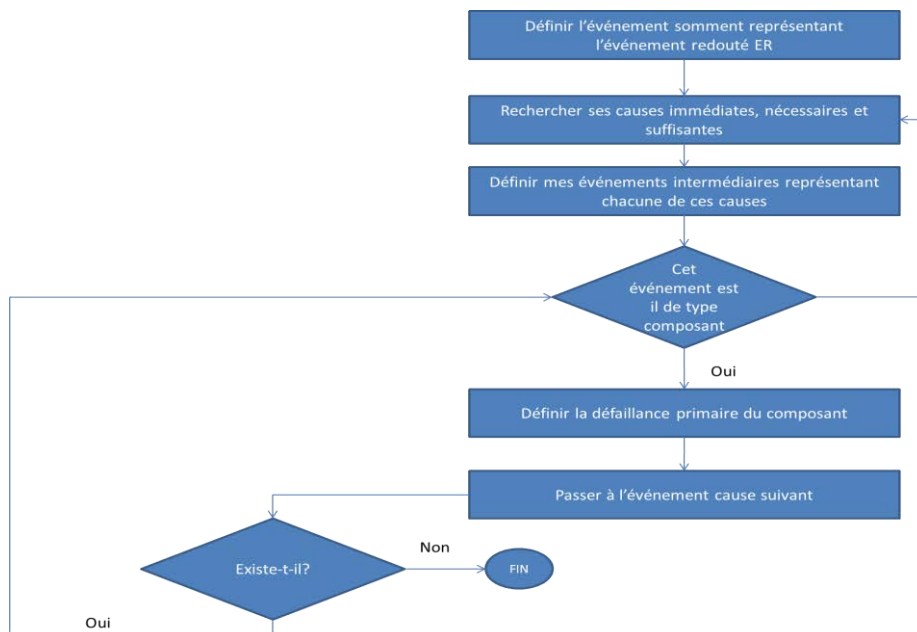


Figure 21 : Organigramme d'application de la méthode AdD

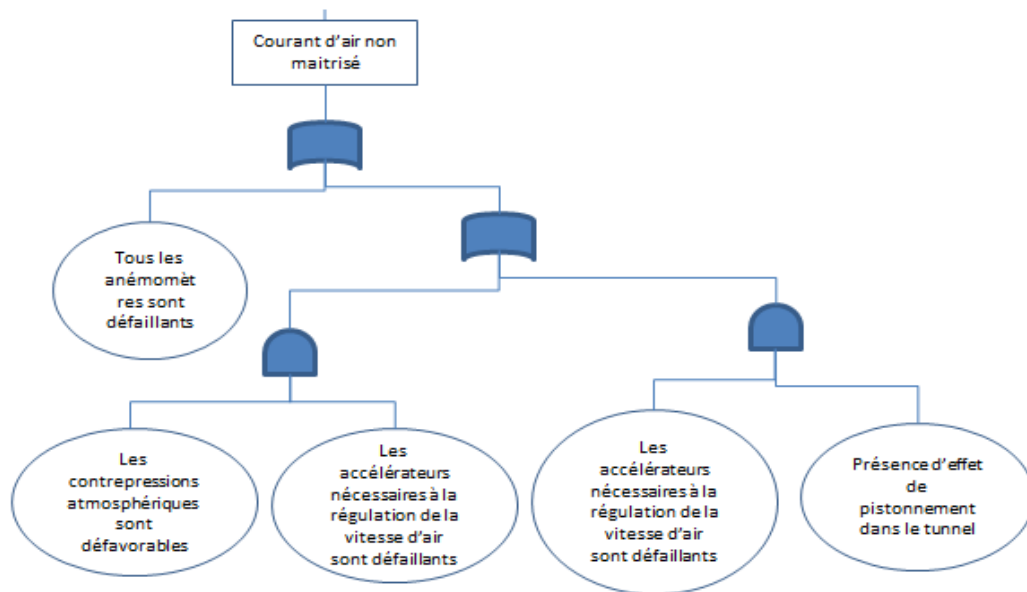


Figure 22 : Exemple d'un arbre de défaillances appliqué sur le Tube Sud pour le sous-mode Extraction et Soufflage

Cet exemple d'un arbre de défaillances pour le sous-mode Extraction et soufflage reflète la partie qualitative de la méthode de l'arbre de défaillances. Elle consiste à réduire l'arbre de défaillances à des combinaisons appelées coupes minimales. Elles sont généralement représentées par les événements de base qui sont nécessaires et suffisants pour provoquer l'événement indésirable.

La liste des coupes minimales de cet arbre de défaillance est donnée ci-après :

- Coupe de niveau 1 : Courant d'air non maîtrisé.
- Coupe de niveau 2 :
 - Anémomètres défectueux.
 - Contrepressions défavorables et accélérateurs défectueux.
 - Présence d'effet de pistonement dans le tunnel et accélérateurs défectueux.

La probabilité d'occurrence de l'événement redouté « courant d'air non maîtrisé » n'est pas calculée car on ne dispose pas des probabilités d'occurrence de ces événements de base, ni du retour d'expérience sur les installations de ventilation et aussi parce que les événements intermédiaires ainsi que les événements de base ne sont pas indépendants.

« La suite de l'arbre de défaillance est la signification des différents symboles illustrés dans l'arbre de défaillances sont disponible en Annexe 11 »

5.3.2.4 Diagramme de fiabilité (DF)

Le diagramme de fiabilité permet d'évaluer la fiabilité des équipements en se reposant sur l'architecture graphique du système. Il se base sur une modélisation de l'ensemble des chemins de bon fonctionnement du système à travers ses constituants. L'évaluation de la fiabilité est déduite de cette modélisation fonctionnelle.

J'ai réalisé un diagramme de fiabilité d'une usine de ventilation responsable sur l'extraction et le soufflage d'air frais. Le schéma ci-dessous décrit les 3 ventilateurs qui composent l'usine. Il est à redondance 1/3 car un ventilateur suffit pour assurer l'extraction ou le soufflage.

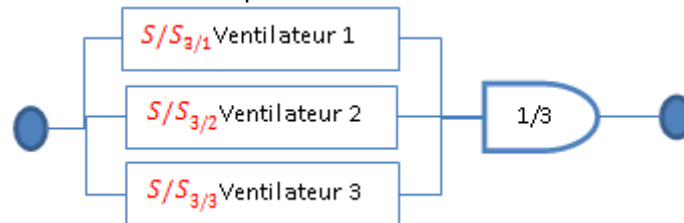


Figure 23 : Diagramme de fiabilité d'une usine de ventilation du tunnel de la Croix Rousse

Donc, la fiabilité de l'usine est donnée par la relation suivante :

$R_{UV} = P(\text{au moins 1 ventilateur parmi 3 fonctionne})$

$$R_{UV} = \sum_{i=1}^3 \frac{3!}{i!(3-i)!} R_V^i (1 - R_V)^{3-i}$$

Avec R_{UV} : fiabilité de l'usine
 R_V : fiabilité du ventilateur

Les valeurs numériques permettant de quantifier la probabilité des différents sous-systèmes et composants ne sont pas disponibles, donc je me suis arrêté à la représentation des blocs.

« La suite de la modélisation de l'usine de ventilation d'extraction et soufflage est disponible en Annexe 12 »

5.3.3 Choix de la/les méthode(s)

Après l'étude réalisée sur la base des méthodes SdF, il a fallu distinguer celle qui répond le plus à la fonction primordiale et aux exigences décrites précédemment.

Pour cela, j'ai dressé un tableau récapitulatif (voir Annexe 13) qui décrit les différents critères présents dans l'étude de marché à savoir :

- les éléments d'entrée,
- les phases de mises en œuvre,
- les différents avantages et inconvénients de chaque méthode.

La présentation des résultats représentatifs des méthodes ainsi que des différents critères de comparaison définis ont fait l'objet d'une réunion avec l'ensemble du groupe (mes deux tuteurs de stage, notre chef d'agence et moi).

Du fait de l'absence d'informations au niveau des spécifications techniques des composants fournis par les constructeurs, nous avons convenus lors de cette réunion de choix de méthode que la définition du niveau de criticité et des probabilités des pannes ne serait pas incluse dans l'étude SdF. Cela pourra faire l'objet d'une autre étude dans le futur. Pour la suite du projet mon analyse restera donc à caractère qualitatif uniquement.

Pour répondre aux attentes des ingénieurs, le choix s'est porté sur la réalisation d'une analyse des modes de défaillances et de leurs effets AMDE.

D'autre part, la nature aérodynamique des systèmes de ventilation fait que malgré l'indépendance de certains sous-systèmes, leurs défaillances communes peuvent engendrer l'apparition d'événements

redoutables. L'élaboration du diagramme de fiabilité s'est donc avérée inadéquate pour ce type de système. Ainsi, l'arbre de défaillances vient compléter le résultat obtenu par l'AMDE en décrivant ces défaillances.

En outre, l'AdD s'appuie également sur l'AMDE. Cette dernière permet d'identifier les défaillances des composants qui sont généralement utilisées au dernier niveau d'un arbre de défaillances en tant qu'évènement de base.

Malgré le fait que l'APR nous donne un premier jet des évènements indésirables potentiels, on a jugé utile de les définir directement au niveau des arbres de défaillances en raison du temps généralement imparti pour la réalisation des études de conception.

En conclusion, l'AMDE et la méthode Arbre de Défaillances sont les deux méthodes retenues pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement du système de ventilation d'un tunnel routier vis-à-vis des besoins exprimés par les ingénieurs. Il ne faut pas oublier que ces méthodes sont dédiées à un public non expert en matière de sûreté de fonctionnement. De ce fait, leur principal avantage est de présenter systématiquement, de manière conviviale et avec un maximum d'exhaustivité, ce qu'un texte technique décrirait.

5.3.4 Déploiement des méthodes AMDE et Arbres de défaillances sur l'intégralité du système de ventilation du tunnel de Croix-Rousse

Dès lors que les méthodes SdF les plus adéquates à l'analyse des modes de défaillances des systèmes de ventilation de tunnels routiers ont été fixées et validées avec mes responsables de stage, je les ai alors développées sur la totalité des sous-modes d'exploitation du système de ventilation du tunnel de Croix-Rousse restants: 100% Longitudinal, Intervention des secours et évacuation des usagers pour les deux tubes Sud (tube routier) et Nord (tube modes doux).

5.3.4.1 Méthode AMDE

Dans l'optique de définir les défaillances que le système de ventilation du tunnel de la Croix Rouse peut subir, j'ai poursuivi la même logique d'analyse que celle décrite dans le paragraphe 5.3.2.2.

L'AMDE que j'ai élaborée a ensuite été soumise à l'examen de mes responsables afin d'évaluer son exhaustivité. L'analyse devrait décrire l'ensemble des défaillances des systèmes de ventilation y compris ceux liés à des causes d'occurrence rares mais réalistes.

Cela a fait appel à des réunions de travail avec mes collaborateurs qui ont permis de valider l'ensemble des défaillances dégagées.

Au final de cette analyse systématique, on dispose de tous les modes de dysfonctionnement qui peuvent causer l'arrêt ou la dégradation des fonctions ou des composants des systèmes de ventilation.

« Un extrait du déploiement de la méthode AMDE fonctionnelle et technique est disponible en

Annexe 14»

5.3.4.2 Arbre de défaillances

J'ai finalisé la construction des arbres de défaillances suivant l'organigramme décrit dans le paragraphe 5.3.2.3.

Contrairement à l'AMDE, les causes de défaillance d'ordre humain sont prises en compte dans cette analyse.

Les arbres de défaillances des différents sous-modes pour les deux tubes : routier et piétons ont été réalisés d'une manière indépendante même si certaines architectures fonctionnelles et arbres de défaillances qui en découlent sont communs.

En outre, la mise en place des AMDE a fait apparaître des effets de défaillances communs à plusieurs composants. De ce fait, je les ai inclus dans les arbres de défaillances.

Entre autres :

- Mauvaise identification de l'incident
- Ventilateur non disponible
- Mauvais contrôle de l'atmosphère

Les coupes minimales issues de l'analyse des différents événements redoutés m'a permis d'identifier l'ensemble des éléments qui permettront d'évaluer la robustesse du système de ventilation du tunnel de la Croix-Rousse pour les tubes Sud et Nord:

En ventilation sanitaire :

- Disponibilité des capteurs NO positionnés dans les deux têtes du tunnel
- Disponibilité du capteur NO₂
- Disponibilité des anémomètres
- Disponibilité des accélérateurs

En désenfumage :

- Disponibilité des systèmes d'identifications des incidents
- Disponibilité des registres d'isolement
- Disponibilité des ventilateurs
- Disponibilité des registres d'aiguillage
- Disponibilités des accélérateurs
- Disponibilités des anémomètres

D'autres éléments externes au système de ventilation peuvent contribuer à son dysfonctionnement :

- La validation de l'incendie par l'opérateur de surveillance
- Les contrepressions atmosphériques

« Pour avoir plus de détails, un extrait de l'AdD est disponible en Annexe 15 »

5.4 SYNTHÈSE

Les informations utilisées pour l'élaboration des différentes méthodes, par rapport au fonctionnement des équipements, sont basées en partie sur la synthèse que j'ai tirée des différents documents Projet et Avant-Projet de conception et de réalisation du tunnel de la Croix-Rousse. De plus, j'ai pu compléter mon étude grâce à l'intervention de mes tuteurs et des autres ingénieurs qui ont participé à la mise en place du système de ventilation présent dans ce tunnel aujourd'hui en exploitation.

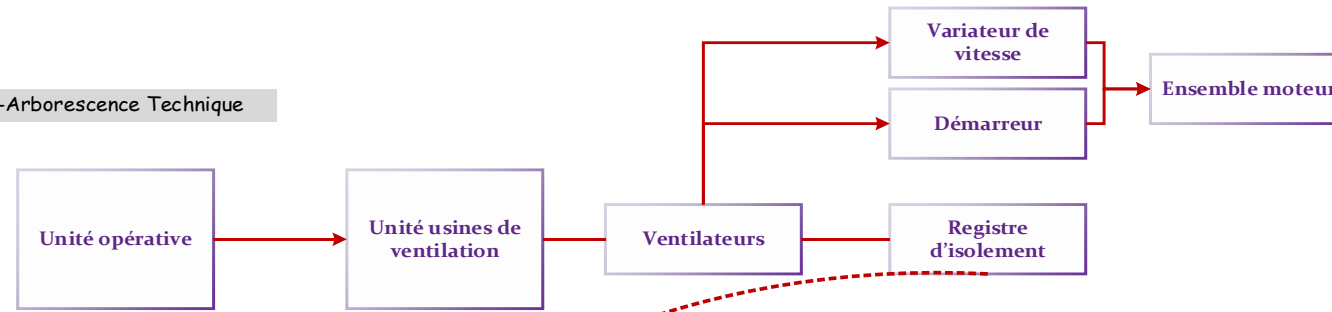
L'étude AMDE est une recherche longue mais fructueuse lorsqu'elle est complète. Néanmoins, son élaboration n'est pas une mince tâche lorsqu'on manque d'historiques des défaillances des équipements. C'est l'une des difficultés que j'ai réussi à surmonter en multipliant les recherches et les échanges avec mes tuteurs.

Quant aux arbres de défaillances, ils viennent compléter cette base de données de défaillances en incluant les pannes qui ne peuvent figurer sur l'AMDE. Toujours est-il nécessaire d'échanger avec l'exploitant après la mise en exploitation des systèmes de ventilation dans le but d'enrichir et de mettre à jour la liste des modes de défaillances.

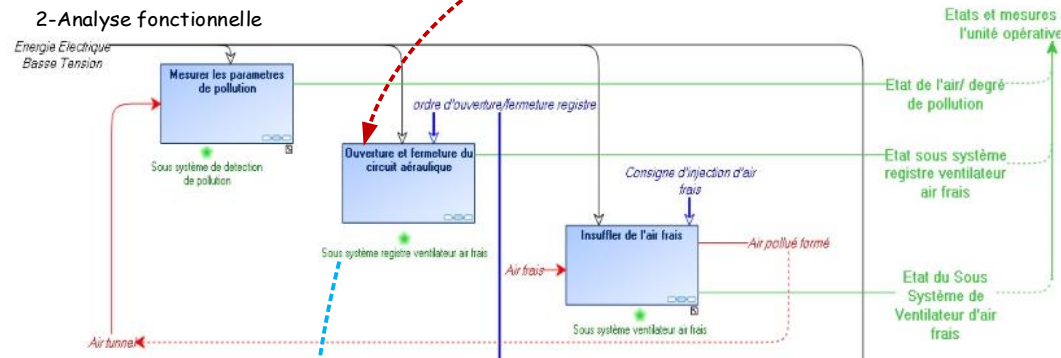
L'intégration du retour d'expérience dans l'analyse de SdF des systèmes de ventilation donnera un élan conséquent à la conception des prochains ouvrages. En effet, cela permettra de rentabiliser les efforts des ingénieurs, de faire évoluer leur savoir-faire et surtout de garantir un haut niveau de disponibilité du système de ventilation conçu en appliquant une méthode cadrée.

