



EUROTUNNEL

ESSAIS DANS LE TUNNEL DU SIMPLON

PARTIE SNCF

Texte

SOFRERAIL - SNCF

Novembre 1988

DIVISION DES ESSAIS EN LIGNE
Section d'essais électriques, thermiques
et aérodynamiques
Tél : 43.46.11.33 - poste 510460

DIVISION DES ETUDES GENERALES ET
DES TECHNIQUES NOUVELLES
Tél : 43.46.11.33 poste 510162

ESSAIS DANS LE TUNNEL DU SIMPLON

PARTIE SNCF

TEXTE

Dossier MR3H1/116/N°1125
DJ/MEP1

MEP1 87-63

PLAN DU RAPPORT

1 - RESUME

2 - OBJECTIFS POURSUIVIS

3 - CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES

3.1 - du tunnel

3.2 - du train

4 - EQUIPEMENT ET PROGRAMME D'ESSAIS

5 - EQUIPEMENT DE MESURE

5.1 - Dans le tunnel

* [5.1.1 - Emplacement des points de mesure

[5.1.2 - Equipement de mesure BR

5.1.3 - Equipement de mesure SNCF

5.1.4 - Appareils divers

5.2 - Sur le train d'essai

5.2.1 - Equipement de mesure sur les locomotives

5.2.2 - Equipement de mesure des pressions sur la rame d'essai

6 - RESULTATS

6.1 - Coefficient de frottement du tunnel

6.1.1 - Méthode stationnaire

6.1.1.1 - Principe du dépouillement

6.1.1.2 - Résultats bruts

6.1.1.3 - Interprétation des résultats

6.1.1.4 - Conclusions

[6.1.2 - Méthode non stationnaire

* [6.1.2.1 - Principe de l'analyse

[6.1.2.2 - Résultats

[6.1.2.3 - Commentaires

* [6.1.3 - Conclusions

6.2 - Coefficient de frottement du train

6.2.1 - Détermination à partir du train

6.2.1.1 - Méthode utilisée

6.2.1.2 - Perte de charge maximum le long du train à 160 km/h

6.2.1.3 - Calcul de Cf_{TR}

6.2.1.4 - Analyse des résultats

6.2.2 - Détermination à partir du tunnel

6.2.2.1 - Principe de l'analyse

6.2.2.2 - Résultats

6.2.2.3 - Commentaires

6.2.3 - Conclusions

[6.3 - Coefficient de perte de charge des rameaux

[

[6.3.1 - Principe de l'analyse

* [

[6.3.2 - Résultats

[

[6.3.3 - Commentaires

[6.4 - Coefficient de perte de charge tête et queue

[

[6.4.1 - Principe de l'analyse

* [

[6.4.2 - Résultats

[

[6.4.3 - Commentaires

[6.5 - Fuites entre galeries avec portes fermées

[

* [

[6.5.1 - Mesure du débit

[

[6.5.2 - Commentaires

6.6 - Coefficient aérodynamique du train

6.6.1 - Mesure de la résistance à l'avancement - Généralités

6.6.2 - Composantes régulières de la résistance à l'avancement

6.6.3 - Composantes accidentelles de la résistance à l'avancement

6.6.3.1 - Influence du profil

6.6.3.2 - Influence des courbes

6.6.3.3 - Influence du vent

6.6.4 - Méthode de mesure utilisée

6.6.4.1 - Principe de la méthode

6.6.4.2 - Réalisation de la mesure

6.6.5 - Résultats

6.6.6 - Analyse des résultats

6.6.7 - Comparaison avec les résultats de la campagne de mai 1987

6.6.8 - Conclusions

6.7 - Variations de pression sur les faces des véhicules

6.7.1 - Effets stationnaires

6.7.2 - Effets dynamiques

6.8 - Effets latéraux dus aux rameaux

* [6.8.1 - Relation entre la position du train et la vitesse de l'air

6.8.2 - Variations de pression sur les faces opposées des véhicules

6.8.3 - Variations selon la hauteur

6.8.4 - Variations selon la distance le long du train

6.9 - Vitesse de l'air dans l'anneau train-tunnel

6.9.1 - Principe de la mesure

6.9.2 - Analyse des phénomènes

6.9.3 - Comparaison sol/mobile

6.9.4 - Résultats comparatifs

6.9.5 - Conclusions

6.10 - Profils de vitesse dans les rameaux et dans le tunnel

6.11 - Mesures diverses

6.11.1 - Variations de pression sur les plates-formes d'accès de la voiture d'essai

6.11.2 - Vitesse d'air dans le train d'essai

6.12 - Sélection de marches pour la simulation

7 - CONCLUSIONS

Nota : les paragraphes notés "*" constituent la part rédigée par les BR et font l'objet d'un envoi séparé.

LISTE DES ANNEXES

- 3.1.0 - Description schématique du tunnel
- 3.1.1 - Section des galeries principales
- 3.1.2 - Exemple de forme de rameau (n^{os} 30 et 67)
- 3.1.3 - Section des rameaux côté Suisse
- 3.1.4 - Section des rameaux côté Italie
- 3.2.1 - Définition des paramètres aérodynamiques des véhicules du train d'essai
- 3.2.2 - Caractéristiques massiques du train d'essai
- 3.2.3 - Diagramme du matériel composant le train d'essai
- 4.1 - Programme d'équipement et d'essai
- 4.2 - Eléments composant le train d'essai
- 4.3 - Calendrier de formation de la rame d'essai
- 4.4 - Caractéristiques des rames d'essai - Tableau récapitulatif
- 5.1.3.1 - Implantation des capteurs dans le tunnel
- 5.1.3.2 - Disposition des capteurs dans le tunnel. Sections A à H
- 5.1.3.3 - Disposition des capteurs dans le tunnel. Sections I à O
- 5.1.3.4 - chaîne de mesure SNCF dans le tunnel
- 5.1.3.5 - Transmission SNCF à modulation de fréquence
- 5.1.3.6 - Caractéristiques du matériel VALIDYNE
- 5.1.4. - Tableau journalier de circulation des trains dans le tunnel
(f0 à f6)