Pour conclure, j'ai mis en place un schéma descriptif de différentes étapes et méthodes utilisées pour la réalisation de mon projet :

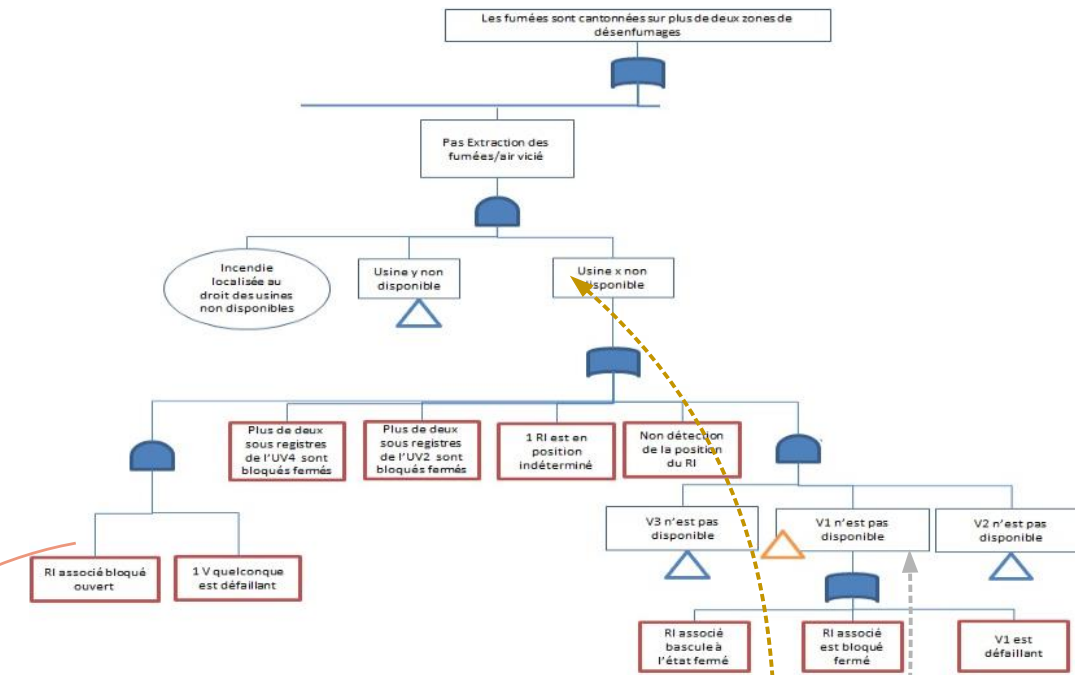
1-Arborescence Technique



2-Analyse fonctionnelle



5-Arbre des défaillances



La description des événements redoutables en rouge se fait directement dans l'AMDE

Événement redouté commun à plusieurs composants

Événement redouté composé une combinaison d'élément

3- AMDE fonctionnelle

Composant de l'ouvrage	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effets
Sous système registre d'isolement ventilateur air frais	Ouverture circuit aéralique	rupture interne du sous système registre	EXTERNES Connexions d'alimentation hydraulique du sous système registre d'isolement Pas d'énergie hydraulique Pas de consigne d'ouverture Cablages automatés défailants	Le sous système ventilateur correspondant ne démarre pas
		Perte de/d'une fonction interne du sous système registre	INTERNES le sous système registre ne s'ouvre pas non détection de la position du sous système registre d'isolement	usine correspondante non disponible
			EXTERNES obsolescence du circuit de commande Coupure de l'énergie électrique Pression de l'air insuffisante Cablages automatés défailants	effet indirect lié au à l'état du ventilateur
			INTERNES le sous système registre d'isolement bloqué ouvert Position indéterminée du sous système registre d'isolement	usine correspondante non disponible

4- AMDE Technique

Composant de l'ouvrage	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effets
Sous Système registre d'isolement	ouverture du circuit aéralique	Non détection de la position du sous système registre d'isolement	Mauvais réglage Mauvais montage Défaillance interne	usine non disponible
		position indéterminée du sous système registre d'isolement	Mauvaise maintenance Défaillance interne	Effet indirect dépendant de l'état du sous système ventilateur en question (CF Arbre de défaillance)
		sous système registre d'isolement bloqué ouvert	Mauvaise maintenance Vitesse de rotation du ventilateur est non nulle Défaillance interne	

Figure 24 Récapitulatif de la démarche SdF employée

6 ACTIVITÉS HORS PROJET

En dehors de mes missions de stage définies auparavant, j'ai eu l'occasion de réaliser des activités liées aux différents projets sur lesquels travaillent les ingénieurs du pôle Equipements et Sécurité, et qui m'ont beaucoup apportées aussi bien pour la réalisation de mon stage que pour la connaissance de l'organisation dans une entreprise.

6.1 VISITE DES TUNNELS

De manière à connaître concrètement la composition des systèmes de ventilation dans un tunnel routier, j'ai eu la chance de participer à 2 visites de tunnels :

- Le tunnel de Fréjus lors d'une phase de maintenance d'un ventilateur dans une usine,
- le tunnel de Croix-Rousse lors d'une mission de prise des mesures sonores acoustiques.

« Pour plus de détails sur les différentes visites, des fiches sont disponibles en Annexe 16 »

C'est alors grâce à l'intervention de mes tuteurs que j'ai eu l'occasion de voir de près la face cachée des tunnels à savoir les usines de ventilation, les équipements de ventilation localisés dans et en dehors des tunnels.

6.2 PARTICIPATION AUX REUNIONS DE DIRECTION DE GROUPE

Mensuellement, les deux équipes parisienne et lyonnaise du Pôle Equipements et Sécurité organisent une réunion de retour sur le CODIR (COmité de DIRection), auxquelles j'ai eu l'opportunité d'être conviée. L'objectif principal de ces réunions est de faire un bref retour sur les événements marquants de la société Setec tpi durant le mois écoulé et de présenter le plan de charge des différents ingénieurs, l'avancement des affaires en cours d'études, les affaires gagnées ou perdues.

6.3 PARTICIPATION A LA PRESENTATION DE L'OUTIL DE GESTION ELECTRONIQUE DES DONNEES (GED)

Cette présentation nous a été faite par un des responsables du service de Communication de Setec tpi. C'est une des démarches adoptées par la société dans le cadre de la démarche d'amélioration continue. Actuellement, les ingénieurs du Pôle Equipements et Sécurité travaillent en parallèle sur des affaires qu'ils enregistrent habituellement sur un serveur de partage commun.

Cette nouvelle solution de gestion de document, plus fiable et plus robuste, permet de garantir la traçabilité des documents enregistrés ainsi que les échanges entre les ingénieurs d'études en temps réel.

Cet outil de gestion électronique est en cours de déploiement pour les nouvelles affaires remportées par les différentes équipes de la société.

CONCLUSION

Sur le plan professionnel

Le sujet de stage tel que me l'avaient présenté mes tuteurs me laissait assez perplexe avant d'entamer ces 6 mois, du fait de sa très grande spécificité et de mon absence de connaissance des systèmes de ventilation. Toutefois, la mise en confiance et les explications du fonctionnement des systèmes de ventilation dès mon arrivée m'ont permis de combler mes lacunes en m'orientant vers l'échange avec mes tuteurs experts en la matière. Ainsi, j'ai pu cerner les fondamentaux de ces systèmes si spécifiques qui m'ont permis, pendant les 20 semaines de stage, de mener à terme mes missions en identifiant les défaillances des équipements qui peuvent altérer leur fonctionnement. Par ailleurs, j'ai fortement apprécié l'implication de mes tuteurs dans mon apprentissage de la ventilation et notamment au travers des visites de tunnel réalisées, ce qui m'a permis de voir concrètement le fonctionnement de la majorité des équipements concourant à la ventilation.

Durant mon stage, je me suis appuyée sur les connaissances acquises lors de mes deux années d'études en Master en matière de maintenance et de soutien logistique, de sûreté de fonctionnement, de maîtrise des risques et d'interaction homme-machine. En outre, les enseignements en management de projet m'ont été d'une grande utilité pour l'organisation de mon travail. Ce projet de fin d'études a été un excellent exercice pour appliquer les bonnes pratiques de l'Ingénierie Système.

La réalisation d'un guide à l'attention des futurs utilisateurs de la méthode que j'ai déployée marquera l'aboutissement de ce stage de fin d'études.

Sur le plan relationnel

Lors de mon arrivée le premier jour, j'ai été accueilli par mes tuteurs. Ils ont pris le temps de me présenter aux personnels de notre groupe et de la filiale installée dans le même étage que le nôtre. Ma présence dans le bureau de l'ensemble des ingénieurs d'études du Pôle Equipements et Sécurité m'a permis de m'intégrer rapidement dans l'équipe et le fait d'être entourée de personnes expertes dans le domaine de la ventilation m'a fortement aidé à comprendre mon sujet de stage. De plus, mes tuteurs, également présents dans le bureau, étaient à l'écoute, prêts à m'aiguiller et à enrichir mes connaissances dès que je soulevais une problématique.

D'autre part, ce stage m'a offert une nouvelle ouverture d'esprit sur le monde du travail et le respect des délais et des exigences.

Pour finir, mon expérience chez Setec tpi a confirmé mon projet professionnel qui s'oriente maintenant vers le domaine de la sûreté de fonctionnement.

GLOSSAIRE

• AFNOR	: Association française de normalisation
• AdD	: Arbre de défaillances
• AMDE	: Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité
• Air frais	: Air pris de l'extérieur (environnement)
• Air vicié	: Air pollué après passage dans le tunnel
• AP	: Automate Programmable. C'est un automate esclave propre à chaque ventilateur
• APR	: Analyse préliminaire des risques
• Bouche de soufflage	: Dispositif par lequel l'air est soufflé depuis une gaine de ventilation dans le tunnel
• Batterie d'accélérateurs	: Groupement de 2 accélérateurs ou plus
• CO	: Monoxyde de carbone
• CODIR	: Comité de direction
• DF	: Diagramme de fiabilité
• Extraction massive	: Ouverture manuelle ou télécommandée, dimensionnée de façon à pouvoir aspirer les fumées / air vicié / air pollué, dans un ouvrage de longueur importante (en général supérieure à 800 m)
• Gaine de ventilation	: Conduit de ventilation (métallique, en béton, maçonné, etc.)
• GED	: Gestion électronique des documents
• GTC	: Gestion centrale des commandes
• IS	: Ingénierie système
• ISO	: Organisation internationale de normalisation
• MOE	: Measures Of Effectiveness
• MOA	: Maitrise d'ouvrage
• MOE	: Maitrise d'œuvre
• NO	: Monoxyde d'azote
• Registre	: Élément mobile, télécommandé, qui peut rendre le réseau étanche
• SdF	: Sécurité de fonctionnement
• Trappe d'extraction	: Élément fixe ou mobile par lequel l'air vicié/pollué est aspiré
• Usines de ventilation	: Bâtiment qui regroupe l'ensemble des organes de ventilation pour un système transversal (ventilateurs).
• UC	: Unité de Commande qui représente l'automate maître qui pilote les AP
• V.T	: Ventilation Transversale
• V.L	: Ventilation Longitudinale
• ZD	: Zone de désenfumage

RÉSUMÉ

Dans le cadre de sa démarche d'amélioration continue, le pôle Equipements et Sécurité de la société Setec tpi a exprimé le besoin de structurer le processus d'analyse de la robustesse des équipements concourant à la ventilation dans les tunnels routiers.

La complexité et la spécificité de ce type de système ont fait l'objet dans un premier temps d'une prise de connaissance approfondie de manière à maîtriser les tenants et aboutissants du besoin exprimé par les ingénieurs.

La réponse à ce besoin a d'abord été décrite suivant les différents processus de l'IS afin de définir la solution qui a permis de concevoir le système support d'étude de robustesse des systèmes de ventilation. La réalisation technique de ce système support est passée dans un second temps par le recensement des différentes méthodes de sûreté de fonctionnement connues à ce jour, leur déploiement sur un système de ventilation donné et existant. Ensuite, la réalisation d'une analyse multicritères a été menée dans le but d'identifier la méthode de sûreté de fonctionnement la plus adaptée à l'analyse des modes de défaillances des systèmes de ventilation en tunnels routiers.

Enfin, l'aboutissement de l'étude a consisté en l'élaboration d'un guide d'utilisation de ce référentiel contenant toutes les informations nécessaires à la compréhension et à l'exploitation des résultats.

MOTS-CLES :

Ventilation, , sûreté de fonctionnement, tunnel routier, guide d'utilisation, référentiel d'analyse, AMDE, Arbre des défaillances, analyse fonctionnelle.

ABSTRACT

Within the framework of its step of continuous improvement, the pole Equipment and Safety of the company Setec tpi listed the needs to structure the process of analysis of the robustness of the convergent equipment to ventilation in road tunnels.

The complexity and the specificity of this type of system were the object initially thorough awareness so as to control them holding and outcomes of the need expressed by the engineers.

The response to this need was initially described according to the various processes of the System Engineering in order to define the solution which will make it possible to design the "Support System" of study of robustness of ventilation systems. The technical realization of this Support System passed in the second time by the census of the various methods of reliability known today, their deployment on a given and existing system of ventilation. Then, the realization of an analysis multicriterion was carried out with an aim of identifying the method of safety of operation the most adapted to the analysis of the modes of failures of the systems of ventilation in road tunnels.

Lastly, the result of the study consisted of making of a user guide of this reference frame containing all information necessary to the comprehension and the analysis of the results.

KEYWORDS:

Ventilation, *dependability*, road tunnel, user guide, reference frame of analysis, FMECA, Static Fault Trees, functional analysis

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Projets de grandes infrastructures réalisés par le groupe Setec	7
Figure 2 : Principe de la ventilation longitudinale.....	10
Figure 3 : Principe de la Ventilation transversale.....	11
Figure 4 : Représentation du sous processus "Insuffler de l'air frais"	11
Figure 5 : Représentation du sous processus "Convertir l'énergie électrique en énergie mécanique.....	12
Figure 6 : Cycle en V et les différents processus de l'ingénierie système	13
Figure 7 : Diagramme de contexte du système support	14
Figure 8 : Diagramme des exigences parties prenantes	15
Figure 9 : Diagramme des exigences techniques	15
Figure 10 : Diagramme de Cas d'utilisation.....	16
Figure 11 : Diagramme de séquence.....	16
Figure 11 : Diagramme de bloc - Architecture organique du système support.....	17
Figure 12 : Diagramme de bloc - Trade study	17
Figure 13 : Diagramme de bloc Composition retenue du « Système Support »	18
Figure 14 : Diagramme de contexte d'un système de ventilation	19
Figure 15 : Schéma de l'organisation du système de ventilation du tunnel de la Croix Rousse	20
Figure 16 : Position des registres d'aiguillages dans les tubes Nord et Sud du tunnel de la Croix Rousse	20
Figure 17 : Illustration du sous mode Evacuations des usagers.....	22
Figure 18 : Illustration du sous mode Intervention des secours.....	22
Figure 19 : Organisation du fonctionnement du mode automatique de ventilation dans le tunnel de la Croix Rousse.....	23
Figure 20 : Organigramme d'application de la méthode AdD.....	26
Figure 21 : Exemple d'un arbre de défaillances appliqué sur le Tube Sud pour le sous-mode Extraction et Soufflage	27
Figure 22 : Diagramme de fiabilité d'une usine de ventilation du tunnel de la Croix Rousse.....	28
Figure 23 Récapitulatif de la démarche SdF employée.....	32
Figure 24 : Armoire de commande pour un ventilateur dans le tunnel de la Croix Rousse	69
Figure 25 : Usine de ventilation localisée dans le tunnel du Fréjus.....	69
Figure 26 : Usine de ventilation dans le tunnel de la Croix Rousse.....	69
Figure 27 : Ventilateur ouvert pour la maintenance périodique au tunnel du Fréjus.....	69

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Planning prévisionnel	40
Annexe 2 : Ecart Planning réel et planning prévisionnel.....	41
Annexe 3 : Revues de projet.....	42
Annexe 4 : Norme ISO 15288.2008	44
Annexe 5 : Arborescence technique	45
Annexe 6 : Schéma synoptique	46
Annexe 7 : Analyse fonctionnelle d'un système de ventilation	47
Annexe 8 : Analyse fonctionnelle du tunnel de la Croix Rousse	55
Annexe 9 : Extrait de l'application de la méthode Analyse Prévisionnelle du risque	56
Annexe 10 : Extrait de l'application de la méthode Analyse des modes de défaillances de leurs effets sur le sous mode Extraction et Soufflage	58
Annexe 11 : Extrait de l'application de la méthode arbre de défaillances sur le sous mode Extraction et Soufflage Tube Sud.....	62
Annexe 12 : Extrait de l'application de la méthode diagramme de fiabilité sur une usine de ventilation d'Extraction et Soufflage	63
Annexe 13 : Tableau de comparaison des méthodes de SdF.....	64
Annexe 14 : Extrait de déploiement de la méthode AMDE Fonctionnelle sur la totalité du tunnel de la Croix Rousse: Mode Désenfumage	65
Annexe 15 : Extrait de déploiement de la méthode AdD sur la totalité du tunnel de la Croix Rousse: Mode Désenfumage (Tube Nord).....	67
Annexe 16 : Fiche de visites des tunnels.....	68

BIBLIOGRAPHIE

Support de cours :

9U03-Maintenance et Soutien logistique Intégrés
9U05-Systèmes de Management Qualité/Sécurité/Environnement
9U31-Interaction Homme-Système
9U50-Intégration Vérification Validation
7U04-Sûreté de fonctionnement et Maîtrise des Risques

Ouvrage :

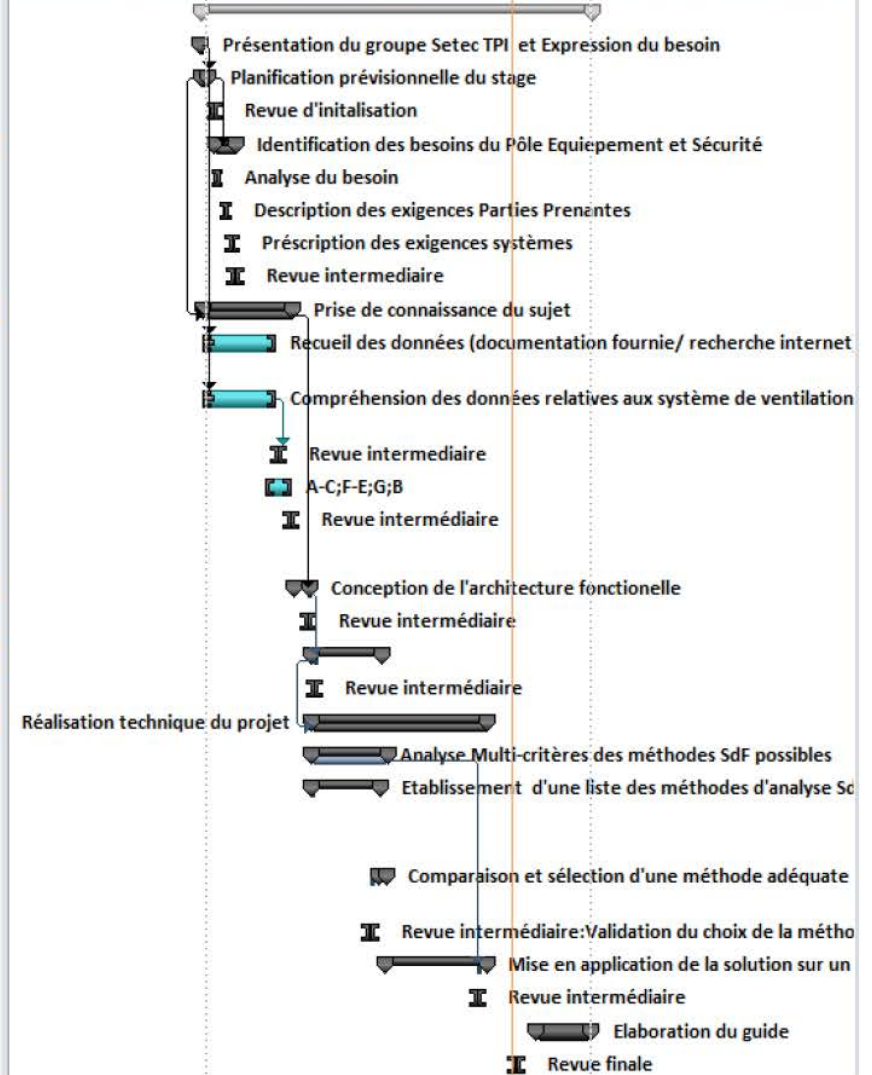
- Dossiers pilotes du Cetu (Centre d'études des Tunnels) Novembre 2003 – Auteur : Pierre CARLIOTTI
- Les ventilateurs et la conception des installations de génie civile –Concevoir et dimensionner les équipements de ventilation. Mai 1997. Auteur : S.LEGRAND
- Mémoire descriptif de la ventilation du tunnel de la Croix Rousse -Phase Projet- 2011/2013
- Documents de spécifications générales - Spécification fonctionnelle générale - API ventilation
- Plan d'intervention et de sécurité PIS pour le tunnel de la Croix Rousse. Auteur : Grand Lyon Mars 2013