- 5.2.1 - Mesures sur locomotives. Résistance à l'avancement
- 5.2.2.1 - Chaîne de mesure des pressions sur la rame
- 5.2.2.2 - Position des prises de pression statique sur la rame
- 5.2.2.3 - Peignes de tubes de PRANDTL et prises de pression statique sur la voiture d'essai
- 6.1.1.1. - Coefficient de frottement tunnel. Méthode stationnaire :
résultats bruts
(f1 à f10)
- 6.1.1.2 - Coefficient de frottement tunnel. Analyse factorielle des
données brutes
- 6.1.1.3 - Coefficient de frottement tunnel. Analyse factorielle des
données réduites
- 6.1.1.4 - Coefficient de frottement tunnel. Impact des fuites
(f1 à f2)
- 6.2.1.1 - Pression différentielle tête/queue du train - Exemples
d'enregistrement
- 6.2.1.2 - Pression différentielle tête/queue du train. Perte de charge le
long du train
- 6.2.1.3 - Dispersion sur les delta-pression tête/queue
(f1 à f2)
- 6.2.1.4 - Tableau de calcul du coefficient de frottement du train
(f1 et f2)
- 6.6.5.1 - Coefficient aérodynamique en tunnel. Galerie I
(f1 à f8)
- 6.6.5.2 - Coefficient aérodynamique en tunnel. Galerie II
(f1 à f8)
- 6.6.5.3 - Evolution du coefficient aérodynamique en fonction du nombre de
(f1 à f4) véhicules remorqués
- 6.7.1.1 - Pressions sur les parois de la VE 271 -
Enregistrement 34058 du 09/12/87
- 6.7.1.2 - Pressions sur les parois de la VE 271 -
Enregistrement 34057 du 10/12/87
- 6.7.1.3 - Pression sur les parois de la VE 271 -
Tableau récapitulatif pour le 08/12/87

- 6.7.1.4 - Pression sur les parois de la VE 271 -
Tableau récapitulatif pour le 09/12/87
- 6.7.1.5 - Pressions sur les parois de la VE 271 -
Tableau récapitulatif pour le 10/12/87
- 6.7.1.6 - Variations de pression sur les faces - Détails A à H
- 6.7.1.7 - Variations de pression sur les faces - Détails I à P
- 6.7.1.8 - Variations de pression sur les faces - Détails Q à Y
- 6.7.1.9 - Variations de pression sur les faces - Détails ZA à ZH
- 6.8.2.1 - ΔP droite/gauche. Extrémité DOMODOSSOLA - 08/12/87
- 6.8.2.2 - ΔP droite/gauche. Extrémité LAUSANNE - 08/12/87
- 6.8.2.3 - ΔP droite/gauche. VE 271 - 08/12/87
- 6.8.2.4 - ΔP droite/gauche. Extrémité DOMODOSSOLA - 09/12/87
- 6.8.2.5 - ΔP droite/gauche. Extrémité LAUSANNE - 09/12/87
- 6.8.2.6 - ΔP droite/gauche. VE 271 - 09/12/87
- 6.8.2.7 - ΔP droite/gauche. Extrémité DOMODOSSOLA - 10/12/87
- 6.8.2.8 - ΔP droite/gauche. Extrémité LAUSANNE - 10/12/87
- 6.8.2.9 - Extrait d'enregistrement marche 34024 du 08/12/87
- 6.8.4.1 - Evolution ΔP droite/gauche le long du train -
journée du 08/12/87
- 6.8.4.2 - Evolution ΔP droite/gauche le long du train -
journée du 09/12/87
- 6.8.4.3 - Evolution ΔP droite/gauche le long du train -
journée du 10/12/87
- 6.9.1 - Peigne de tubes de PRANDTL - Exemple d'enregistrement.
- 6.9.2 - Vitesse de l'air dans l'anneau train-tunnel - Graphe $C_v = f(d)$
- 6.9.3 - Vitesse de l'air dans l'anneau train-tunnel - Comparaison
sol/mobile
- 6.9.4.a - Vitesse de l'air dans l'anneau train-tunnel -
Peigne supérieur - Composition : 16 et 8 voitures
- 6.9.4.b - Vitesse de l'air dans l'anneau train-tunnel -
Peigne inférieur - Composition : 16 et 8 voitures

- 6.9.4.c - Vitesse de l'air dans l'anneau train-tunnel -
Influence de l'état des rameaux
- 6.9.4.d - Vitesse de l'air dans l'anneau train-tunnel -
Comparaison tunnel I/tunnel II (PARTIE SUISSE)
- 6.9.4.e - Vitesse de l'air dans l'anneau train-tunnel -
Comparaison tunnel I/tunnel II (PARTIE ITALIE)
- 6.11.1 - Mesures diverses sur le train
- 6.11.2 - Différences de pressions sur plates-formes VE - Effets de
l'ouverture d'une porte
- 6.11.3 - Vitesse de l'air dans le train - Résultats

LISTE DES SYMBOLES

- $\alpha_i V^i$ - Composante régulière de la résistance à l'avancement : en daN
- $\beta_i V^i$ - Composante accidentelle de la résistance à l'avancement : en daN
- C - Coefficient de résistance à l'avancement part aérodynamique en daN/(km/h)²
- C_o - Coefficient de résistance à l'avancement part aérodynamique à l'air libre en daN/(km/h)²
- C_x - Coefficient de résistance aérodynamique selon la direction x : sans dimension
- C_v - Coefficient de vitesse (sans dimension)
- Cf_{TU} - Coefficient de frottement tunnel (sans dimension)
- Cf_{TR} - Coefficient de frottement train (sans dimension)
- ΔP - Différence de pression en Pa
- F - Effort de traction en daN
- F_j - Effort aux jantes en daN
- g - accélération due à la pesanteur : en m/s²
- γ - accélération du train : en m/s²
- i - profil en long de la ligne : en mm/m ($i < 0$ pour une rampe et $i > 0$ pour une pente)
- k - Coefficient d'inertie des masses tournantes (sans dimension)
- l - longueur de la zone d'essai : en m

- L_{TU} - Longueur du tunnel : en m
 L_{TR} - Longueur du train : en m
 M - Masse du train : en t
 M' - Masse équivalente du train tenant compte de l'inertie des masses tournantes : en t
 m - Charge par essieu : en t
 PK - Point kilométrique
 P_{TR} - Périmètre du train : en m
 P_{TU} - périmètre du tunnel : en m
 R - Résistance à l'avancement : en daN
 ρ - Masse volumique de l'air : en kg/m³
 S_{TR} - Maître couple du train : en m²
 S_{TU} - Section du tunnel : en m²
 σ - Facteur d'obstruction : sans dimension $\left(\frac{S_{TU} - S_{TR}}{S_{TU}} \right)$
 U - Vitesse de l'air loin devant le train : en m/s
 U_a - vitesse de l'air dans l'anneau train/tunnel par rapport au tunnel : en m/s
 U'_a - Vitesse de l'air dans l'anneau train/tunnel par rapport au train : en m/s
 V - Vitesse du train : en km/h
 VE - Voiture d'essais
 V_{rel} - Vitesse relative de l'écoulement de l'air autour du train en km/h

1 - RESUME

Ce rapport relate les essais réalisés par les BR, CFF et la SNCF dans le tunnel du SIMPLON pour le compte d'EUROTUNNEL.

Il concerne les phénomènes aérodynamiques survenant dans les tunnels à voie unique reliés par des rameaux de pistonnement.

Les résultats obtenus doivent, en ce qui concerne principalement les coefficients de frottement du train et du tunnel, de perte de charge des rameaux, permettre l'extrapolation de ces valeurs au cas du tunnel sous la Manche.

2 - OBJECTIFS POURSUIVIS

The main objective of this work is to establish common SNCF/BRR estimates for various aerodynamic factors relating to a tunnel with some similarities to the Channel Tunnel.

In all cases a high level of precision is not needed as results for the Simplon tunnel can only indicate approximate levels for the different configurations of the Channel Tunnel.

Nevertheless a high level of confidence in the results is needed.

The value of these common SNCF/BRR measurement for the Simplon Tunnel is that they provide a full scale reference for comparison with Channel Tunnel estimates.

Sub objectives follow:

of magnitude

- a - To establish the order ^{of magnitude} of tunnel friction for the Simplon Tunnel. (The need to reconcile earlier SNCF/BRR positions was discussed at the SNCF/BRR meeting of 14 Oct 87).
- b - To establish, the order of train friction for a Corail train in the Simplon tunnel.
- c - To establish the order of loss coefficient for an open (Italian) duct and for a lined (Swiss) duct.
- d - To measure pressures on each side of train passing a duct; and to deduce the order of the lateral force.
- e - To measure pressure loads on wagon walls as trains pass ducts.
- f - To measure pressure loads across internal doors in an otherwise open rake of wagons; and to measure internal velocities in an open rake of wagons.
- g - To relate the velocity in a duct to the exact position of a passing train.
- h - To provide data to allow verification of aerodynamic prediction programmes.

3 - CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES

3.1 - Tunnel

Le tunnel de 19800 m de long est constitué de deux galeries parallèles à simple voie, en alignement sur la plus grande longueur (1), reliées entre elles en leur milieu par une station intermédiaire (annexe 3.1.0). Les valeurs des sections des galeries 1 et 2 font l'objet de l'annexe 3.1.1. Des rameaux de liaison (orientés à 52° par rapport à l'axe longitudinal) de sections et d'espacements variables (annexes 3.1.2 ; 3.1.3 ; 3.1.4) assurent d'autres points de communication entre les deux galeries.

Dans la partie du tunnel située entre BRIGUE et la station centrale (profil : 2 mm/m) des portes coulissantes obturent les rameaux, alors que dans l'autre partie (profil : 7 mm/m) les liaisons entre galeries restent libres. La géométrie d'un de ces rameaux situé au P.K. 14 est reprise à l'annexe 3.1.2.

Les revêtements des galeries sont réalisés :

- d'une part pour la galerie 1 (sens BRIGUE-ISELLE) en pierres naturelles (moëllons)
- d'autre part pour la galerie 2 (sens ISELLE-BRIGUE) en pierres artificielles pour la voûte et en pierres naturelles pour les piedroits.

3.2 - Train

Le train d'essais était composé de deux locomotives électriques Re 4/4 IV remorquant une voiture de mesures et des voitures standard européennes (VSE).

Les caractéristiques géométriques de ces véhicules font l'objet des annexes 3.2.1 ; 3.2.2 ; 3.2.3.

La composition des trains d'essais est reprise dans les annexes 4.2 et 4.3.

(1) Deux courbes de 350 m et 400 m limitent les vitesses d'entrée et de sortie des trains

4 - PROGRAMME D'EQUIPEMENT ET D'ESSAI

Le programme général de déroulement des opérations d'équipement, d'essai, de déséquipement tant à bord de la rame (locomotives et partie remorquée) que dans le tunnel, fait l'objet de l'annexe 4.1 ; les prestations des Chemins de Fer Fédéraux Suisses ne figurent que partiellement (équipe CFF assurant la sécurité).

Dès le début du mois de novembre la préparation des essais a débuté à DERBY et à VITRY pour les équipes d'essai BR et SNCF (rassemblement du matériel, adaptation voire confection de montages spéciaux, étalonnages des capteurs), dans le tunnel et ses abords pour l'équipe CFF (aménagement du rameau n° 30, alimentation en énergie, mise en place d'un bungalow pour le système de télévision).

Du lundi 23 au samedi 28 novembre ont eu lieu simultanément la mise en place des chaînes de mesure BR et SNCF dans le tunnel, l'équipement de la rame d'essai d'abord à VILLENEUVE-ST-GEORGES puis à BRIGUE, la mise en place de la chaîne de mesure totalement autonome sur les deux locomotives Re 4/4 IV (en vue de la mesure de la résistance à l'avancement) du 25 au 28 novembre. Une circulation a eu lieu le vendredi 27 après-midi en vue de régler parfaitement les centrales tachymétriques, de s'assurer que les peignes de tubes de PRANDTL montés sur la voiture 271 ne rencontraient pas d'obstacles dans les zones de mesures préalablement choisies et de vérifier le bon fonctionnement de la chaîne embarquée sur les locomotives.

Les circulations d'essai ont débuté le lundi 30 novembre après-midi et ont eu lieu jusqu'au jeudi 10 décembre. Au cours de cette période, la composition de la rame devait évoluer de 16 à 12 puis 8 véhicules remorqués. La voiture de mesure N° 271 a occupé successivement la tête, le milieu et la queue du train dans chacun des sens de marche et dans chacun des tunnels.

Pour obtenir ce résultat de façon commode, les 15 voitures ont été assemblées en rames bleue, blanche, rouge (de 4 voitures chacune) et jaune (de 3 voitures) ; le service des manoeuvres de la gare de BRIGUE opérait le retrait de l'une de ces rames à la fois et éventuellement le déplacement de la voiture d'essai.

L'annexe 4.2 représente le convoi complet comportant les 4 rames élémentaires, la voiture 271 et les deux locomotives et donne les caractéristiques essentielles de chaque train d'essai, nécessaires notamment pour le calcul de la résistance à l'avancement.

Le programme donnant la composition de la rame et les modifications de cette composition au fur et à mesure du déroulement des essais fait l'objet de l'annexe 4.3.

Le tableau de l'annexe 4.4 donne des renseignements complémentaires nécessaires pour les calculs d'aérodynamique.

Dès la fin de la dernière marche d'essai du 10 décembre, la chaîne de mesure équipant les locomotives a été démontée afin de rendre celles-ci à leur service normal. Le démontage de la chaîne de mesure de la rame d'essai a été effectué le 11 décembre, avant le départ de BRIGUE et durant la marche de retour vers VILLENEUVE-ST-GEORGES.

Le déséquipement du laboratoire (BR) et du tunnel (BR et SNCF) a débuté le lundi 14 et s'est achevé le mercredi 16.