Sites internet :

<http://web.tpi.setec.fr>

Annexe 1 : Planning prévisionnel

Nom de la tâche	Durée	Début	Fin	Janvier	Mars	Mai	Juillet	Septembre	Novembre	Janvier
Planning pevisionnel	131 jours	Mar 01/04/14	Mar 30/09/14							
Présentation du groupe Setec TPI et Expression du besoin	1 jour	Mar 01/04/14	Mar 01/04/14							
Planification prévisionnelle du stage	3 jours	Mer 02/04/14	Ven 04/04/14							
Revue d'initialisation	1 jour	Lun 07/04/14	Lun 07/04/14							
Identification des besoins du Pôle Equipement et Sécurité	9 jours	Lun 07/04/14	Jeu 17/04/14							
Analyse du besoin	4 jours	Lun 07/04/14	Jeu 10/04/14							
Description des exigences Parties Prenantes	2 jours	Ven 11/04/14	Lun 14/04/14							
Préscription des exigences systèmes	2 jours	Mar 15/04/14	Mer 16/04/14							
Revue intermediaire	1 jour	Jeu 17/04/14	Jeu 17/04/14							
Prise de connaissance du sujet	30 jours	Mer 02/04/14	Mar 13/05/14							
Recueil des données (documentation fournie/ recherche internet)	25 jours	Mer 02/04/14	Mar 06/05/14							
Compréhension des données relatives aux système de ventilation	25 jours	Mer 02/04/14	Mar 06/05/14							
Revue intermediaire	1 jour	Mer 07/05/14	Mer 07/05/14							
Cahier des charges	9 jours	Jeu 01/05/14	Mar 13/05/14							
Revue intermédiaire	1 jour	Mar 13/05/14	Mar 13/05/14							
Visites Tunnels - A prévoir	1 jour									
Conception de l'architecture fonctionelle	6 jours	Mer 14/05/14	Mer 21/05/14							
Revue intermédiaire	1 jour	Mer 21/05/14	Mer 21/05/14							
Conception de l'architecture organique	24 jours	Jeu 22/05/14	Mar 24/06/14							
Revue intermédiaire	1 jour	Sam 24/05/14	Sam 24/05/14							
Réalisation technique du projet	59 jours	Jeu 22/05/14	Mar 12/08/14							
Analyse Multi-critères des méthodes SdF possibles	27 jours	Jeu 22/05/14	Ven 27/06/14							
Etablissement d'une liste des méthodes d'analyse SdF et leurs application	23 jours	Jeu 22/05/14	Lun 23/06/14							
Revue intermédiaire: présentation des résultats										
Comparaison et sélection d'une méthode adéquate suivant un cas simple	4 jours	Lun 23/06/14	Jeu 26/06/14							
Revue intermédiaire:Validation du choix de la méthode	1 jour	Jeu 19/06/14	Jeu 19/06/14							
Mise en application de la solution sur un cas réel	34 jours	Jeu 26/06/14	Mar 12/08/14							
Revue intermédiaire	1 jour	Ven 08/08/14	Ven 08/08/14							
Elaboration du guide	18 jours	Ven 05/09/14	Mar 30/09/14							
Revue finale	1 jour	Mar 26/08/14	Mar 26/08/14							





Annexe 2 : Ecart Planning réel et planning prévisionnel

Planning prévisionnel	131 jours	Mar 01/04/14	Mar 30/09/14
Présentation du groupe Setec TPI et Expression du besoin	1 jour	Mar 01/04/14	Mar 01/04/14
Planification prévisionnelle du stage	3 jours	Mer 02/04/14	Ven 04/04/14
Revue d'initialisation	1 jour	Lun 07/04/14	Lun 07/04/14
- Identification des besoins du Pôle Equipement et Sécurité	9 jours	Lun 07/04/14	Jeu 17/04/14
Analyse du besoin	4 jours	Lun 07/04/14	Jeu 10/04/14
Description des exigences Parties Prenantes	2 jours	Ven 11/04/14	Lun 14/04/14
Préscription des exigences systèmes	2 jours	Mar 15/04/14	Mer 16/04/14
Revue intermédiaire	1 jour	Jeu 17/04/14	Jeu 17/04/14
- Prise de connaissance du sujet	30 jours	Mer 02/04/14	Mar 13/05/14
Recueil des données (documentation fournie/ recherche internet)	25 jours	Mer 02/04/14	Mar 06/05/14
Compréhension des données relatives aux système de ventilation	25 jours	Mer 02/04/14	Mar 06/05/14
Revue intermédiaire	1 jour	Mer 07/05/14	Mer 07/05/14
Cahier des charges	9 jours	Jeu 01/05/14	Mar 13/05/14
Revue intermédiaire	1 jour	Mar 13/05/14	Mar 13/05/14
Visites Tunnels - A prévoir	1 jour		
+ Conception de l'architecture fonctionnelle	6 jours	Mer 14/05/14	Mer 21/05/14
+ Conception de l'architecture organique	24 jours	Jeu 22/05/14	Mar 24/06/14
- Réalisation technique du projet	59 jours	Jeu 22/05/14	Mar 12/08/14
- Analyse Multi-critères des méthodes SdF possibles	27 jours	Jeu 22/05/14	Ven 27/06/14
- Etablissement d'une liste des méthodes d'analyse SdF et leurs application	23 jours	Jeu 22/05/14	Lun 23/06/14
Revue intermédiaire: présentation des résultats			
- Comparaison et sélection d'une méthode adéquate suivant un cas simple	4 jours	Lun 23/06/14	Jeu 26/06/14
Revue intermédiaire: Validation du choix de la méthode	1 jour	Jeu 19/06/14	Jeu 19/06/14
- Mise en application de la solution sur un cas réel	34 jours	Jeu 26/06/14	Mar 12/08/14
Revue intermédiaire	1 jour	Ven 08/08/14	Ven 08/08/14

Planning réel	110 jours	Mar 01/04/14	Lun 01/09/14
✓ Planification prévisionnelle du stage	2 jours	Mer 02/04/14	Jeu 03/04/14
✓ Expression du besoin groupe Setec TPI	1 jour	Mar 01/04/14	Mar 01/04/14
✓ Revue d'initialisation- Validation du planning prévisionnel	1 jour	Ven 04/04/14	Ven 04/04/14
✓ - Identification des besoins du Pôle Equipements et Sécurité	9 jours	Lun 07/04/14	Jeu 17/04/14
✓ Analyse du besoin du groupe Setec Tpi	3 jours	Lun 07/04/14	Mer 09/04/14
✓ Définition des exigences PP	2 jours	Ven 11/04/14	Lun 14/04/14
✓ Préscriptions des exigences systèmes	2 jours	Mar 15/04/14	Mer 16/04/14
✓ Revue intermédiaire - Validation des exigences	1 jour	Jeu 17/04/14	Jeu 17/04/14
✓ - Prise de connaissance du sujet	43 jours	Mer 02/04/14	Ven 30/05/14
✓ Recueil des données (documentation fournie/ recherche internet)	43 jours	Mer 02/04/14	Ven 30/05/14
✓ Compréhension des données relatives aux système de ventilation	43 jours	Mer 02/04/14	Ven 30/05/14
✓ ⊕ Analyse fonctionnelle du système de Ventilation Transversale	18 jours	Lun 07/04/14	Mer 30/04/14
✓ ⊕ Analyse fonctionnelle du système de ventilation Longitudinale	9 jours	Ven 25/04/14	Mer 07/05/14
✓ Revue intermédiaire 2: validation de l'analyse fonctionnelle	1 jour	Mer 07/05/14	Mer 07/05/14
✓ ⊕ Cahier des charges	11 jours	Mer 07/05/14	Mer 21/05/14
✓ Visite Tunnel du fréjus	1 jour	Mar 13/05/14	Mar 13/05/14
✓ ⊕ Schéma Synoptique du système de ventilation	13 jours	Mer 14/05/14	Ven 30/05/14
✓ ⊕ Conception de l'architecture Fonctionnelle du système à faire	3 jours	Mar 27/05/14	Jeu 29/05/14
✓ Conception de l'architecture Organique du système à faire	18 jours	Jeu 29/05/14	Lun 23/06/14
✓ - Réalisation technique du projet	54 jours	Jeu 29/05/14	Mar 12/08/14
✓ ⊕ Analyse Multi-critères des méthodes SdF possibles	17 jours	Ven 30/05/14	Lun 23/06/14
✓ Visite Tunnel de la Croix Rousse	1 jour	Jeu 12/06/14	Jeu 12/06/14
✓ - Mise en application de la solution sur le tunnel de la Croix Rousse	35 jours	Mer 25/06/14	Mar 12/08/14
✓ ⊕ Application de la méthode AMDE	20 jours	Mer 25/06/14	Mar 22/07/14
✓ Validation méthode AMDE	1 jour	Mer 23/07/14	Mer 23/07/14
✓ ⊕ Application de la méthode Arbre des défaillances	15 jours	Mar 22/07/14	Lun 11/08/14
✓ Validation de la méthode Arbre de défaillance	1 jour	Mar 12/08/14	Mar 12/08/14
✓ Revue intermédiaire 5	1 jour	Mer 27/08/14	Mer 27/08/14

Annexe 3 : Revues de projet

 UNIVERSITÉ DE LORRAINE M2ISC-SSM	REVUE DE PROJET DE STAGE																	
		Date : 08/04/14																
Initialisation <input checked="" type="checkbox"/> Décision intermédiaire <input type="checkbox"/> Validation <input type="checkbox"/>																		
<p><u>Titre du sujet de stage :</u> Analyse des risques/Sûreté de fonctionnement des systèmes de ventilation des tunnels.</p> <p><u>Participants :</u></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nom</th> <th>Fonction</th> <th>Convoqué</th> <th>Présent</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Anne Charlotte COUPIER-AIT OUAKRIM</td> <td>Ingénieur d'études-Tutrice de stage</td> <td style="text-align: center;">x</td> <td style="text-align: center;">x</td> </tr> <tr> <td>Guillaume PLANCHENault</td> <td>Ingénieur d'études-Tuteur de stage</td> <td style="text-align: center;">x</td> <td style="text-align: center;">x</td> </tr> <tr> <td>Fatima-Ezzahra AIT TALHIQ</td> <td>Stagiaire M2 ISC</td> <td style="text-align: center;">x</td> <td style="text-align: center;">x</td> </tr> </tbody> </table> <p><u>Etat d'avancement :</u> La réunion d'ouverture a donné lieu à une présentation des activités de la société SETEC TPI. Elle était axée principalement sur le besoin du pôle « Equipements et Sécurité » en termes de sûreté de fonctionnement des équipements de ventilation dans les tunnels. Suite aux explications orales, un ensemble de documents* a été fourni en guise de support pour la compréhension des systèmes de ventilation.</p> <p><u>Décisions :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ La compréhension des données fournies fera l'objet d'une synthèse sous forme d'analyse fonctionnelle. ✓ Un planning prévisionnel pour le programme de stage sera établi. ✓ L'analyse fonctionnelle est faite sous forme de modélisation des processus sous Mega. 			Nom	Fonction	Convoqué	Présent	Anne Charlotte COUPIER-AIT OUAKRIM	Ingénieur d'études-Tutrice de stage	x	x	Guillaume PLANCHENault	Ingénieur d'études-Tuteur de stage	x	x	Fatima-Ezzahra AIT TALHIQ	Stagiaire M2 ISC	x	x
Nom	Fonction	Convoqué	Présent															
Anne Charlotte COUPIER-AIT OUAKRIM	Ingénieur d'études-Tutrice de stage	x	x															
Guillaume PLANCHENault	Ingénieur d'études-Tuteur de stage	x	x															
Fatima-Ezzahra AIT TALHIQ	Stagiaire M2 ISC	x	x															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Approbation du document</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Révisé</th> <th>Vérifié</th> <th>Validé</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Par :</td> <td>AIT TALHIQ Fatima- Ezzahra</td> <td>Oui Anne Charlotte COUPIER- AIT OUAKRIM</td> <td>Oui Anne Charlotte COUPIER- AIT</td> </tr> <tr> <td>Le :</td> <td>08/04/14</td> <td></td> <td>14/04/14</td> </tr> </tbody> </table>			Approbation du document				Révisé	Vérifié	Validé	Par :	AIT TALHIQ Fatima- Ezzahra	Oui Anne Charlotte COUPIER- AIT OUAKRIM	Oui Anne Charlotte COUPIER- AIT	Le :	08/04/14		14/04/14	
Approbation du document																		
	Révisé	Vérifié	Validé															
Par :	AIT TALHIQ Fatima- Ezzahra	Oui Anne Charlotte COUPIER- AIT OUAKRIM	Oui Anne Charlotte COUPIER- AIT															
Le :	08/04/14		14/04/14															
<p>*Les documents : le dossier pilote Ventilation du CETU (Centre D'Etudes Des Tunnels), Les ventilateurs et la conception des installations de génie civil</p>																		
1	003	91954R	S	T	001	001	1	1										

Date : 23/06/14

 Initialisation Décision intermédiaire Validation
Titre du sujet de stage :

Analyse des risques/Sûreté de fonctionnement des systèmes de ventilation des tunnels.

Participants :

Nom	Fonction	Conviqué	Présent
Bruno SOLER	Responsable d'agence	x	x
Anne Charlotte COUPIER AIT-OUAKRIM	Ingénieur d'études-Tutrice de stage	x	x
Guillaume PLANCHENault	Ingénieur d'études-Tuteur de stage	x	x
AIT TALHIQ Fatima-Ezzahra	Stagiaire M2 ISC	x	x

Suivi des actions précédentes :

Action	Etat*
Cahier des charges	Validé
Schéma synoptique	Vérfiée

Déroulement de la réunion :

Cette réunion a connu la participation de Bruno Soler. Dans un premier temps et compte tenu de sa non présence dans les précédentes réunions, on a fait un balayage rapide sur les points qui ont été traités jusqu'à présent.

Dans un second temps, j'ai présenté les différentes méthodologies d'étude de sûreté de fonctionnement appliquée aux systèmes de ventilation. Par la suite j'ai exposé l'application des 4 méthodes sdf (Diagramme de fiabilité, APR, AMDEC et AdD) sur le tunnel de la Croix Rousse (Lyon).

Finalement, j'ai montré les caractéristiques propres pour chaque méthode. Ces derniers permettront de mettre en avant la méthode la plus adéquate au besoin exprimé.

Analyse et État d'avancement :

La discussion autour des points présentés a remis en cause la finalité de l'étude de sûreté qui va être élaborée. Le besoin principal a été revu et on a convenu qu'il porterait sur la disponibilité des équipements de ventilation en cas de sollicitation (et non pas sur la fiabilité des équipements). Toutefois, il ne faut pas dépasser un certain niveau de détails dans la description des différents systèmes concourant à la ventilation, l'objectif de l'analyse étant de prendre les composants fonctionnels du système de ventilation global.

1	003	91954R	S	T	001	001	1	1
---	-----	--------	---	---	-----	-----	---	---

Décisions:

La réunion a donné lieu aux décisions suivantes :

S'accorder un temps de réflexion dans le but d'avoir les idées plus claires concernant le choix de la/les méthode(s) qui va/vont être déployée(s) sur tout le système de ventilation.

Corriger quelques détails au niveau du schéma synoptique.