5 - EQUIPEMENT DE MESURE

5.1 - Dans le tunnel

5.1.1 - Réserve BR.

5.1.2 - Réserve BR.

5.1.3 - Equipement de mesure SNCF

Les signaux dont la SNCF assurait la saisie et la transmission servaient à compléter le système maillé constitué autour des rameaux Nos 24, 27 et 30.

Il s'agissait (voir annexes 5.1.3.1, 5.1.3.2 et 5.1.3.3) :

- de pressions statiques dans les tunnels I et II au droit du rameau n° 24 (voies Nos 25 section B ; 26, 27, 28 et 29 section K),
- de pressions statiques dans les tunnels I et II au droit du rameau n° 30 (voies Nos 30, 31, 32, 33, 34 sections E, M et N selon le jour),
- de signaux logiques issus de barrières lumineuses au moment du passage des trains dans les tunnels I et II au droit du rameau N° 30 (voies N°s 20, 21, 22 et 23) ; l'espacement des deux barrières dans un même tunnel est de 20 m et permet le calcul de la vitesse des trains,
- de vitesses d'air mesurées à l'aide d'anémomètres à rafale prêtés par les BR (voies Nos 35, 36, 37 sections C,I,L).

Les signaux de mesure provenant du voisinage du rameau N° 30 étaient conditionnés à proximité du point de mesure et transmis sous forme analogique par câbles à 1 ou 2 paires torsadées blindées.

Les signaux de mesure provenant du voisinage des rameaux N°s 24 et 27 étaient conditionnés à proximité du point de mesure mais transmis, dans le but de s'affranchir d'une induction à 16 2/3 Hz gênante provenant de la caténaire, par un système à modulation de fréquence respectant les normes IRIG. Les câbles utilisés pour cette transmission, étaient de type téléphonique à 7 paires blindées séparément, l'ensemble sous écran, avec interposition de transformateurs d'isolement à chaque extrémité du câble et sur chaque paire.

L'annexe 5.1.3.1 donne la localisation des points de mesure dans le tunnel.
L'annexe 5.1.3.4 représente schématiquement la chaîne de mesure SNCF et
l'annexe 5.1.3.5 le diagramme fonctionnel d'une voie de transmission à modulation de fréquence.

Toutes les prises de pression statique utilisées par la SNCF étaient du type hémisphérique et chacune reliée à un capteur de pression différentiel ± 2500 Pa pleine échelle. La référence des ces capteurs était constituée par une canalisation reliant les différents points de mesure et aboutissant à un réservoir de référence que l'on fermait à un moment où l'ambiance était calme dans le tunnel au voisinage de la niche N° 6.

Tous les signaux de mesure SNCF aboutissaient à l'enregistreur magnétique à 42 voies analogiques des BR et 8 d'entre eux étaient visualisés sur enregistreur papier.

L'annexe 5.1.3.6 donne les caractéristiques métrologiques des capteurs de pression différentielle VALIDYNE type DP7 utilisés dans le tunnel et sur le train d'essai.

5.1.4 - Appareils divers

En dehors du tunnel, à proximité immédiate du portail NORD (côté BRIGUE) avaient été mises en place les installations suivantes :

- une station météorologique moyennant, pour chaque demi-heure, sur une période de 6 minutes les paramètres suivants : température sous abri, degré d'humidité relative, pression atmosphérique, vent passé, direction dominante du vent, classe du vent,
- une chaîne vidéo comportant un horodateur avec enregistrement sur magnétoSCOPE déclenché par l'approche des trains entrant dans le tunnel ou en sortant de façon à pouvoir établir a posteriori l'historique de la circulation des trains dans le tunnel et leur composition ; l'ensemble de ce matériel, sauf la caméra et les détecteurs d'approche, était installé dans un bungalow mis en place par les CFF. Le tableau récapitulatif élaboré à partir de ces enregistrements figure en annexe 5.1.4 (f0 à f7).

5.2 - Sur le train d'essai

5.2.1 - Equipement de mesure sur les locomotives (annexe 5.2.1)

Cette chaîne, absolument autonome, a servi à déterminer la résistance à l'avancement des diverses compositions dans les deux tunnels et pour chaque partie SUISSE et ITALIENNE.

La méthode est basée sur la mesure de la puissance électrique absorbée par les moteurs de traction. Durant tous les essais, tous les trains d'essais ont été remorqués par les BB Re 4/4 IV couplées en UM Nos 10102 (côté ITALIE) et 10103 (côté SUISSE). Sur chacune de ces locomotives ont été mesurées la tension et l'intensité des moteurs 2 et 3. En cas de cabrage, l'un était déchargé et l'autre pas. Les signaux conditionnés et filtrés étaient ensuite dirigés d'une part à travers un multiplexeur vers un enregistreur magnétique à 4 voies directes type STELLAVOX pour sauvegarde, d'autre part vers un système d'acquisition comportant un multiplexeur/convertisseur DMS couplé à un calculateur HP 85 lui-même relié à une imprimante.

La chaîne de mesure était complétée par une centrale tachymétrique élaborant, à partir des tops "espace" disponibles sur un point test de la locomotive, les informations espace et vitesse. Celles-ci étaient transmises soit sous forme série soit sous forme analogique vers l'enregistreur STELLAVOX et la chaîne d'acquisition dont le fonctionnement était déclenché chaque centaine de mètres dans les zones suivantes, choisies de façon à pouvoir y maintenir constante la vitesse la plus élevée :

	ZONE 1		ZONE 2
GALERIE I	PK de LAUSANNE	PK 152 au PK 154,5	PK 162 au PK 164,5
	PK TUNNEL	PK 4,8 au PK 7,3	PK 14,8 au PK 17,3
GALERIE II	PK de LAUSANNE	PK 161,5 au PK 158	PK 154,5 au PK 152
	PK TUNNEL	PK 14,3 au PK 10,8	PK 7,3 au PK 4,8

L'appareillage de mesure de chacune des locomotives était alimenté sous 220 V par un convertisseur statique branché sur la batterie 36 V. Les signaux de mesure de la 10103 étaient transmis au poste établi sur la 10102 par 4 câbles coaxiaux.

Lors du découplage des locomotives et de la rame, aucune liaison spéciale ne subsistait.

*

* *

5.2.2 - Equipement de mesure des pressions sur la rame d'essai

Cette chaîne de mesure dont l'annexe 5.2.2.1 donne schématiquement la composition comportait des capteurs différentiels VALIDYNE tous étalonnés à raison de ± 5 V pour ± 2500 Pa et permettait les mesures suivantes :

- mesure des pressions statiques à chaque extrémité de la rame et en un certain nombre de points de la voiture d'essai N° 271 :

Les repères utilisés pour caractériser la position de ces points sont les suivants : extrémité DOMODOSSOLA extrémité LAUSANNE, côté GARE côté RHONE. Toutes les pressions statiques étaient référencées à un réservoir situé à bord de la VE fermé avant chaque départ puis ouvert à l'arrivée (1). Ces signaux, conditionnés par matériel VALIDYNE type CD 15 individuel, étaient dirigés vers l'enregistreur magnétique et l'enregistreur graphique. L'annexe 5.2.2.2 précise l'emplacement des prises de pressions statiques sur la rame (certains renseignements, notamment l'entraxe des prises sur la rame, sont donnés par le tableau de l'annexe 4.4),

- mesure des pressions différentielles issues de deux peignes à tubes de PRANDTL :

Deux peignes comportant l'un 8 tubes de PRANDTL (peigne supérieur) et l'autre 7 (peigne inférieur) ont été utilisés. Mus par vérins double effet à air comprimé, ils étaient placés en position de mesure seulement dans les zones définies au paragraphe 5.2.1, engageant ainsi nettement le gabarit UIC. Un sondage préalable à très faible vitesse avait permis de s'assurer qu'aucun obstacle n'existait dans ces zones (c'est après ce sondage que la décision de supprimer le 8ème tube de PRANDTL du peigne inférieur a été prise). Les peignes sont demeurés durant tous les essais face RHONE de la voiture d'essai. Cette décision était confortée par le fait que la voie est parfaitement centrée dans les deux tunnels. L'annexe 5.2.2.3 permet de situer les peignes par rapport à la voiture de mesure et au tunnel. Enfin, l'annexe 4.4 permet de situer les peignes par rapport à la tête du train, en fonction de la composition de celui-ci.

(1) Nota : Les prises de pressions statiques milieu de la VE RHONE et GARE ont été référencées à l'intérieur de la VE à partir de la marche n°34027 du 8/12/87.

Ces peignes pouvaient rapidement être orientés vers l'avant du train et les explorations étaient possibles dans les deux sens de marche.

Chaque tube de PRANDTL était relié à un capteur différentiel VALIDYNE dont le signal, conditionné par l'une des 10 voies d'un coffret type CD10, était filtré à 1 Hz avant d'être multiplexé pour enregistrement de sauvegarde sur une voie directe de l'enregistreur magnétique. Par ailleurs, les 8 (ou 7) voies d'un même peigne ont été saisies sur enregistreur numérique KONTRON. L'emplacement exact des peignes est précisé sur l'annexe 5.2.2.3 et le tableau de l'annexe 4.4 permet de déterminer, pour chaque composition, la distance séparant les peignes de la tête du train.

- mesures diverses à l'aide de l'enregistreur KONTRON :

Les paramètres suivants ont également fait l'objet d'enregistrements ;

- pression atmosphérique dans la VE 271,
- pression dans la voiture par rapport au réservoir de référence fermé avant le départ,
- pression face VE RHONE par rapport à la référence,
- pressions différentielles tête queue de la rame,
- pressions différentielles de part et d'autre des plate-formes de la VE 271,
- vitesse de l'air dans la rame dans diverses conditions.

6 - RESULTATS

6.1 - Coefficient de frottement du tunnel

6.1.1 - Méthode stationnaire

6.1.1.1 - Principe du dépouillement

Etant donné que dans la partie suisse du tunnel les rameaux de pistonement sont normalement fermés, il était prévu de mesurer dans celle-ci la vitesse de l'air (suffisamment loin de la paroi pour que cette mesure puisse constituer une évaluation acceptable de la vitesse de l'air) et la variation de pression entre deux sections du tunnel distantes l'une de l'autre d'un kilomètre. Les rameaux fermés étaient supposés suffisamment étanches pour ne pas perturber la mesure du coefficient de frottement tunnel obtenu à partir du ΔP et de la vitesse U .

A cet effet, on a donc implanté :

- dans le tunnel 1, deux prises de pression statique aux PK 5 et 6, ainsi qu'un anémomètre à moulinet près du PK 5 ;
- dans le tunnel 2, quatre jeux de prises de pression statique aux mêmes PK, respectivement en haut (+ 3 m au-dessus du rail) et en bas, côté rameaux et côté opposé, ainsi qu'un anémomètre à moulinet.

Les prises de pression se trouvaient donc espacées de 1000 m environ, et étaient en retrait de 20 m par rapport aux rameaux les plus proches ; entre ces prises se trouvaient par conséquent un rameau de communication fermé par des portes mobiles, ainsi que deux rameaux obturés définitivement par des murs de maçonnerie.

Le dépouillement est effectué en sélectionnant un certain nombre de passages de trains - qu'il s'agisse de trains d'essai ou de trains commerciaux - et en comparant la vitesse de l'air entre les PK 5 et 6 à la différence de pression entre ces deux points :

- soit immédiatement avant l'entrée du train dans cette zone de mesure,
- soit immédiatement après sa sortie de la zone.

Le coefficient de frottement recherché résulte de l'application de la relation :

$$Cf_{TU} = \frac{2 \Delta p S_{TU}}{\rho U^2 P_{TU} l}$$

6.1.1.2 - Résultats bruts

Les résultats obtenus sont présentés sur l'annexe 6.1.1.1 (f0 à f10) et témoignent d'une très grande dispersion. Cette dispersion, ainsi que la valeur extrêmement faible du Cf_{TU} généralement obtenu, sont a priori attribuables aux rameaux situés entre les deux points de mesure. En effet, on a constaté qu'en dépit de leur fermeture, les rameaux laissent passer un débit non négligeable : on a ainsi pu relever dans le rameau intermédiaire, portes fermées, des vitesses d'air atteignant 4 m/s en certains points de la section (1). Les rameaux maçonnés sont eux-mêmes loin d'être étanches. Une quantité d'air évidemment non mesurable les traverse lors du passage des trains.

Une première conséquence de cette dérivation d'une partie du débit par les rameaux "fermés" est que l'on mesure, non pas une chute de pression et un débit dans une section de tunnel, mais dans une portion de réseau maillé, ce qui peut modifier la valeur apparente du coefficient de frottement.

Afin de tenter de clarifier cet aspect des résultats, ceux-ci ont été subdivisés en catégories :

- tunnel 1 ou tunnel 2 ;
- devant ou derrière le train.

En outre, pour le tunnel 2, plus complètement équipé, on est amené à distinguer les mesures données par les capteurs de pression situés en partie haute du tunnel de celles fournies par les capteurs bas lorsqu'elles diffèrent notablement.

Par ailleurs, les valeurs moyennes de 24 m² pour la section et 18 m pour le périmètre ont été retenues comme base de dépouillement.

Notons enfin que, si la plupart des mesures ont eu lieu sur une base de 1000 m, certaines mesures dans le tunnel 1 ont été effectuées sur une base réduite à 620 m, l'objectif recherché étant d'éliminer l'influence éventuelle du rameau intermédiaire obturé par des portes, dont les fuites étaient supposées non négligeables.