Livrables :

Classeur de synthèse des 4 méthodes (Diagramme de fiabilité, APR, AMDEC et AdD)

Classeur des applications des 4 méthodes sur le tunnel de la Croix Rousse

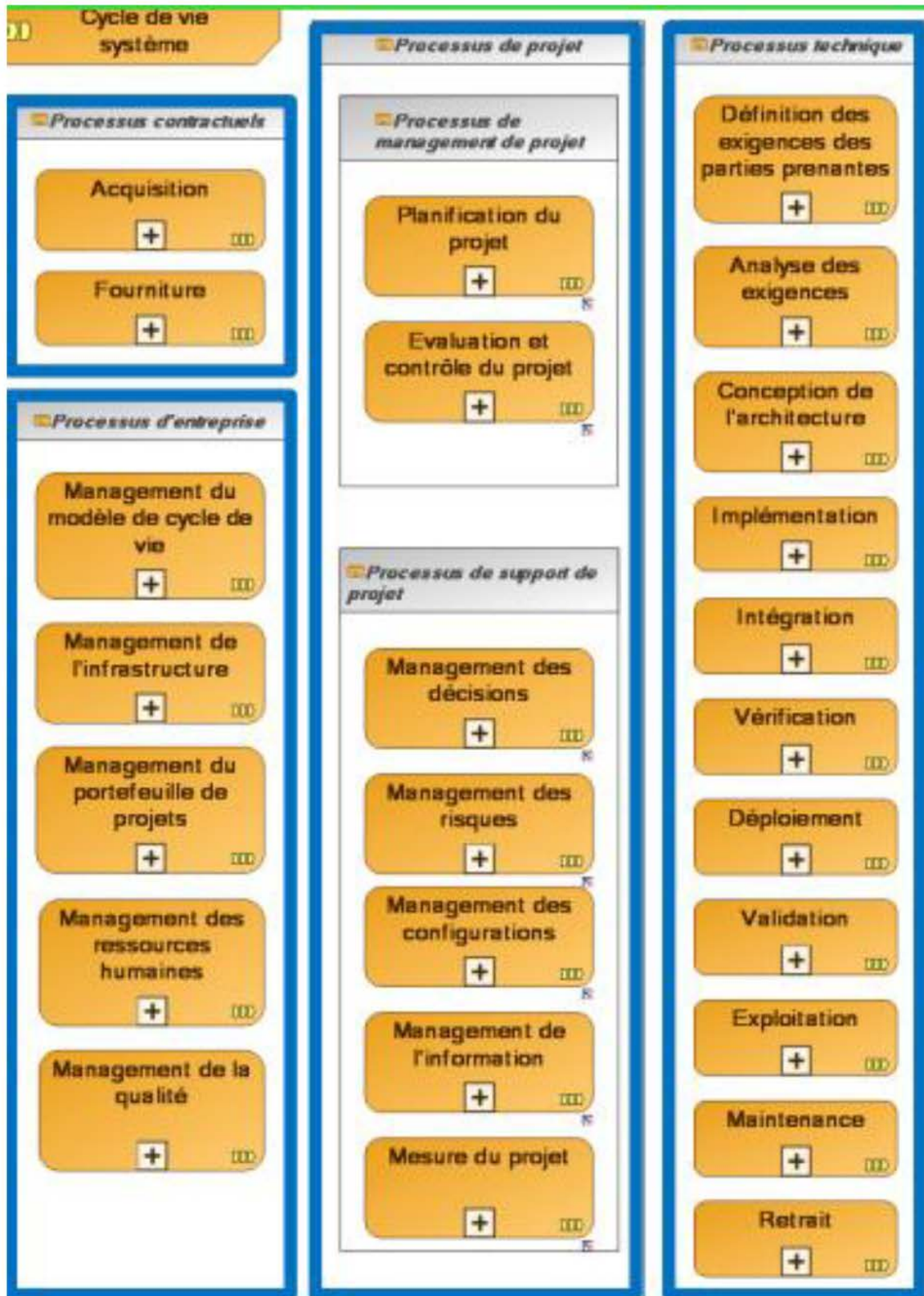
Approbation du document

	Rédigé	Validé
Par :	AIT TALHIQ Fatima- Ezzahra	COUPIER - AIT OUAKRIM
Le :	23/06/14	2/07/14

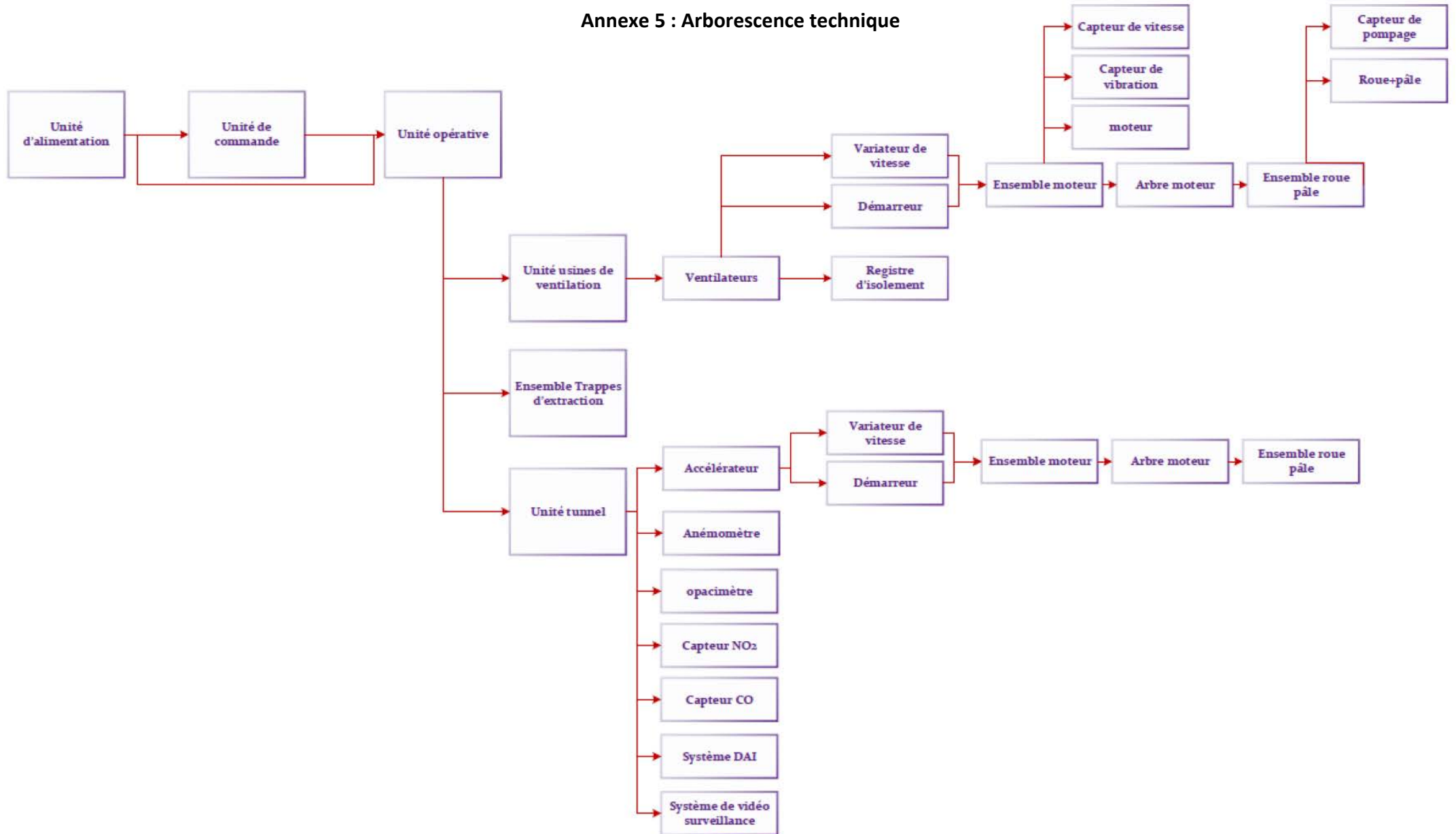
*Etat : En cours, finalisé, vérifié, validé

2	003	91954R	S	T	001	001	1	1
---	-----	--------	---	---	-----	-----	---	---

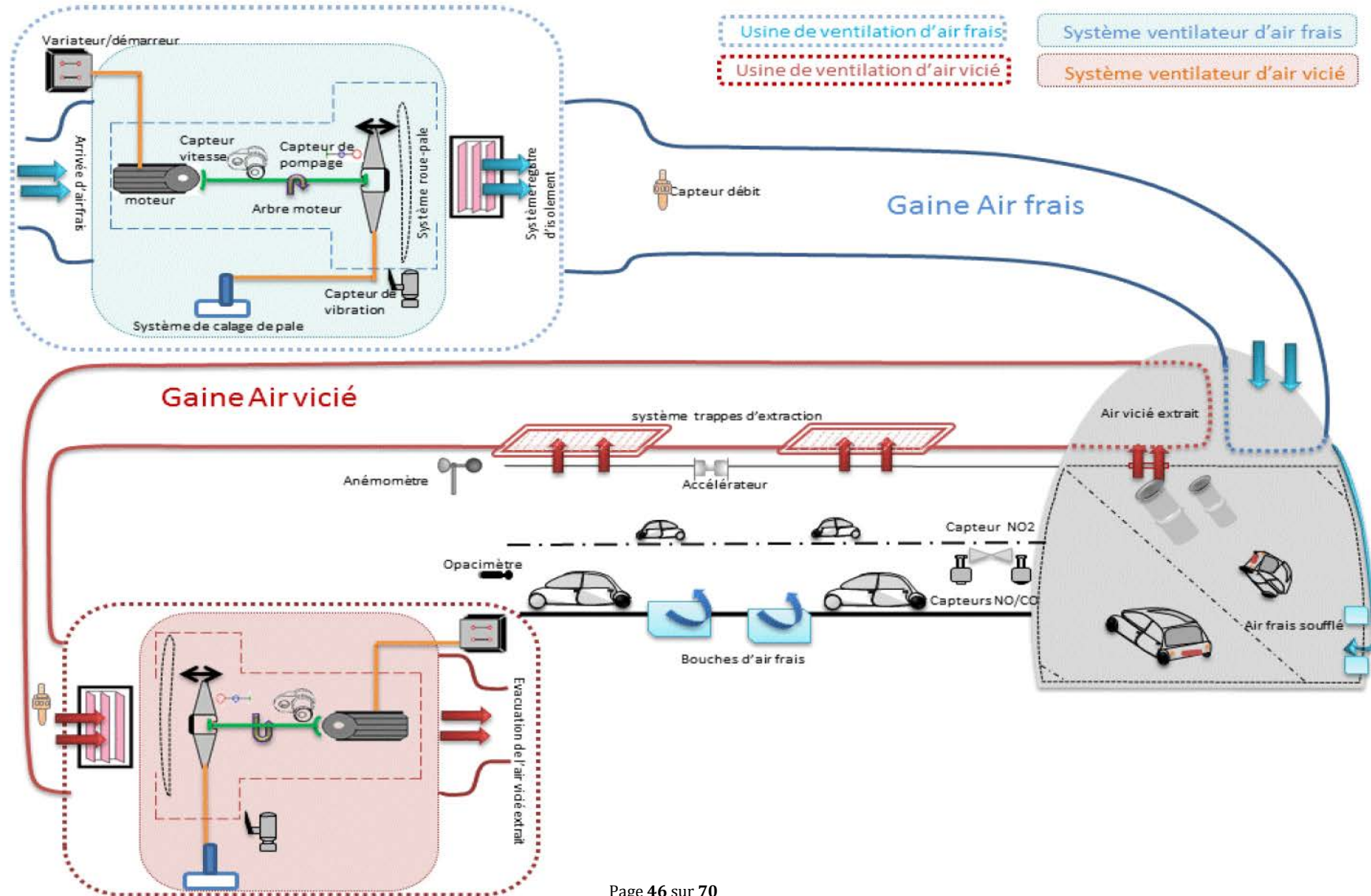
Annexe 4 : Norme ISO 15288.2008



Annexe 5 : Arborescence technique



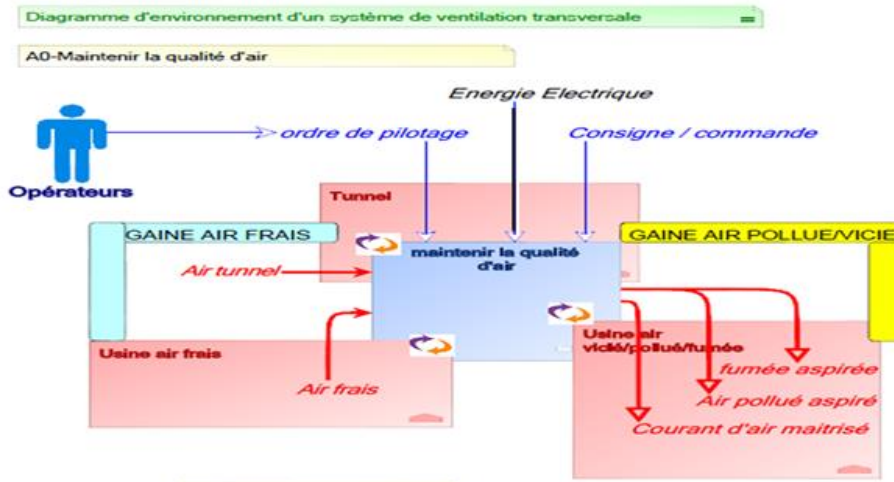
Annexe 6 : Schéma synoptique



Annexe 7 : Analyse fonctionnelle d'un système de ventilation

1. Ventilation transversale

Diagramme d'environnement du processus « Maintenir la qualité d'air avec une installation transversale »

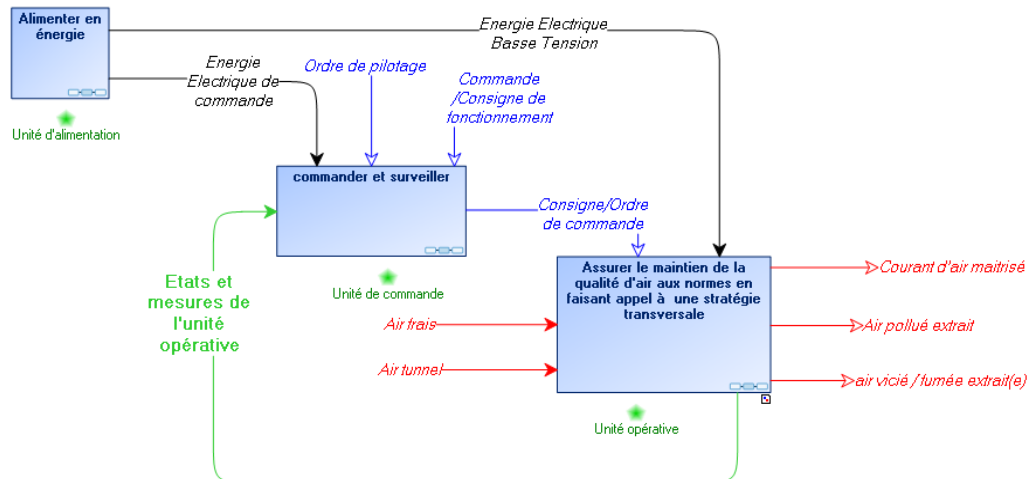


Le diagramme d'environnement est la représentation initiale qui identifie l'interaction entre le processus principal « Maintenir la qualité d'air » et son environnement. Un ensemble de terminaisons modélise les entrées et les sorties de ce processus.

Les opérateurs peuvent intervenir pour piloter le processus en fonction de la situation qui se présente. En règle générale, cette intervention fait suite à un évènement à risques.

Le déroulement du processus principal se passe sur trois sites différents : aux niveaux du tunnel, du système d'air frais et du système d'air vicié/pollué. L'interaction entre le tunnel et les deux systèmes se fait à travers des gaines qui servent à acheminer soit l'air frais soit l'air pollué/vicié respectivement jusqu'aux bouches de soufflage et organes d'extraction (trappes).

Diagramme de décomposition du processus principal « Maintenir la qualité d'air avec une installation transversale »



Le diagramme de décomposition permet d'affiner la structure fonctionnelle du processus « Assurer le maintien de la qualité d'air.. » et met en exergue les différents sous-processus, les flux informationnels et de matière. Il est composé :

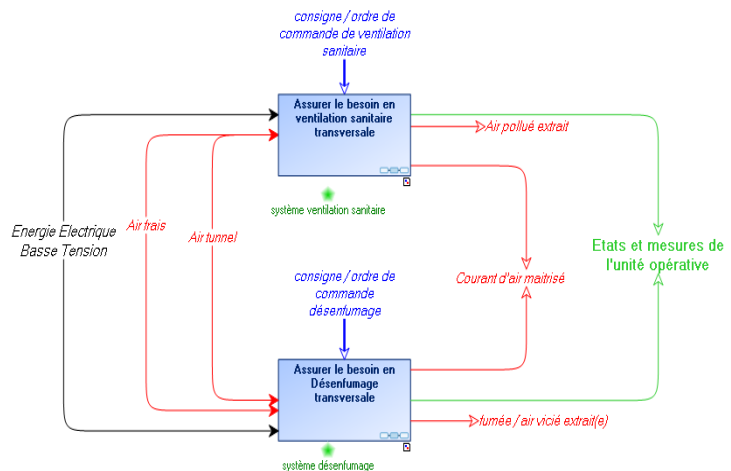
d'une unité d'alimentation qui fournit l'énergie électrique pour l'ensemble des équipements, entre autres l'unité de commande et l'installation de ventilation.

d'une Unité de Commande (UC). Elle regroupe les automates maitres pilotés par le biais de la GTC suivant les consignes, les commandes manuelles des opérateurs de supervision ou les commandes automatiques suivant les programmes informatiques. Elle permet aussi de traiter la remontée des informations en temps réel (mesures, états,...) et d'agir en conséquence.

Diagramme de décomposition du sous processus principal « Maintenir la qualité d'air avec une installation transversale »

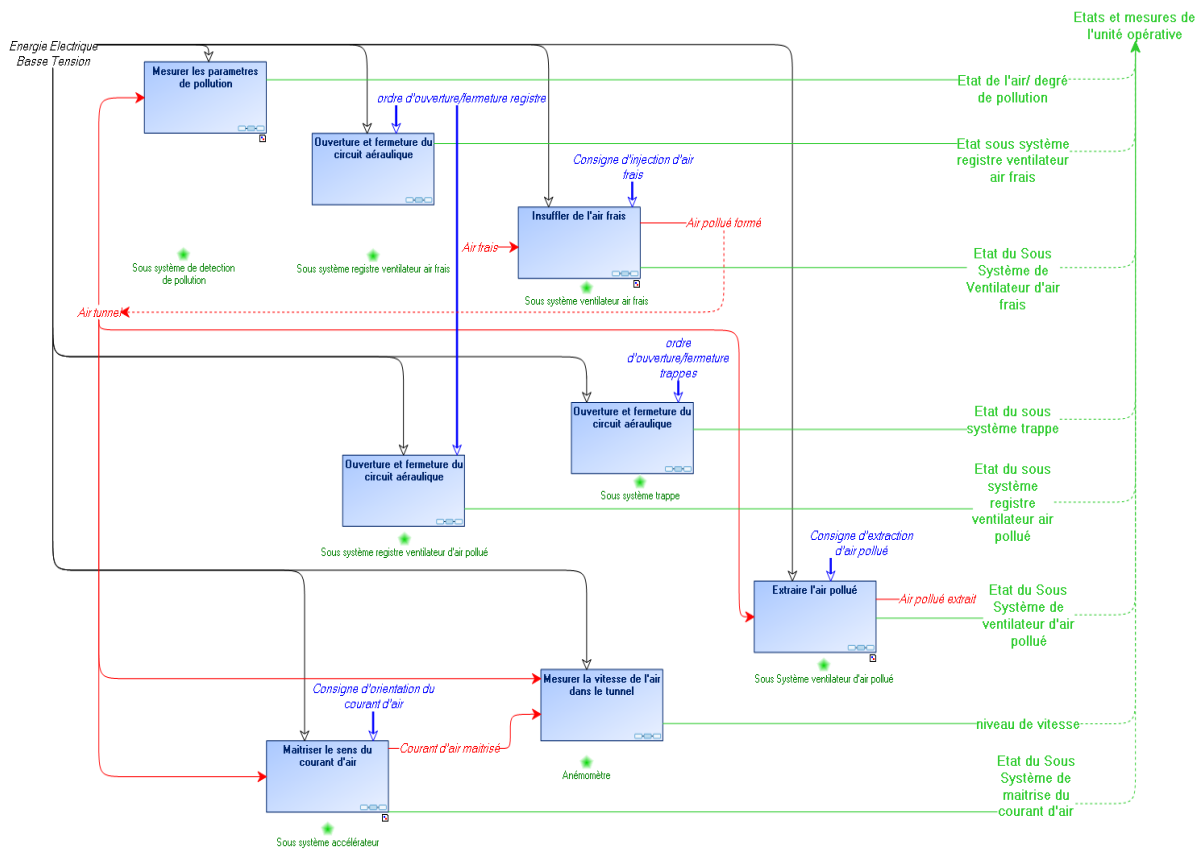
Cette première décomposition permet de mettre en évidence les deux utilisations de la ventilation : sanitaire et désenfumage.

Le sous-système ventilateur constitue le cœur de l'installation en transformant l'énergie électrique en énergie aéraulique.



a) Sanitaire :

Diagramme de décomposition du sous-processus « Assurer le besoin en ventilation sanitaire » :



Cette décomposition représente une vue interne du processus « Assurer le besoin en ventilation sanitaire ». Elle permet d'illustrer la chaîne de ventilation sanitaire qui contient :

Le processus « mesurer des paramètres de pollution » dans le tunnel engendré par l'accumulation de polluants dans l'ouvrage. Ce processus est assuré par un sous-système de détection de pollution. Les différentes mesures sont remontées au niveau de l'UC, qui interviendra par la suite au niveau des consignes d'entrée des sous-processus avec lesquels il interagit.

Afin de pouvoir exploiter le processus « Insuffler l'air frais », une source d'« AIR FRAIS » est indispensable. Le but étant de diluer les polluants présents dans le tunnel et ainsi maintenir une qualité d'air répondant aux exigences réglementaires dans tout le volume de l'ouvrage. Cet air frais se transforme en air pollué dès son passage dans le tunnel. Ce processus est assuré par un sous-système de ventilation d'air frais.

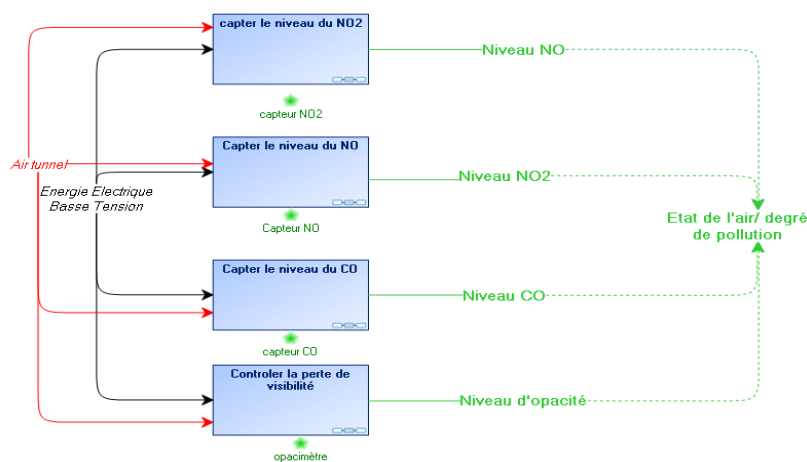
Le processus « Extraire l'air pollué » formé dans le tunnel débute en même temps que le sous-processus A31-2 (Insuffler l'air frais). Il est assuré par un sous-système de ventilation (extraction) d'air pollué.

En raison des contre-pressions atmosphériques ou du soufflage d'air frais, la pression de l'air dans le tunnel a tendance à être perturbée constamment. C'est à ce niveau là qu'intervient le sous-processus « Maitriser le sens du courant d'air ». Il permet de créer une poussée d'air supplémentaire dans tunnel vers le sens désiré afin de pouvoir l'extraire dans la zone souhaité (par un cantonnement de cet air pollué).

Avant de débiter le cycle d'insufflation de l'air frais, l'AP interroge l'état de la position du registre du ventilateur. Ce dernier doit être en position ouverte (sauf pour la maintenance afin d'éviter une situation de pompage). Cela risque de détruire le ventilateur à cause de la pression dégagée.

La mesure des paramètres de l'air soufflé s'impose afin de vérifier que les consignes sont respectées.

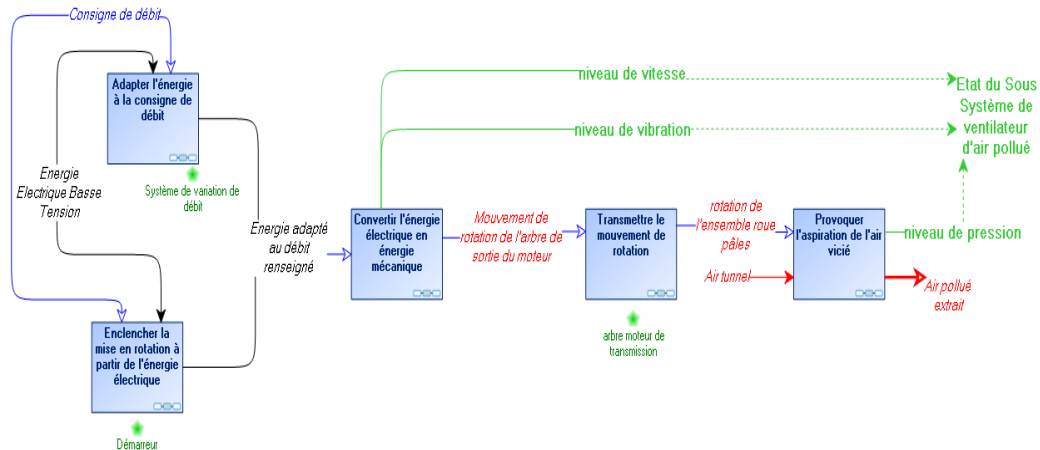
Diagramme de décomposition du sous-processus « Mesurer les paramètres de pollution » :



Ce processus « Mesurer les paramètres de pollution » permet de prélever les mesures des polluants NO/NO2/CO ainsi que le niveau d'opacité dans le tunnel.

Cette tâche est réalisée à l'aide de capteurs spécifiques. L'AP est ainsi renseignée par les niveaux mesurés et détermine le débit d'air frais à injecter suivant les taux limites de pollution fixés.

Diagramme de décomposition du sous-processus « Insuffler l'air frais » :



Le diagramme nous permet de voir de près les différents composants qui assurent le déroulement du sous-processus d'insufflation de l'air frais.

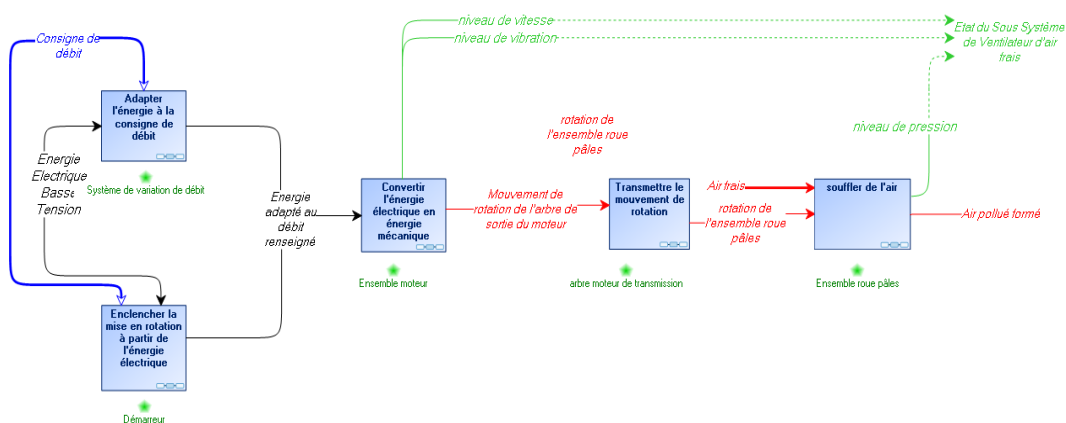
En fonction du débit renseigné par l'AP, et dans le cas où le débit peut varier selon le scénario mis en œuvre, c'est un système de variation de débit qui sera sollicité. Il est composé d'un variateur de vitesse et/ou d'un système de calage de pales.

Dans le cas où le débit est constant, on utilise généralement un démarreur pour limiter les appels de puissance électrique. La nature du débit est pondérée par rapport au niveau de pollution comme expliqué ci-dessus. Ces deux systèmes fournissent de l'énergie électrique afin de faire fonctionner le moteur du ventilateur.

Ce dernier transforme cette énergie en un mouvement mécanique, entraînant la rotation de l'arbre moteur, qui à son tour fait tourner le sous-système roue-pâles.

Ainsi, le mouvement de ventilation est créé. Il engage un débit d'air frais dans la gaine. L'air frais atteint le tunnel à travers des bouches d'air réparties sur les piédroits (ou en plafond) sur toute sa longueur. Dès le premier contact avec l'atmosphère du tunnel, l'air frais devient pollué.

Diagramme de décomposition du sous-processus « Extraire l'air pollué »



Le fonctionnement au niveau de la première partie est pratiquement le même que pour le processus « Insuffler l'air frais ».

La différence au niveau du présent processus « Extraire l'air pollué » est l'utilisation de trappes télécommandées au lieu des bouches de soufflage. Ces dernières sont placées généralement en plafond du tunnel ou en haut des piédroits. Elles servent à l'extraction de l'air pollué.

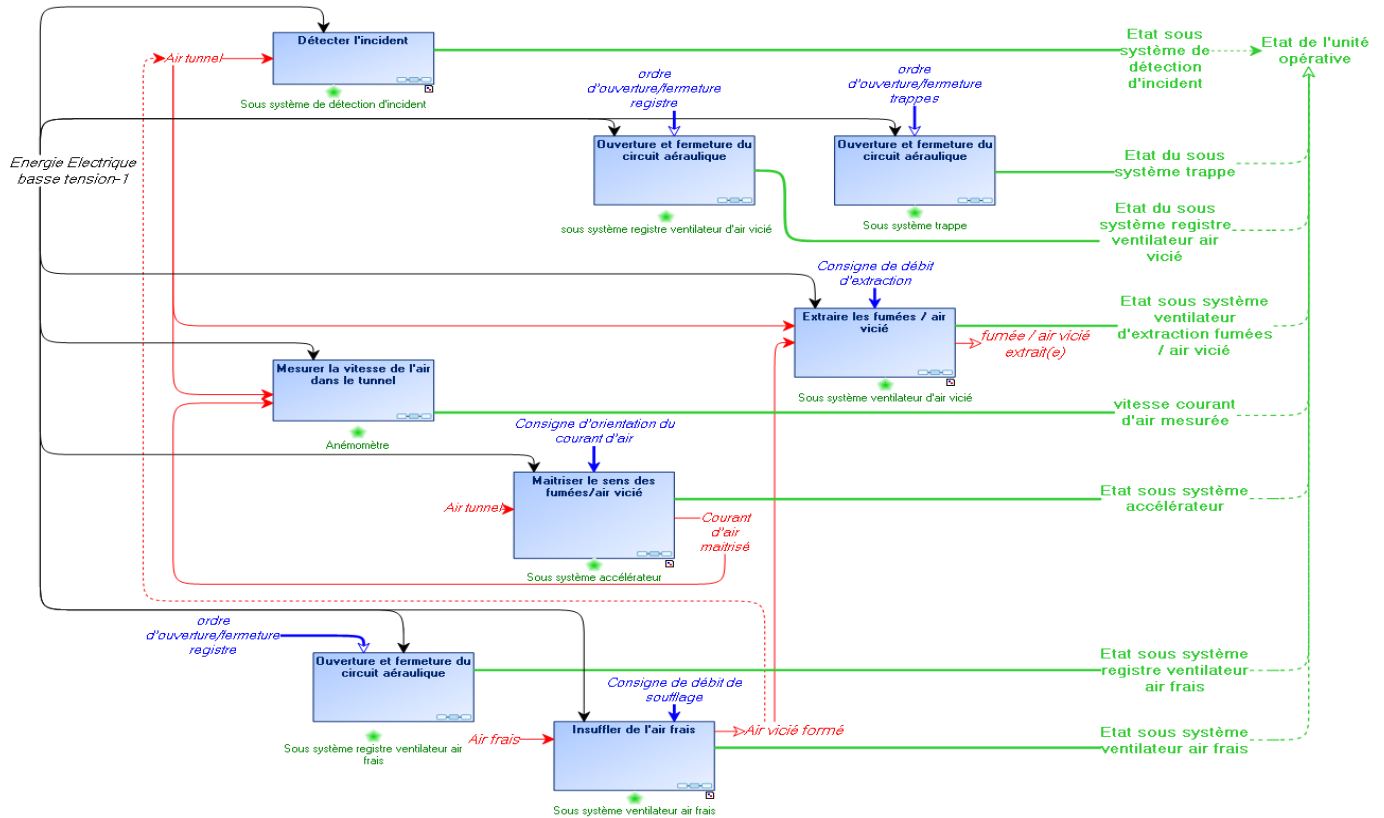
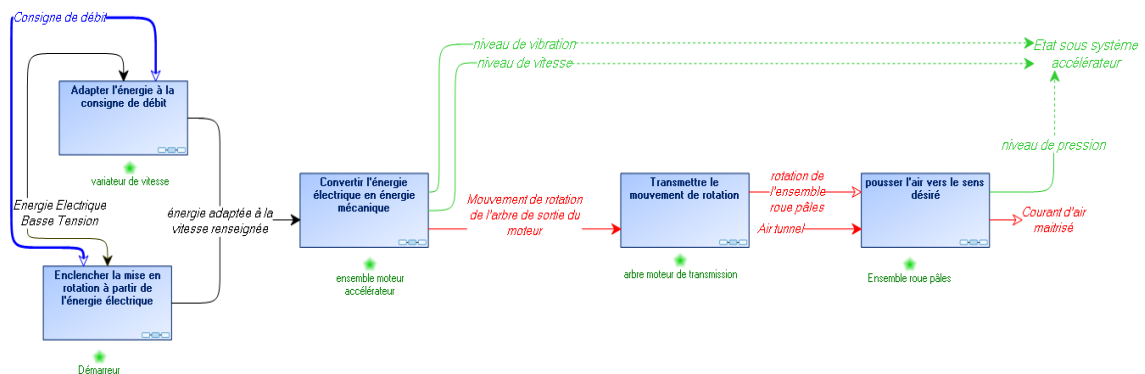


Diagramme de décomposition du sous processus « Maitriser le sens du courant d'air »

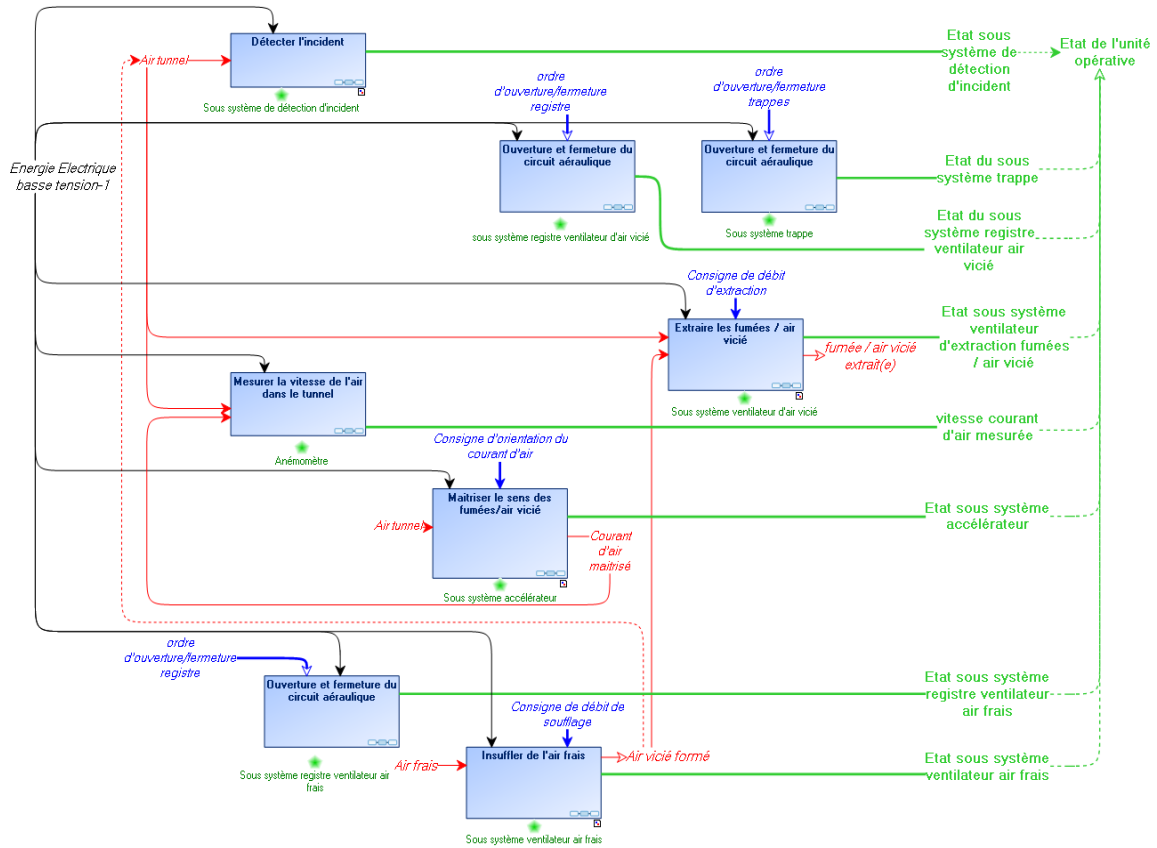


Pour ce qui est des composants de ce sous-processus, on est toujours dans le même esprit hiérarchique que pour le sous-processus d'insufflation d'air frais et d'extraction de l'air pollué. Le système ventilateur utilisé pour accomplir ce sous-processus est de type « accélérateur ».

Afin de maitriser le sens du courant d'air, on n'aura pas besoin d'agir sur la mobilité des pâtes. La variation de débit sera simplement réalisée par un variateur de vitesse et en situation de consigne à débit constant, on utilisera un démarreur.

b) Désenfumage :

Diagramme de décomposition du sous-processus « Assurer le besoin en désenfumage »



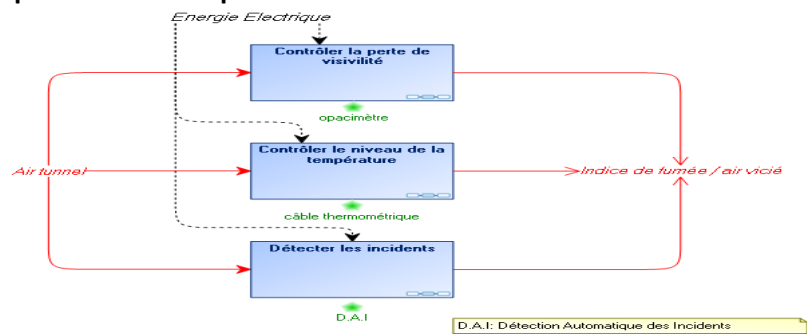
Ce diagramme représente les sous-processus qui décomposent le processus « Assurer le besoin en désenfumage ».