6.1.1.3 - Interprétation des résultats

On observe une dispersion très importante des résultats, avec des valeurs minimales très faibles alors que les maxima relevés sont de l'ordre de $24 \cdot 10^{-3}$

Une manière de traiter le problème consiste à effectuer un traitement statistique des données.

-
- (1) Les vitesses les plus élevées sont relevées à proximité de l'une des parois, alors qu'au centre du rameau (où était placé l'anémomètre des BR) elles sont presque nulles. Il est de ce fait difficile d'estimer la valeur du débit, qui pourrait cependant avoir atteint quelques (2 à 5 ?) m³/s.

En premier lieu, une analyse factorielle des correspondances a été réalisée en considérant les variables suivantes :

- coefficient de frottement, réparti en sept classes sensiblement équilibrées ;
- vitesses de l'air, également réparties en sept classes équilibrées ;
- numéro du tunnel et caractère de l'écoulement (causé par un train dans le même tunnel, ou induit par un train dans le tunnel opposé) ;
- écoulement mesuré avant ou après le train ;
- écoulement mesuré en haut ou en bas du tunnel.

L'annexe 6.1.1.2 présente les données relatives à cette classification, et les diagrammes d'analyse factorielle.

L'interprétation des diagrammes est la suivante :

- les coefficients de frottement très élevés ne sont rencontrés que dans deux cas :
 - * pour des vitesses d'air très faibles,
 - * dans l'écoulement induit dans le tunnel 2 par le tunnel 1 ;
- les coefficients de frottement très faibles ne sont relevés que dans le cas de mesures effectuées derrière le train, dans le tunnel 2, et en position basse ;
- il existe une tendance du coefficient de frottement à être plus fort devant le train que derrière, mais ceci peut résulter en partie de l'effet mentionné ci-dessus ;
- enfin le coefficient de frottement et la vitesse de l'air n'apparaissent pas comme rigoureusement indépendants, mais manifestent une tendance à varier en sens inverse l'un de l'autre.

Une analyse de la variance, effectuée en comparant le cas des mesures en position basse à celui des mesures en position haute, ou des mesures identiques en positions haute et basse, confirme que les mesures réalisées derrière le train, en position basse dans le tunnel 2, diffèrent significativement du reste des mesures : les mesures en position basse présentent une probabilité supérieure à 99 % d'être distinctes des autres mesures.

Il en est de même dans le cas des écoulements induits dans le tunnel 2 par un train circulant dans le tunnel 1 : les mesures sur écoulement induit présentent une probabilité supérieure à 99 % d'être différentes des autres mesures. Il apparaît donc nécessaire d'exclure des données exploitables :

- les mesures effectuées en position basse derrière le train dans le tunnel 2, à chaque fois qu'elles diffèrent de la mesure en position haute ;
- les mesures d'écoulements induits.

Ces résultats expérimentaux ont été comparés à ceux obtenus par une simulation réalisée sur un réseau défini comme suit (voir annexe 6.1.1.4 f1 et f2) :

- deux tunnels côté suisse entre les PK 0 et 5,
- un tunnel équivalent au côté italien,
- des rameaux de pistonement de section de fuite de $0,1 \text{ m}^2$ espacés de 200 m entre le PK 5 et 6

On retrouve par cette simulation :

- un écart faible entre les Cf_{TU} estimés à partir d'une mesure de vitesse de l'air au point A selon qu'elle est effectuée avant ou après le passage du train ; l'écart est de même signe que celui constaté en pratique (sous-évaluation avant le train, sur-évaluation après) ;
- quant aux écoulements induits dans le second tunnel, il apparaît que l'erreur commise sur l'estimation du Cf_{TU} est plus importante que pour les écoulements devant ou derrière un train.

Par ailleurs, il est clair que l'on doit attribuer les écarts significatifs entre capteurs hauts et bas dans le tunnel 2 à des survitesses locales, dues à des écoulements de fuite provenant des rameaux, et qui affectent les capteurs de pression situés à environ 20 m de ces derniers et à leur hauteur ; en cas de discordance, seule la valeur fournie par les capteurs hauts est exacte.

Une reprise de l'analyse factorielle, effectuée sur ce jeu de données réduit, a été effectuée. Seul le diagramme factoriel relatif aux axes factoriels 1 et 2 (annexe 6.1.1.3) (respectivement 12 et 11 % de l'inertie) s'avère interprétable : il y apparaît essentiellement la proximité entre les vitesses les plus faibles (U_1) et les Cf_{TU} les plus élevés (Cf_7), qui se détachent nettement du reste des données ; le fait que ces conditions de vitesse faible soient les plus susceptibles d'entraîner une erreur de mesure incite à supprimer les points correspondant à une vitesse faible ($U < 6.7 \text{ m/s}$) de l'analyse.

On note par ailleurs que le coefficient de frottement a tendance à être :

- plus élevé dans le tunnel 2 que dans le tunnel 1,
- plus élevé derrière le train que devant.

Toutefois, l'analyse de la variance portant sur ces deux critères montre que cette tendance est peu significative : la probabilité pour que les mesures du tunnel 2 diffèrent de celles du tunnel 1 est inférieure à 15 % , la probabilité pour que la différence avant/après soit non significative est de 94 % : il n'y a donc pas lieu d'en tenir compte.

6.1.1.4 - Conclusions

Après élimination des mesures pour lesquelles une source d'erreur apparaissait comme probable, il subsiste 127 mesures exploitables, sur la base desquelles on parvient à une valeur de coefficient de frottement moyen de $7.2.10^{-3}$;

La variance des mesures étant cependant assez élevée, il faut considérer ce résultat avec une marge de confiance relativement large, et l'on peut seulement affirmer que le coefficient de frottement est compris dans l'intervalle de confiance à 80 % $(5.5 - 8.9).10^{-3}$.

6.1.2 - Méthode non stationnaire

RESERVE BR

6.2 - Coefficient de frottement du train

Il peut être déterminé à partir de la pression différentielle tête/queue du train et cette pression peut être déterminée soit à bord du train, soit en tunnel lorsque le train est situé entre deux prises de pression statique suffisamment éloignées (distance entre les prises légèrement supérieure ou égale à la longueur du train).

6.2.1 - Détermination à partir du train

6.2.1.1 - Méthode utilisée

On considère que l'écoulement de l'air autour du train est laminaire et que les prises de pressions statiques situées sur les faces de la rame d'essais sont suffisamment éloignées des extrémités pour s'affranchir des effets de tête et de culot.