Un système de détection de fumées mis à disposition des opérateurs de surveillance, permet de repérer l'incendie.

Les procédures d'insufflation d'air frais et d'extraction de l'air vicié sont les mêmes que pour la ventilation sanitaire.

Les éléments remontés à l'AP permettront de mettre en route les accélérateurs concernés à leurs performances nominales afin de cantonner les fumées dans la zone souhaitée.

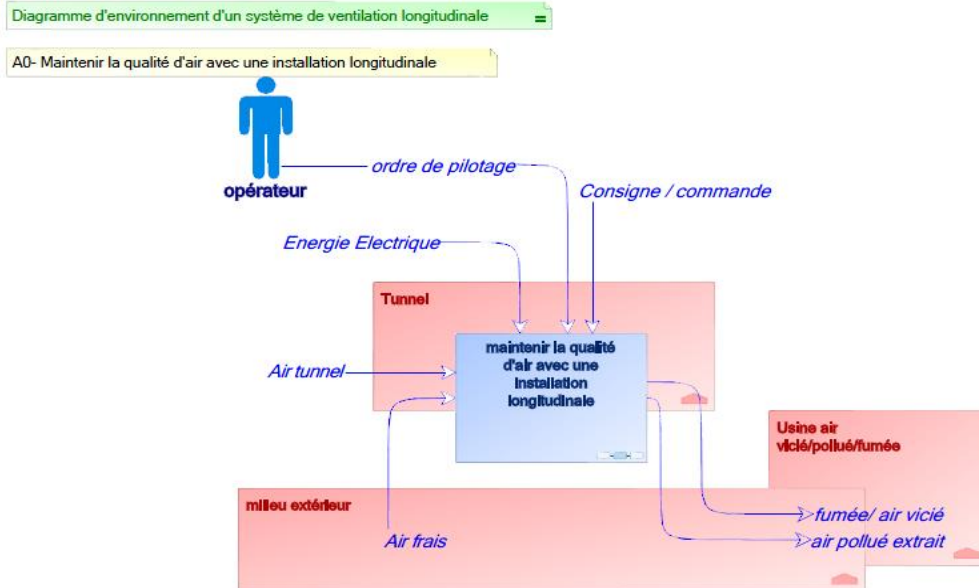
Diagramme de décomposition du sous processus « Détecter les fumées » :



L'utilisation de ces types de capteurs permet de renseigner les opérateurs sur des informations nécessaires dont ils auront besoin pour agir en cas d'incendie.

2. Ventilation longitudinale

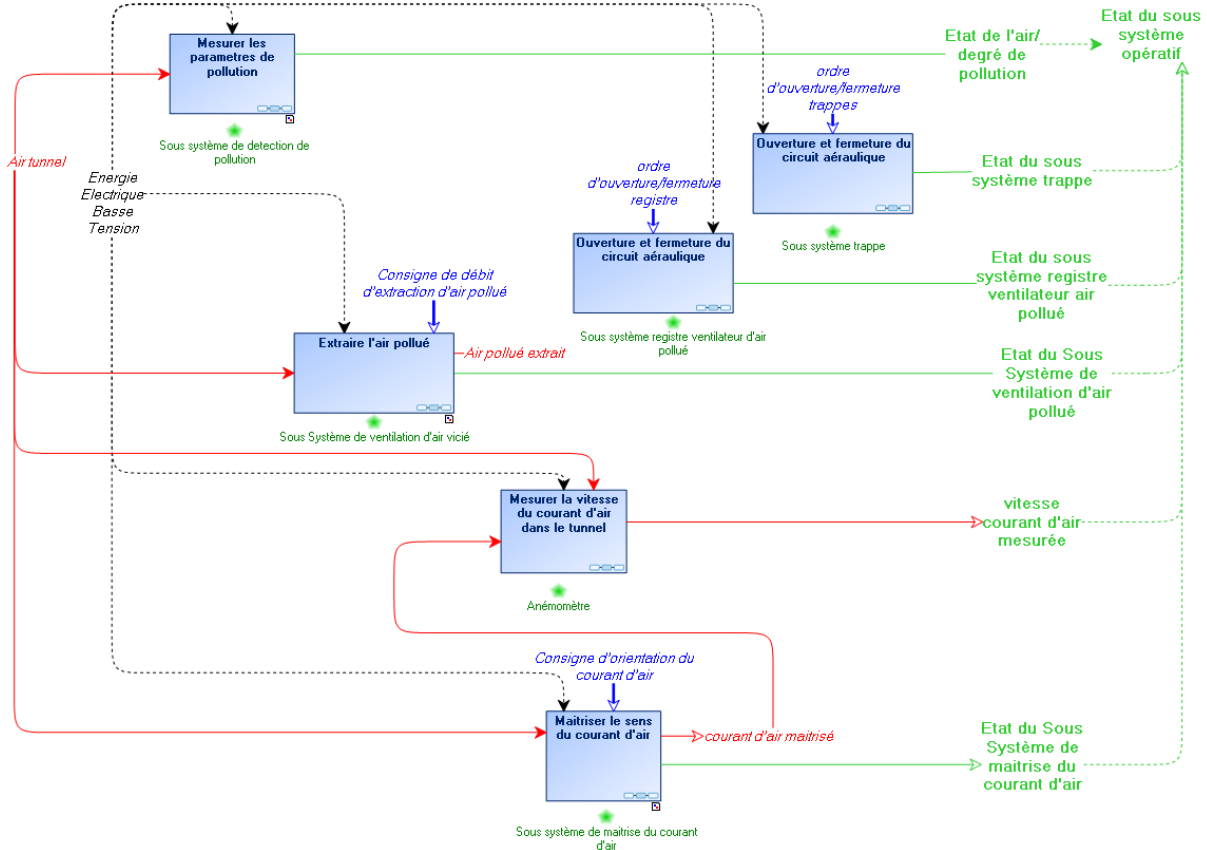
Diagramme d'environnement du processus « Maintenir la qualité avec une installation longitudinale »



D'après le diagramme ci-dessous, on peut remarquer que les deux stratégies de ventilation (transversale et longitudinale) comportent de grandes similitudes en termes de composants. La différence principale réside dans la mise en place d'une seule usine de ventilation pour la présente stratégie. Cette usine est utilisée pour la procédure d'extraction massive de l'air non désiré dans le tunnel.

a) Sanitaire

Diagramme de décomposition du sous-processus « Assurer le besoin en ventilation longitudinale »

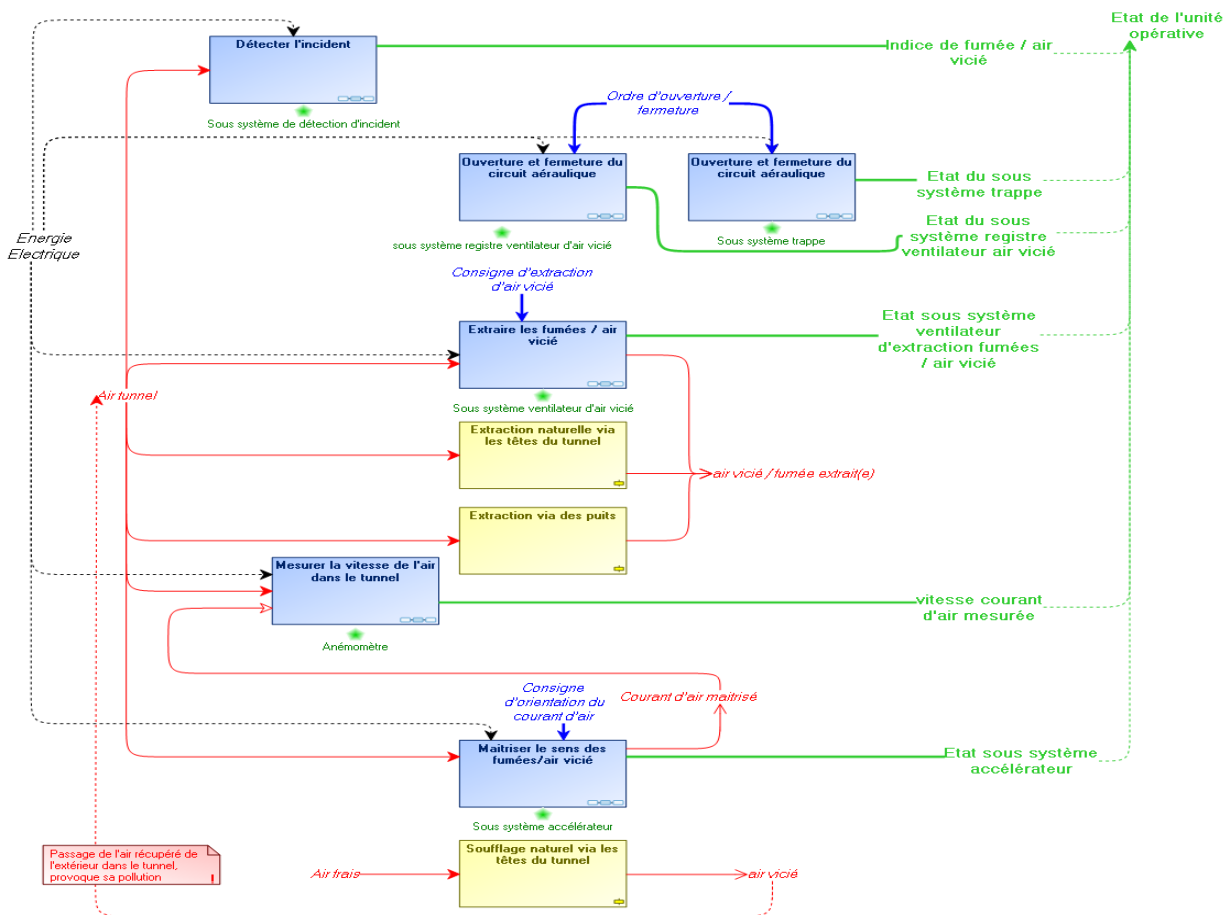


Cette décomposition permet de détailler les sous-processus ainsi que les opérations constitutives du processus « Assurer le besoin en ventilation longitudinale sanitaire ». Le but est de mesurer les paramètres de pollution dans le tunnel afin de savoir si l'on a besoin de provoquer une poussée d'air supplémentaire d'air frais ou si l'air naturellement présent dans l'ouvrage est suffisant pour diluer les polluants.

L'extraction massive et mécanisée de l'air pollué dépend de la longueur du tunnel. Au-delà d'une certaine longueur (environ 800 m en théorie), l'extraction massive peut être utilisée. Dans le cas contraire, on opte pour une extraction naturelle par les têtes des tunnels.

b) Désenfumage

Diagramme de décomposition du sous-processus « Assurer le besoin en désenfumage »



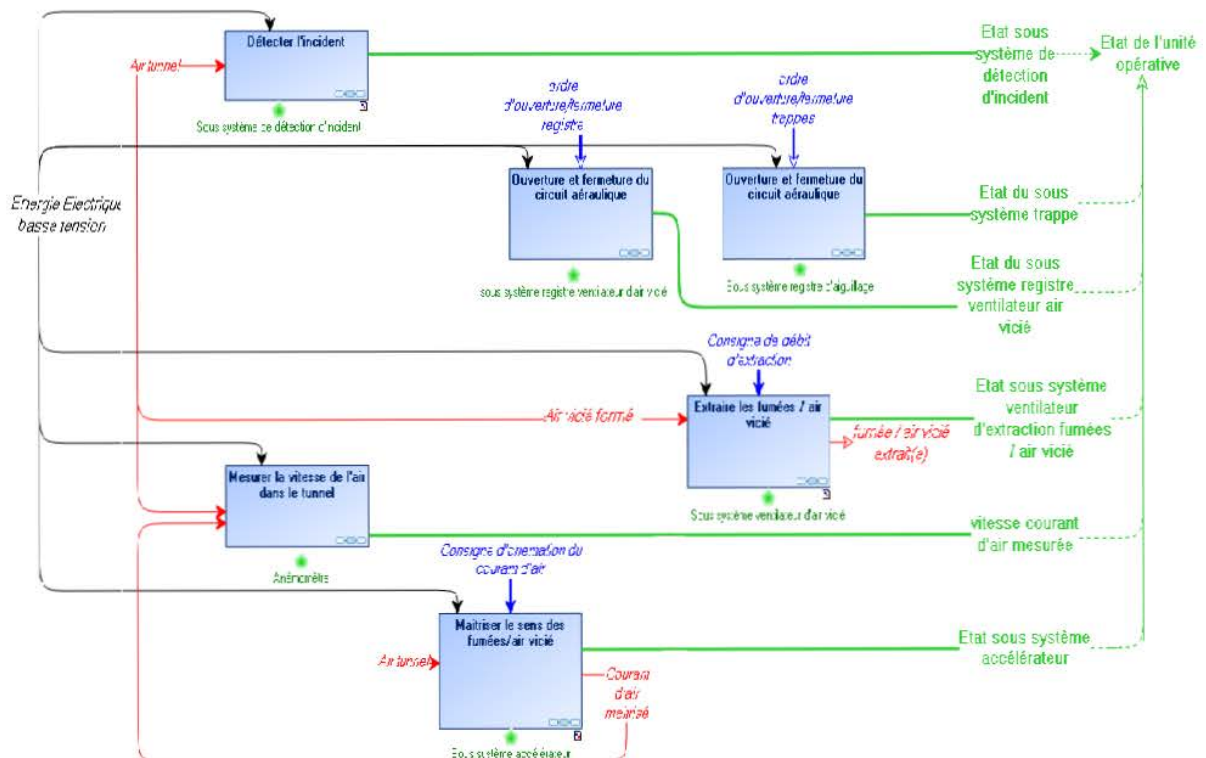
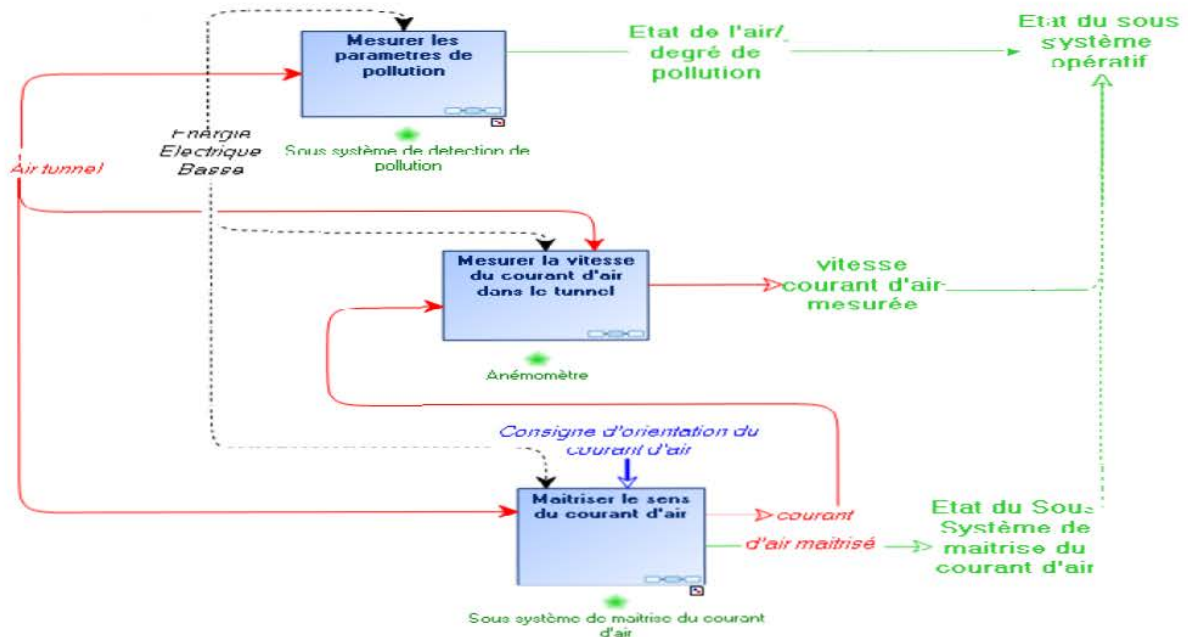
En cas d'incident, l'opérateur est toujours informé par le même sous-système de détection de fumées.

Ces dernières sont repoussées dans le sens de la circulation par le sous-système accélérateur qui provoque une poussée d'air supplémentaire.

Le processus d'extraction des fumées/air vicié est le même que pour l'air pollué.

Annexe 8 : Analyse fonctionnelle du tunnel de la Croix Rousse

Les deux figures ci-dessous sont les plus illustratives de modifications apportées à la modélisation précédemment réalisée. Elle représente respectivement le sous mode 100% longitudinal et le sous mode Evacuation.



Annexe 9 : Extrait de l'application de la méthode Analyse Prévisionnelle du risque

a) L'analyse prévisionnelle su système de ventilation dans sa globalité :

Définition du système(Cycle de vie, fonctions, sous fonctions)

↓

Cartographie des dangers auxquels le système de ventilation et son environnement sont exposés

↓

ID Danger	Dangers génériques	Dangers spécifiques	Evénements dangereux
Tech	Technique	Equipements	mauvaise maintenance
Techno	Technologique	Equipements	Dimensions inadaptées
			Fonctionnement intempestif
			Non démarrage/Arrêt de fonctionnement
Sc	Système de commande GTC	Données	Rupture des cables d'acheminement des infomations
		Réseau	Perturbations
		Matériels	Obsolescence
FH	Facteur humain	Opérateurs de surveillance	Erreur humaine
			malveillance
Env	Environnement		Énergie sonore
EXT	Externes	Usagers du tunnel	Accident
			Incendie

↑
Ce type de dangers n'a pas d'impact direct sur le système mais sur les usagers du tunnel

systèmes de ventilation									
Conception	Exploitation								
	Soufflage extraction						Désenfumage		
	Sous mode Sanitaire						Sous mode longitudinal	Evacuation	Intervention des secours
	Mesurer les paramètres de pollution	Insuffler de l'air frais	Extraire l'air pollué	Mesurer la vitesse du courant d'air	Maîtriser le sens du courant d'air				
					1	1			
1									
	1	1	1	1	1	1	1	1	
	1	1	1	1	1	1	1	1	
	1	1	1	1	1	1	1	1	
	1	1	1	1	1	1	1	1	
							1	1	
							1	1	

↑
Interaction dangers / processus

Echelle des interactions Dangers/SP

Indice de priorité	Interaction dangers/Sous Processus SP	Décision d'analyse, d'évaluation et de
	Aucune interaction	
1	Forte à très forte	Immédiatement
10	moyenne à forte	Ultérieurement

b) Extrait de l'APR Scénario :

Les effets indésirables notés en bleu sont considérés comme des éléments d'entrée de l'AdD.