La chute de pression le long du train, sous ces hypothèses, a pour expression :

$$\Delta P_1 = \frac{1}{2} \rho \frac{C_{f_{TR}} L_{TR} P_{TR}}{(S_{TU} - S_{TR})} U_a^2$$

La chute de pression le long du tunnel est donnée par :

$$\Delta P_2 = \frac{1}{2} \rho \frac{C_{f_{TU}} L_{TU} P_{TU}}{(S_{TU} - S_{TR})} U_a^2$$

On en déduit :

$$C_{f_{TR}} = \left[\frac{2 (S_{TU} - S_{TR}) \Delta P}{\rho} - C_{f_{TU}} L_{TU} P_{TU} U_a^2 \right] \times \frac{1}{L_{TR} P_{TR} U_a^2} \quad \text{avec } \Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

U' la vitesse dans l'anneau train/tunnel par rapport au train est déterminée de manière théorique. L'écoulement dans l'anneau train/tunnel est pleinement tridimensionnel et turbulent. Aussi les valeurs relevées avec les divers anémomètres ne peuvent être utilisées que :

- soit avant le passage du train,
- soit après le passage du train.

Nous avons retenu la première solution, qui s'avère mieux convenir (cf § 6.1.1.3).

L'équation de conservation au débit permet de déterminer U'_a

$$U'_a (S_{TU} - S_{TR}) = S_{TU} (V - U)$$

$$U'_a = \frac{S_{TU}}{S_{TU} - S_{TR}} (V - U) = \frac{V - U}{\sigma}$$

Dans le cas des essais de décembre 1987 dans le tunnel du SIMPLON, on obtient, en négligeant la chute de pression le long du tunnel, entre les PK 5 et 6 galeries 1 et 2 :

$$Cf_{TR} = 2,32 \cdot \frac{\rho}{U'^2_a} \cdot \frac{\Delta p_1}{L_{TR}}$$

où :

$\frac{\Delta p_1}{L_{TR}}$ représente la perte de charge unitaire le long du train.

Cette façon de procéder minore de 10 % la valeur réelle de Cf_{TR} . Elle est acceptable en égard à la dispersion observée sur Cf_{TU} .

6.2.1.2 - Perte de charge maximale le long du train à 160 km/h

Nous utilisons les enregistrements réalisés à l'aide de l'enregistreur KONTRON dont l'annexe 6.2.1.1 donne quatre exemples réalisés à bord de la même rame de 16 voitures (longueur totale 452,7 m, entraxe des prises de pression statique 400,9 m) dans le tunnel I (à gauche) et le tunnel II (à droite), rameaux fermés (en haut) ou ouverts (en bas) dans la partie suisse.

Afin d'établir une comparaison valable sur la base d'une vitesse identique (choisie = 160 km/h) les valeurs maximales brutes relevées pour des vitesses variables sur les enregistrements tels que ceux de l'annexe 6.2.1.1 ont été corrigées de la façon suivante :

$$\text{DELTA P (160)} = \text{DELTA P} \left[\frac{160}{v} \right]^2$$

où : - v est la vitesse stabilisée maximale au cours de l'essai.

- DELTA P est la pression différentielle moyenne relevée à cette vitesse.

A partir de ces données rapportées à la vitesse de 160 km/h, un moyennage des delta P a été effectué pour les cas semblables (avec calcul de l'écart-type) et l'on a divisé cette valeur moyenne par l'entraxe des prises de pression statique ; on obtient ainsi une valeur de la perte de charge le long du train par unité de longueur ($\Delta P/m$). Ces valeurs obtenues parfois dans des conditions identiques (hors l'entraxe PS) peuvent être moyennées à leur tour. Les valeurs montrant une faible dispersion ont été entourées dans le tableau récapitulatif de l'annexe 6.2.1.2.

6.2.1.3 - Calcul de Cf_{TR}

Ce traitement a été effectué pour les journées des 3, 4, 7 et 8 décembre alors que les portes des rameaux étaient fermées. La différence des pressions statiques aux extrémités du train a été relevée lorsque celui-ci circulait au voisinage du PK 6 du tunnel dans les galeries 1 et 2, car il est possible d'y connaître la valeur de la vitesse de l'air devant le train. Les graphes de l'annexe 6.2.1.3 (f1 et 2) représentent l'évolution de delta P dans chacun des deux tunnels pour des compositions de 8, 12 et 16 voitures et permet de se rendre compte que dans la zone du PK 6, delta P est linéaire en fonction de la longueur du train lorsque les rameaux sont fermés, avec une faible dispersion des valeurs.

Les tableaux des annexes 6.2.1.4 folios 1 et 2 récapitulent les valeurs des coefficients de frottement du train obtenus dans les deux tunnels par application des formules du paragraphe 6.2.1.1.

6.2.1.4 - Analyse des résultats

Les valeurs portées dans le tableau des annexes 6.2.1.4 f1 à 2 présentent peu de dispersion. Elles ne permettent pas de mettre en évidence l'influence de la longueur du train, c'est pourquoi nous avons déterminé la valeur du Cf_{TR} en faisant la moyenne de toutes les mesures dépouillées. L'écart type est de 8,5 % de la valeur moyenne $Cf_{TR} = 6,3 \cdot 10^{-3}$.

Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle obtenue à l'air libre pour le même matériel ($Cf_{TR} = 6 \cdot 10^{-3}$). On peut donc considérer dans ce cas que les valeurs obtenues, aux erreurs de mesure près, dans le tunnel du SIMPLON et à l'air libre sont identiques.

Enfin, on peut considérer que sur les 34 valeurs disponibles, la valeur du Cf_{TR} est comprise entre $6,2 \cdot 10^{-3}$ et $6,45 \cdot 10^{-3}$ avec un niveau de confiance de 0,9, soit une valeur moyenne de $6,3 \cdot 10^{-3}$ qui, majorée de 10 % donne 0,0069.

6.2.2 - Détermination à partir du tunnel

RESERVE BR

6.2.3 - Conclusion

Le Cf_{TR} a été obtenu par deux méthodes. La première utilise la variation de pression générée par le train à son passage en un point du tunnel. Ceci fournit un coefficient de frottement de 0.0082. La 2ème méthode utilise la chute de pression mesurée entre deux points sur le train. Il en résulte un coefficient de frottement de 0.0069.

Une moyenne arithmétique des résultats conduirait à un coefficient frottement pour le train de l'ordre de 0.0076.

6.3 - Coefficient de perte de charge des rameaux

RESERVE B.R.

6.4 - Coefficient de perte de charge tête et queue

RESERVE B.R.

6.5 - Fuite entre galeries avec portes fermées

RESERVE B.R.