P = Probabilité d'occurrence du dommage

A : improbable

B : rare

C : occasionnel

D : élevé

G = Gravité maximale du dommage possible

1 : négligeable

2 : faible

3 : grave

4 : mortel

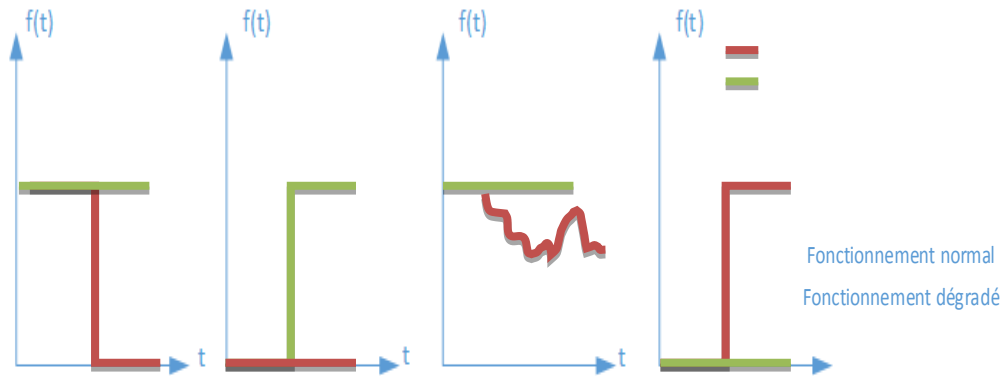
Sous Mode 2: Soufflage Extraction

Id Danger	Ss Processus	Sous processus / Opérations	Événement dangereux	Situation dangereuse	Cause	Événement indésirable ou conséquences sur le système/ENVIRONNEMENT	P	G
Tech Techno SC		Mesurer les paramètres de pollution	Mauvaise maintenance	Sollicitation du système de mesure	Non prise en compte des précisions et actions de maintenance	Pas de contrôle de l'atmosphère	3	3
			Dysfonctionnement du système de mesure		Coupure d'énergie			
			Dysfonct du système de commande GTC		Défaut fabricant			
					perturbation des circuits de commande			
					Obsolescence du circuit de commande			
					ruptures des cables			
Coupure d'énergie								
Tech Techno Techno		Insuffler de l'air frais	Mauvaise maintenance	Sollicitation du système ventilateur d'extraction/soufflage	Non prise en compte des précisions et actions de maintenance	Pas d'apport d'air frais	3	
			Arrêt /non démarrage du système ventilateur		panne des composants			
			Dimensionnement du système de ventilation dans le tunnel	la présence des usagers dans le tunnel	Coupure d'énergie	Non optimisation de l'énergie	3	
Tech SC Techno	S A N I T A I R E	Maitriser le sens du courant d'air	Mauvaise maintenance	Sollicitation du système ventilateur d'extraction	Non prise en compte des précisions et actions de maintenance	Pas de contrôle de du courant d'air	3	
			Dysfonct du système de commande GTC		perturbation des circuits de commande			
					Arrêt /non démarrage du système ventilateur			Obsolescence du circuit de commande
			fonctionnement intempestif					la présence des usagers dans le tunnel en dessous des accélérateurs
EXT		Comportements des usagers véhiculés dans le tunnel	la présence des usagers Véhiculés dans le tunnel	Poids Lourd a heurté le piédroit et le muret central	Dégats matériels- Voie lente de la chaussée Nord fermée	2		
				collision avec d'autres véhicules ou équipements				
				Accidents entre VL et deux roues	Blessé, voie rapide sud fermée	3		
				Accident entre 1 VL et 1 deux roues, puis implication d'1 autre VL	blessé, fermeture de la chaussée Nord	3		
				Accident entre 1 VL et 1 deux roues (car changement de voie du VL), puis implication de 2 autres VL	2 tués, 2 blessés légers, fermeture des 2 chaussées	1		
État des véhicules traversant le tunnel		Panne d'un Véhicule Léger	Blessé - Fermeture de la chaussée	3				

Les événements redoutés identifiés

Annexe 10 : Extrait de l'application de la méthode Analyse des modes de défaillances de leurs effets sur le sous mode Extraction et Soufflage

a) Modes de défaillances génériques des fonctions :



b) Extraits des modes de défaillances proposées par l'AFNOR :

Défaillance structurelle	Ne s'arrête pas
Blocage Physique	Ne démarre pas
Vibration	Ne commute pas
Ne reste pas en position	Fonctionnement après délai prévu
Ne s'ouvre pas	Sortie erronée
Défaillance en position ouverte	Fonctionnement prématuré

c) AMDE fonctionnelle

Les effets de défaillances répétitifs sont présentés en jaune. Ils sont ensuite intégrés dans un arbre de défaillances

Les effets de défaillances (avec des motifs en forme de point) ont fait l'objet d'une étude plus approfondie au niveau de l'AdD car ils sont dus à une combinaison de défaillances

Système étudié:	Tunnel de la croix rousse	AMDE SYSTÈME
Mode:	Automatique - Sanitaire	

A0

Composant de	Fonction	Mode de défaillance	Causes		Effets	
unité d'alimentation électrique	Alimenter en énergie	Pas de fonction	EXTERNES	Absence de courant électrique à la source	Qualité d'air dégradée dans le tunnel	
		Fonction dégradée		Courant électrique non adapté aux besoins des unités		
		Plus de fonction		Coupure de courant électrique		
		Fonctionnement intempestif		Courant électrique perturbé		
unité de commande et de surveillance	Commander et surveiller	Pas de fonction	EXTERNES	Absence de l'énergie de commande		
		Plus de fonction		Absence de la consigne / d'ordre de commande de la ventilation sanitaire		
		Fonctionnement intempestif		Problème de remonté d'information de l'unité opérative: Cable d'acheminement des états des éléments sont défectueux ou endommagés		
Unité opérative	Assurer le maintien de la qualité d'air dans le tunnel	<i>Cf Analyse fonctionnelle</i>				

A31

Composant de	Fonction	Mode de défaillance	Causes		Effets	
système de ventilation sanitaire	Assurer le besoin en ventilation sanitaire	Pas de fonction	EXTERNES	Problème d'alimentation du sous système de ventilation sanitaire	la ventilation sanitaire n'est pas assurée-Non démarrage de l'activité du sous système de ventilation sanitaire	
			INTERNES	Absence de la consigne / d'ordre de commande de la ventilation sanitaire		
		Fonction dégradée	EXTERNES	Rupture de/d'une fonction interne du sous système de ventilation sanitaire aboutissant à la perte de la fonction principale	La ventilation sanitaire n'est pas réalisée suivant le niveau de performances demandé	
			INTERNES	Problème d'alimentation du sous système de ventilation sanitaire		
		Plus de fonction	EXTERNES	Dégradation interne de /des fonctions du sous système de ventilation sanitaire aboutissant à la dégradation de la fonction principale	la ventilation sanitaire ne se réalise plus en cas de sollicitation - Arrêt des systèmes de ventilation sanitaire	
			INTERNES	Problème de l'automate de commande du sous système de ventilation sanitaire		
		Fonctionnement intempestif		EXTERNES	Problème d'alimentation du sous système de ventilation sanitaire	le système de ventilation sanitaire se met en marche sans être sollicité
					Problème de l'automate de commande du sous système de ventilation sanitaire	
				INTERNES	Perte de/des fonctions du sous système de ventilation sanitaire	
					Défaillance interne de/des fonction du sous système de ventilation sanitaire conduisant à un démarrage intempestif	

A31-1

Sous système	Fonction	Mode de défaillance	Causes		Effets
Sous système de détection de pollution	Mesurer les paramètres de pollution	Rupture de la/les fonctions du sous ensemble de mesure de	EXTERNES	Connexions d'alimentation électriques débranchées Pas d'énergie électrique	Mauvais contrôle de l'atmosphère
			INTERNES	Défaillance structurelle (rupture de l'ensemble de mesure) Fonctionnement après le délai prévu	
		Perte de/d'une fonction interne du sous système	EXTERNES	Coupeure de l'énergie électrique	
			INTERNES	Court circuit	

A31-7

Composant de	Fonction	Mode de défaillance	Causes		Effets
système de mesure de courant d'air dans le tunnel	mesurer le courant d'air dans le tunnel	Rupture de la fonction du sous système de mesure de courant d'air	EXTERNES	Connexions d'alimentation électriques débranchées Pas d'énergie électrique	courant d'air non maîtrisé
			INTERNES	Défaillance structurelle de l'anémomètre	
		Dégradation interne de la fonction du sous	EXTERNES	Energie électrique non adéquate	Courant d'air moyennement maîtrisé
			INTERNES	détérioration de l'anémomètre	

A31-4

Composant de	Fonction	Mode de défaillance	Causes		Effets		
Sous système ventilateur d'air frais	Insuffler de l'air frais	Rupture de/des Fonctions du sous système ventilateur d'air frais	EXTERNES	Connexions d'alimentation électriques défaillantes Pas d'énergie électrique Pas de consigne de débit d'entrée pour l'injection de l'air frais Cablages automates défaillants	Non démarrage du sous système de ventilateur d'air pollué		
				INTERNES		Défaillance structurelle du variateur de vitesse Défaillance structurelle du démarreur Défaillance structurelle De l'ensemble moteur Défaillance structurelle de l'arbre moteur	Effet indirect dépendant du niveau de pollution
						EXTERNES	
			INTERNES		mauvaise variation de vitesse Emballement de l'ensemble moteur L'ensemble moteur manque de puissance Vibration de l'arbre moteur Rotation lente / rapide/inversée de l'arbre moteur Vibration de l'ensemble roue pâles Position incorrect des pâles (phase conception / démarrage de chantier)		
				EXTERNES	Coupeure de l'énergie électrique Obsolescence du circuit de commande Cablages automates défaillants		Effet indirect dépendant du niveau de pollution
					INTERNES	Le démarreur s'emballe sans faire tourner le moteur Défaillance interne du sous ensemble accélérateur Disjonction de l'ensemble moteur	
		EXTERNES	Perturbation de l'énergie électrique Perturbation au niveau du circuit de commande du sous système de ventilation sanitaire			Dégradation prématuré du système ventilateur d'extraction d'air pollué	
			EXTERNES	Problème de l'automate de commande du sous système de désenfumage Problème d'alimentation du sous système de désenfumage			Désenfumage ne se lance pas

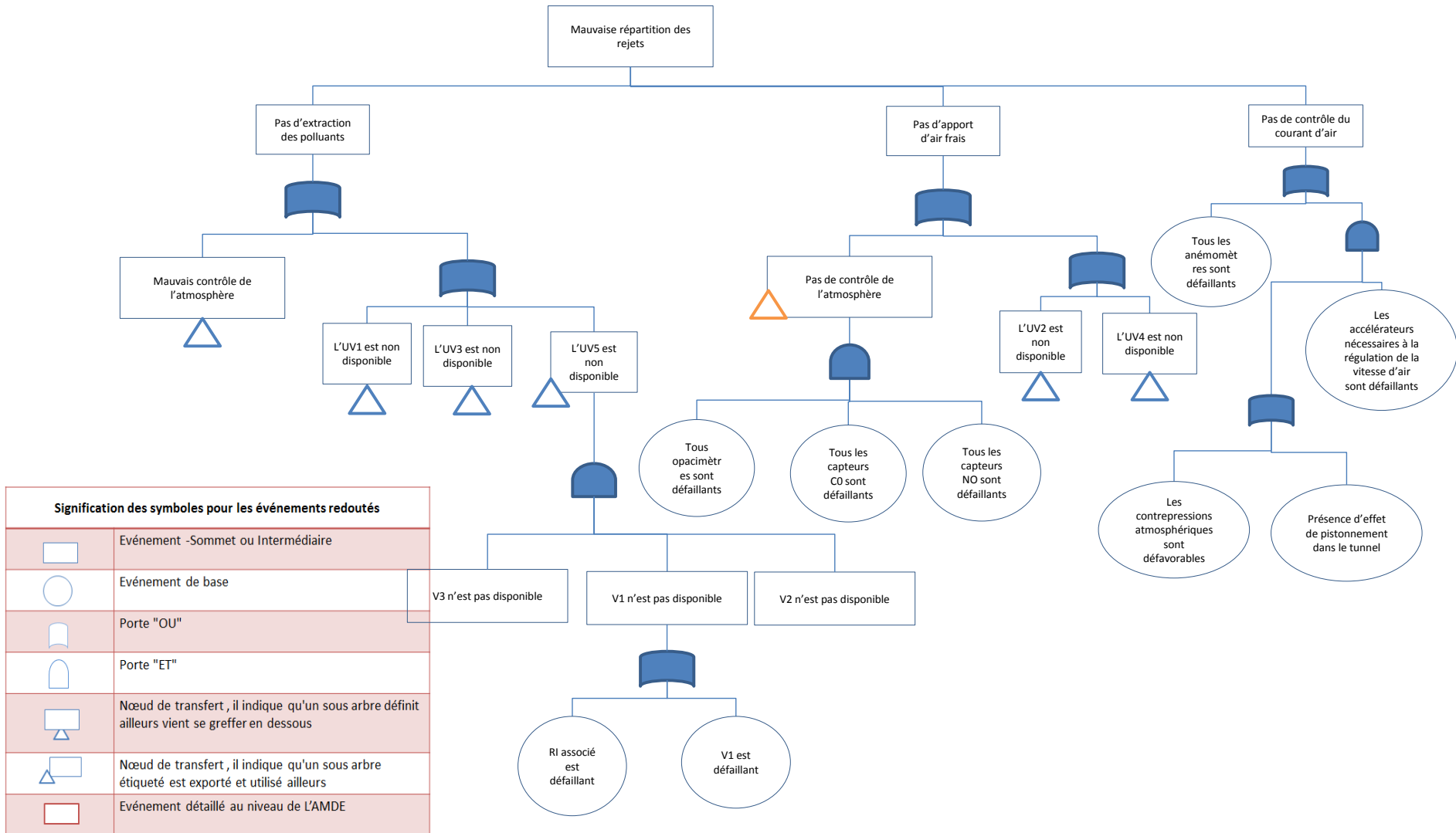
d) AMDE Technique :

A31-4

Composant de l'ouvrage	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effets	Détection			
Variateur de vitesse	Adapter l'énergie à la consigne de débit	Défaillance structurelle	Vieillessement	Non alimentation de l'ensemble moteur du ventilateur	pupitre - afficheur 7seg			
			Usure					
			Mauvaise maintenance					
			Mauvais montage					
		Mauvaise variation de vitesse	Défaut constructeur	Débit réduit/insuffisant				
			Vieillessement					
			Usure					
			Mauvaise maintenance					
		Démarrage intempestif	Défaut constructeur	Variation de débit non désiré				
			Vieillessement					
			Usure					
			Mauvaise maintenance					
Démarrreur	Entrainer le moteur en rotation à vitesse constante	Défaillance structurelle	Vieillessement	Non alimentation de l'ensemble moteur	pupitre - afficheur 7seg			
			Usure					
			Mauvaise maintenance					
			Défaut constructeur					
		Démarrreur s'emballe sans faire tourner l'ensemble moteur	Mauvaise maintenance rupture du montage	mise en route impossible de l'ensemble moteur				
		Démarrage intempestif	Vieillessement	mise en route non désirée de l'ensemble moteur				
			Usure					
			Mauvaise maintenance					
			Défaut constructeur					
		Ensemble Moteur V.A.F	Convertir l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation	Défaillance structurelle		Défaillance interne	Mouvement de rotation non transmis	pupitre - afficheur 7seg- capteur de vitesse capteur de vibration+capteur de vitesse capteur de vitesse
						Mauvaise maintenance		
						dimension inadéquate du moteur		
Fatigue mécanique								
Disjonction de l'ensemble moteur	Surintensité variateur de vitesse/démarrreur			rotation non désirée de l'arbre moteur				
Démarrage intempestif	Fonctionnement intempestif de l'automate de commande							
moteur manque de puissance	Mauvais cablage			Mauvaise rotation - Débit réduit				
	dimension inadéquate du moteur							
	Mauvaise maintenance							
Emballlement de l'ensemble moteur	Défaillance interne de l'ensemble moteur			Usure prématuré de l'ensemble moteur				
Non détection de la vitesse de l'ensemble moteur	Défaillance interne de l'ensemble moteur			risque de non fermeture du sous système registre				
Arbre moteur de transmission	Transmettre le mouvement de rotation			Vibration	arbre bloqué	Usure prématurée de l'arbre	Bruit- capteur de vibration	
		Mauvais montage						
		Défaillance structurelle	Usure normale	Rupture de la chaîne cinématique entraînant l'inefficacité du couple moteur-Perte d'énergie				
			désolidarition					
		Rotation lente	Fatigue mécanique	emballement de l'ensemble roue pâles blocage de l'ensemble moteur				
		Rotation rapide	jeu					
		Rotation inversée	Mauvais montage					
		Ensemble roue pâles	Souffler l'A.F	Défaillance structurelle	désolidarition	sous système ventilateur ne démarre pas	pupitre - afficheur 7seg bruit - capteur de pompage	
vieillessement								
Vibration	mauvais montage			Usure prématurée du système roue pâles				
	Présence objet étranger							
Position incorrectes des pâles(phase conception /démarrage de chantier)	Blocage des pâles			débit d'air réduit dû à la résistance de l'air et augmentaion de la consommation				
	débit d'air trop important dû à la puissance de poussée au-delà du							

Annexe 11 : Extrait de l'application de la méthode arbre de défaillances sur le sous mode Extraction et Soufflage Tube Sud

ER2: Mauvaise répartition des rejets



Annexe 12 : Extrait de l'application de la méthode diagramme de fiabilité sur une usine de ventilation d'Extraction et Soufflage



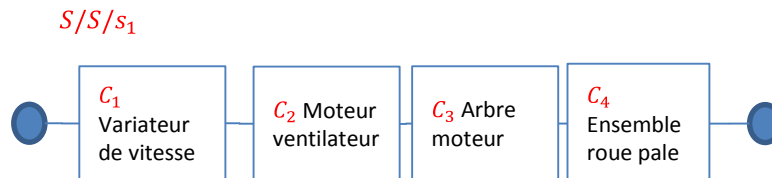
La fiabilité du Sous Ensemble Ventilateur:

$$R_V = P(E_1 * E_2 * E_3) = R_1 * R_2 * R_3$$

E2 l'événement que "Sous Ensemble Ventilateur Aval" fonctionne à l'instant t

E2 l'événement que "Sous Ensemble Registre d'Isolement" fonctionne à l'instant t

E3 l'événement que "Sous Ensemble Registre de Carneaux" fonctionne à l'instant t



La fiabilité du Sous Ensemble Aval Ventilateur:

$$R_{AV} = P(E_1 * E_2 * E_3 * E_4) = R_1 * R_2 * R_3 * R_4$$

E2 l'événement que "Sous Ensemble Variateur de vitesse" fonctionne à l'instant t

E2 l'événement que "Sous Ensemble Moteur Ventilateur" fonctionne à l'instant t

E3 l'événement que "Sous Ensemble Arbre moteur" fonctionne à l'instant t

E3 l'événement que "Sous Ensemble Roue Pâle" fonctionne à l'instant t

Annexe 13 : Tableau de comparaison des méthodes de SdF

Méthodes	Type	Objectifs	Domaine de pertinance	Appuie de la méthode	Phase de mise en œuvre	Avantages	Inconvénients	
Méthodes	APR	Inductive	Relever les points du système qui peuvent être critique pour la sécurité et évaluer les risques correspondants	systèmes conséquents	l'analyse fonctionelle du système	Phase de conception, ensuite une mise à jour tout au long de la durée de vie du système	Economique en terme de temps	Les points critiques relevés devront faire l'objet d'une étude plus détaillée d'où la nécessité d'utiliser une AMDEC ou AdD ultérieurement
							ne nécessite pas un niveau de description détaillé du système	
	AMDE(C)	Inductive Qualitative Quantitative	Identifier les défaillances dont les conséquences peuvent affecter le fonctionnement du système (AMDE) et de les hierarchiser selon le niveau de criticité (AMDEC)	tous les secteurs d'activité, essentiellement : système électrique, mécanique, hydrolique et aerolique	l'analyse fonctionelle du système	Aussi bien en conception qu'en exploitation	Maximum de garantie d'exhaustivité	Inadéquation pour l'étude des conséquences des erreurs humaines
							Informations disponible au moments de l'étude: docs, historiques des pannes	Connaissances des états dégradés du système et de ces composants
Arbre de Défaillance	déductive Qualitative Quantitative	Trouver l'ensemble des combinaisons d'événements élémentaires conduisant à une défaillance	Tous domaines d'activité y compris ceux avec un critère combinatoire d'événements	La liste des événements redoutés basée sur un REX	Aussi bien en conception qu'en exploitation	visualiser l'ensemble des combinaisons d'événements élémentaires conduisant à une défaillance	ne prend pas en compte l'aspect temporel des événements	
								APR
Arbre de succès ou Diagramme de Fiabilité (DF)	Statique Qualitative Quantitative	Réprésenter l'architecture du système	Tout domaine d'activité	l'analyse fonctionelle du système	peut importe la phase	Présentation simple et logiques du fonctionnement du système	Difficulté à mettre en œuvre en cas de systèmes et indépendant	
		Calcul de fiabilité des systèmes						
		Identifier les redondances simples						

Annexe 14 : Extrait de déploiement de la méthode AMDE Fonctionnelle sur la totalité du tunnel de la Croix Rouse: Mode Désenfumage

A32

Composant de l'ouvrage	Fonction	Mode de défaillance	Causes		Effets	
			EXTERNES	INTERNES		
Sous système de désenfumage	Assurer le besoin en cas d'incendie	Pas de fonction	EXTERNES	Problème d'alimentation du sous système de désenfumage	Le désenfumage n'est pas assuré - Propagation, stratification et accumulation des fumées non cantonnées	
			INTERNES	Problème de l'automate de commande du sous système de désenfumage		
		Fonction dégradée	EXTERNES	Rupture de/d'une fonction interne du sous système de ventilation sanitaire aboutissant à la perte de la fonction principale		Le désenfumage n'est pas réalisé suivant le niveau de performances demandé -
			INTERNES	Problème d'alimentation du sous système de désenfumage		
		Plus de fonction	EXTERNES	Dégradation interne de /des fonctions du sous système de désenfumage aboutissant à la dégradation de la fonction principale	Le désenfumage n'est plus assuré - Propagation ; stratification et accumulation des fumées non cantonnées	
			INTERNES	Problème de l'automate de commande du sous système de désenfumage		
		Fonctionnement intempestif	EXTERNES	Problème d'alimentation du sous système de ventilation sanitaire	fumées non canalisées	
			INTERNES	Perte de/des fonctions du sous système de désenfumage		
					EXTERNES	Problème de l'automate de commande du sous système de désenfumage
					INTERNES	Perturbation interne de/des fonction du sous système de désenfumage sanitaire conduisant à un démarrage intempestif

A32-6

Composant de l'ouvrage	Fonction	Mode de défaillance	Causes		Effets			
			EXTERNES	INTERNES				
Sous système accélérateur	Provoquer une poussée d'air de retour	Rupture interne de/des donctions du sous système accélérateur	EXTERNES	Connexions d'alimentation électriques débranchées	Non démarrage du sous système accélérateur -			
				Pas d'énergie électrique				
				Cablages automates défaillants				
				Pas de consigne d'orientation du courant d'air				
		Dégradation interne de /des fonctions du sous système accélérateur	INTERNES		Défaillance structurelle du variateur de vitesse	courant d'air non maîtrisé-		
					Défaillance structurelle du démarreur			
					Défaillance structurelle de l'ensemble moteur			
					Défaillance structurelle de l'arbre moteur			
					EXTERNES		Tension électrique basse et/ou non adéquate	Courant d'air moyennement maîtrisé
					INTERNES		mauvaise variation de vitesse	
							Emballement de l'ensemble moteur	
							l'ensemble moteur manque de puissance	
		Vibration de l'arbre moteur						
		Rotation lente / rapide/inversée de l'arbre moteur						
		Vibration de l'ensemble roue pâles						
		Position incorrect des pâles						
Perte de/d'une fonction interne du sous système accélérateur	EXTERNES		obsolésence du circuit de commande	Arrêt de l'activité du sous système accélérateur				
			Cablages automates défaillants					
Fonctionnement intempestif de/des fonction du sous système accélérateur	INTERNES		Coupure de l'énergie électrique	courant d'air non maîtrisé-				
			Le démarreur s'emballé sans faire tourner l'ensemble moteur					
			Défaillance interne du sous ensemble accélérateur					
			Disjonction de l'ensemble moteur	Dégradation prématuré du sous système accélérateur				
			EXTERNES		Perturbation au niveau de la source d'énergie			
			Perturbation au niveau du circuit de commande du sous système de ventilation sanitaire	courant d'air non maîtrisé-				
			INTERNES		Démarrage intempestif du variateur de vitesse			
			Démarrage intempestif du démarreur					

A32-1

Sous système	Fonction	Mode de défaillance	Causes		Effets
Sous système de détection de fumée	Localiser et identifie l'incendie	Rupture de la fonction du sous ensemble de détection de fumées	EXTERNES	Connexions d'alimentation électriques débranchées	Mauvaise localisation de l'incident
				Pas d'énergie électrique	
		Dégradation de la fonction du sous ensemble détection de fumées	INTERNES	Défaillance structurelle du sous système de détection de fumée	
				Fonctionnement après le délai prévu	
Perte de la fonction interne du sous système de détection de fumées	EXTERNES	Coupure de l'énergie électrique			
	INTERNES	Court circuit			

Sous mode Evacuation :

A3-7

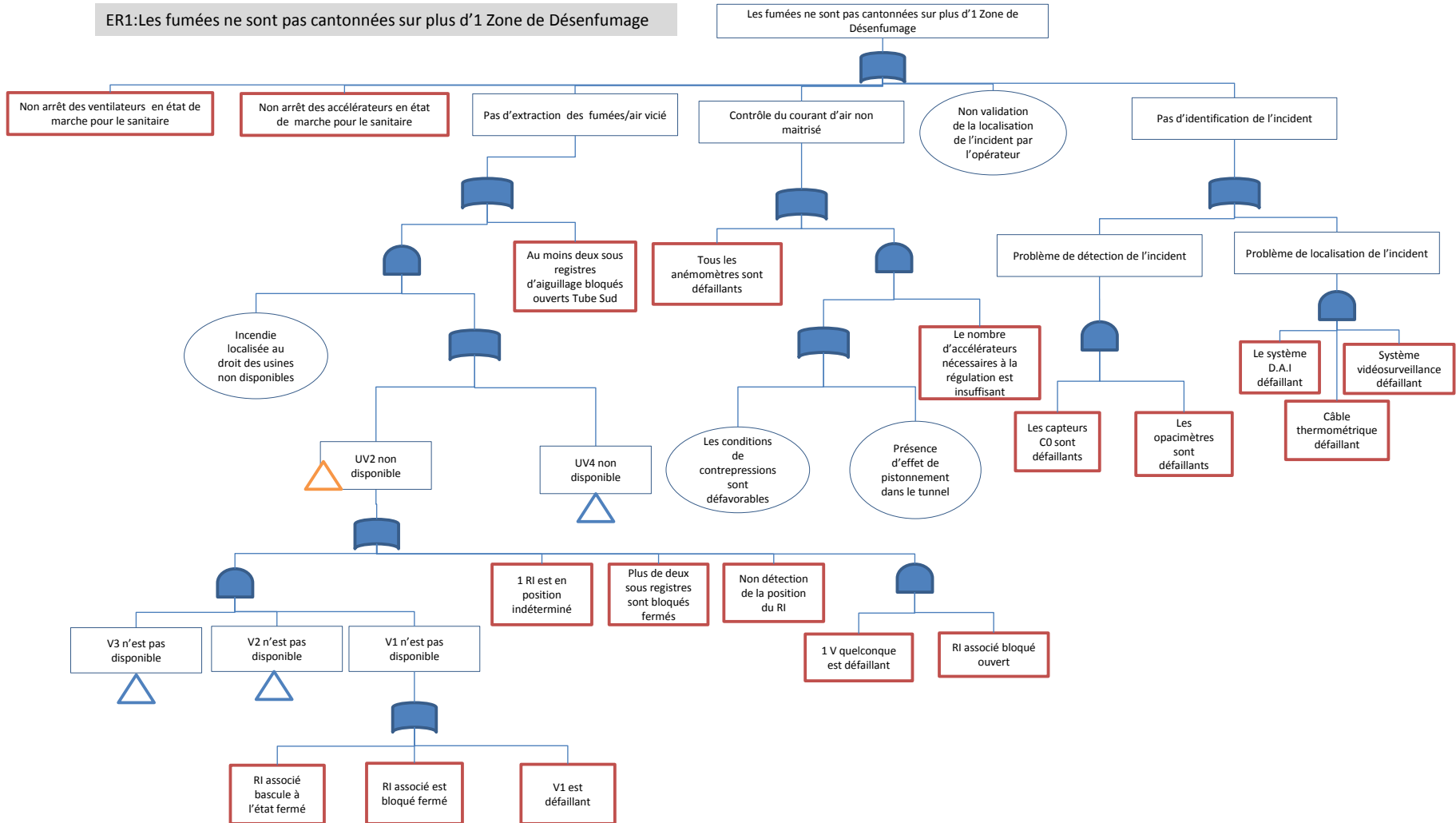
Composant de l'ouvrage	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effets	Détection
Anémomètre	Mesurer les paramètres de l'air extrait	Défaillance structurelle	Viellissement	calcul de vitesse d'air dans le tunnel perturbé	alarme GTC
			rupture du composant		
			Choc		
			Défaut constructeur		
			Mauvais montage		
			Problème d'étalonnage		
		détérioration de l'anémomètre	Problème de calibrage	Calcul modifié de la vitesse d'air - Mesures incorrectes	
			humidité-température		
	mauvaise maintenance				
	usure				

AMDE Technique :


A32-1


Composant de l'ouvrage	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effets	Détection
Sous système registre d'aiguillage	ouverture du circuit aéraluque	Non détection de la position du sous système registre d'aiguillage	Mauvais réglage	système ventilateur non disponible et usine non disponible	voyant alarme en défaut
			Mauvais montage		
			Défaillance interne		
		Position indéterminée du sous système registre d'aiguillage	Mauvaise maintenance		
			Défaillance interne		
			Mauvaise maintenance		
	sous système registre d'aiguillage bloqué ouvert	Défaillance interne	Effet indirect dépendant de l'état du ventilateur en question (CF Arbre de défaillance*)		
		changement de position non désiré du sous système registre d'aiguillage	Mauvais réglage	fermeture du registre d'aiguillage	
			Mauvais montage		
	Défaillance interne				
	ouverture et fermeture du circuit aéraluque	Non détection de la position du sous système registre d'aiguillage	Mauvais réglage	système ventilateur non disponible et usine non disponible	
			Mauvais montage		
Défaillance interne					
sous système registre d'aiguillage bloqué fermé		Mauvaise maintenance	Effet indirect dépendant de l'état du ventilateur en question (CF Arbre de défaillance*)		
		Défaillance interne			
		Mauvaise maintenance			
position indéterminée du sous système registre d'aiguillage bloqué au milieu		système ventilateur non disponible et usine non disponible			
changement de position non désiré du sous système registre d'aiguillage	Défaillance interne	ouverture du registre de canneaux			

Annexe 15 : Extrait de déploiement de la méthode AdD sur la totalité du tunnel de la Croix Rouse: Mode Désenfumage (Tube Nord)



Annexe 16 : Fiche de visites des tunnels


 UNIVERSITÉ DE LORRAINE
 M2ISC-SSM


 FICHE DE VISITE – PROJET DE STAGE

Date : 13/05/14

Titre du sujet de stage :
 Analyse des risques/Sûreté de fonctionnement des systèmes de ventilation des tunnels.

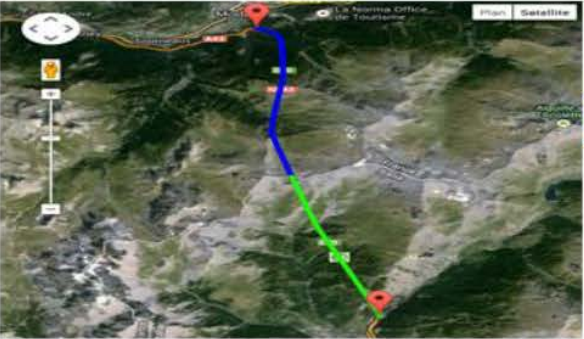
Participants :

Nom	Fonction
Julien MATHELON	Ingénieur d'études
Fatima-Ezzahra AIT TALHIQ	Stagiaire M2 ISC

Fiche technique du tunnel :

Nom du Tunnel	FREJUS
Nature	Transfrontalier (France - Italie)
Dimensions	Bidirectionnel - Monotube
	12.87km
Maitre d'ouvrage	SFTRF * (côté français)
Maitre d'œuvre	SETEC TPI


Plan tunnel :




Légende :

- Partie Italienne
- Partie française

1 003 91954R S T 001 001 1 1


 UNIVERSITÉ DE LORRAINE
 M2ISC-SSM


 FICHE DE VISITE – PROJET DE STAGE

Occasion de la visite :
 Maintenance d'un ventilateur d'air frais situé dans l'usine B

Programme :

- Visite guidée :
 Des deux usines de ventilation A et B du côté français
 Des locaux techniques
 Des gaines de ventilation
- Prendre des photos pour Pauline concernant la mise en place de variateur pour les moteurs des ventilateurs dans les usines A et B

Plus de la visite :

- Voir de près la majorité des équipements concourants à la ventilation.
- Assister à la mise en marche d'un ventilateur
- Rencontre du maitre d'ouvrage
- Assister à une inspection de sécurité sur les ventilateurs d'air frais et pollué

*SFTRF (Société française pour le tunnel routier du Fréjus)

1 003 91954R S T 001 001 1 1



Figure 26 : Usine de ventilation localisée dans le tunnel du Fréjus



Figure 28 : Ventilateur ouvert pour la maintenance périodique au tunnel du Fréjus



Figure 25 : Armoire de commande pour un ventilateur dans le tunnel de la Croix Rousse



Figure 27 : Usine de ventilation dans le tunnel de la Croix Rousse

Date : 12/06/14

Titre du sujet de stage :

Analyse des risques/Sûreté de fonctionnement des systèmes de ventilation des tunnels.

Participants :

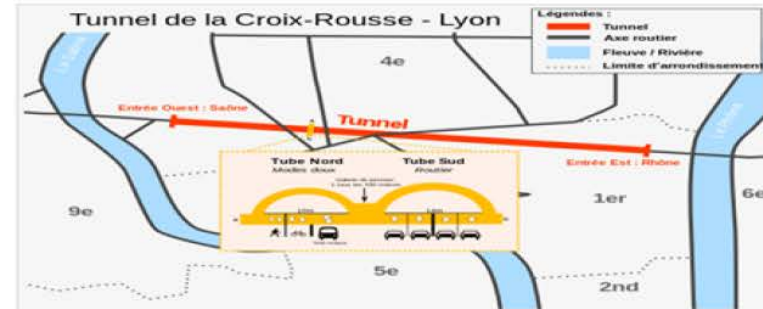
Nom	Fonction
Guillaume PLANCHENAUT	Ingénieur d'études
Romain DEBACQUE	Ingénieur d'études
Fatima-Ezzahra AIT TALHIQ	Stagiaire M2 ISC

Fiche technique du tunnel :

Nom du Tunnel	CROIX ROUSSE
Type	Tunnel routier (tube sud) et tunnel piéton (tube nord)
Dimensions	Bidirectionnel - bitubes 1,757 km pour le tube routier 1,763 km pour le tube piéton
Maitre d'ouvrage	Grand Lyon
Maitre d'œuvre	SETEC TPI

Plan tunnel :

1	003	91954R	S	T	001	001	1	1
---	-----	--------	---	---	-----	-----	---	---



Occasion de la visite :

Mesure sonore dans les usines (2,3)

Programme :

- Visite guidée tunnel routier:

Des usines de ventilation implantées dans un milieu urbain
Local technique de surveillance et d'intervention de secours

- Visite guidée tunnel piétons (Mode Doux)

Plus de la visite :

- Découvrir de près les équipements de ventilation localisés dans le tunnel grâce au notre passage par le tunnel mode doux.
- Rencontre du maitre d'ouvrage
- Voir les différentes plates formes de surveillance

1	003	91954R	S	T	001	001	1	1
---	-----	--------	---	---	-----	-----	---	---