6.6 - Coefficient aérodynamique du train

6.6.1 - Mesure de la résistance à l'avancement - Généralités

L'application du principe fondamental de la dynamique peut se ramener dans le cas d'un train à l'équation :

$$\delta M' = F + \sum (\alpha_i + \beta_i) v^i$$

6.6.2 - Composantes régulières de la résistance à l'avancement

Si l'on écrit la relation ci-dessus sous la forme

$$R = A + BV + CV^2 \text{ où}$$

A : caractérise le mouvement de roulement commençant. D'après l'expérience acquise par la SNCF, en ce domaine, ce terme peut s'exprimer par une relation de la forme :

$$A = \lambda M (10/m)^{\frac{1}{2}} \text{ en daN}$$

λ est un terme variant selon les véhicules considérés entre 1.9 et 0.8

BV : ce terme représente essentiellement les efforts de frottement des boudins sur les faces latérales des champignons du rail. Il est proportionnel à la masse des véhicules.

Les résultats des essais effectués par la SNCF montrent que l'on peut retenir, pour la plupart des matériels, l'expression ci-après :

$$B = 0,01 M \text{ en daN/(km/h)}$$

CV² : caractérise la résistance aérodynamique qui est pour l'essentiel proportionnelle au carré de la vitesse du train ou plus exactement au carré de la vitesse de l'écoulement de l'air autour du train.

D'une manière générale cette résistance peut être décomposée en :

- traînée de pression qui s'exerce sur l'avant et l'arrière du train et qui dépend étroitement de la forme géométrique des mobiles,
- traînée de frottement qui s'exerce sur les faces latérales et dépend de la rugosité de celles-ci.

$$C = \frac{1}{2} \rho S_{TR} C_x$$

ce qui donne pour les conditions météo standard SNCF (15°C, 1013 hPa) :

$$C = 0,00473 S_{TR} C_x \text{ en daN/(km/h)}^2$$

6.6.3 - Composantes accidentelles de la résistance à l'avancement

6.6.3.1 - Influence du profil

Les variations de profil en domaine ferroviaire sont très faibles (quelques mm/m) ce qui permet d'exprimer la valeur de l'effort retardateur (ou accélérateur) par l'expression $Mgi/10$ en daN.

6.6.3.2 - Influence des courbes

La résistance en courbe provient de deux causes principales :

le frottement des boudins des roues sur les faces latérales des champignons du rail et, surtout, le glissement des roues sur le rail puisque les essieux d'un bogie ou d'un wagon sont astreints à rester parallèles.

On assimile, à la SNCF, cette résistance à une variation de profil exprimée par la relation k/Rc .

k : coefficient dépendant de l'écartement des rails

Rc : rayon de la courbe en mètres.

En voie normale $k = 800$

6.6.3.3 - Influence du vent

La présence de vent, lors d'une circulation, modifie l'écoulement autour du train. En effet la vitesse de l'écoulement est la résultante de la composition de la vitesse du vent et du train. L'angle α formé par la direction de la vitesse relative et l'axe du train est appelé "angle de dérapage".

Dans ces conditions le train subit un effort aérodynamique.

$$Raéro = C_x V_{rel}^2 = 0.5 \rho p S_{TR} C_x V_{rel}^2 = 0.5 \rho S_{TR} C_x V_{rel}^2$$

6.6.4 - Méthode de mesure utilisée

Trois méthodes directes permettent de déterminer la résistance à l'avancement :

- à partir de la mesure des efforts instantanés,
- à partir de la mesure de l'énergie,
- en effectuant une marche sur l'erre.

Nous avons retenu pour cette campagne d'essais la méthode utilisant la mesure de l'énergie. Celle-ci s'avère plus précise dès lors que la vitesse varie très peu sur la zone d'essai ; en effet la détermination de l'accélération instantanée eu égard aux réactions du train est très délicate. L'élimination de la méthode de la marche sur l'erre tient au fait que les zones d'essais sont courtes et que les corrections de profil mettent en jeu des variations du même ordre que celles de la résistance à l'avancement.

6.6.4.1 - Principe de la méthode

L'équilibre des énergies mises en jeu dans le cas d'un train dont la locomotive fournit un effort F_j sur un espace e est régi par :

$$\int F_j \, dl = R \, l + 0,981 \, M \, \Delta h + 784,8 \, M \, \sum (\Delta e / R_c) + 3,86 \, M' \, (V_2^2 - V_1^2)$$

Δe : longueur en mètres de chaque courbe

R_c : rayon de la courbe en mètres

Δh : variation d'altitude en mètres sur l'ensemble du parcours

V_2 : vitesse en km/h en fin de zone

V_1 : vitesse en km/h en début de zone

6.6.4.2 - Réalisation de la mesure

A partir de l'enregistrement en continu de l'intensité absorbée par les moteurs et de la tension aux bornes de ceux-ci, il est possible de connaître l'effort aux jantes et d'en déduire l'énergie consommée.

Au cours de ces essais, seule la moitié des moteurs des deux locomotives RE 4-4 IV a été équipée pour les mesures.

6.6.5 - Résultats

Seules les marches présentant peu de variation de vitesse et d'intensité ont été prises en considération lors du dépouillement.

Les valeurs du C en tunnel pour chaque composition de la rame ainsi que les conditions de circulation (croisement, circulation en batterie ...) figurent dans les annexes 6.6.5.1 (f1 à 8) et 6.6.5.2 (f1 à 8).

Ces valeurs sont des valeurs brutes (pas de correction sur la pression et la température). Ceci explique en partie les dispersions dans les résultats à configuration équivalente (les conditions climatiques fluctuantes au cours de la journée pouvant faire varier la masse volumique de l'air de 10 %).

Les graphes donnant l'évolution du C en fonction du nombre de véhicules remorqués pour chaque partie du tunnel figurent à l'annexe 6.6.5.3 (fl à f4). Nous nous sommes attachés à mettre en évidence l'influence :

- des conditions de circulation (isolée, croisements, train suiveur ...),
- des rameaux de pistonnement dans la partie Suisse (ouverture ou fermeture des portes).

6.6.6 - Analyse des résultats

Dans un premier temps, nous avons considéré le rapport C/Co, pour les diverses sections de mesure et pour les diverses compositions du train d'essais. Les valeurs extrêmes, obtenues sans se référer aux conditions de circulation, sont reprises dans le tableau ci-après :

TABLEAU DONNANT LES VALEURS DE C TUNNEL/Co

COMPOSITION	Partie suisse				Partie Italienne			
	galerie 1		galerie 2		galerie 1		galerie 2	
	rameaux suisses		rameaux suisses		rameaux suisses		rameaux suisses	
	ouverts	fermés	ouverts	fermés	ouverts	fermés	ouverts	fermés
16 VOITURES (Co = 0,186)	2,35 à 2,80	2,50 à 2,98	2,2 à 2,61	2,40 à 3,26	1,70 à 1,90	1,54 à 2,00	1,90 à 2,26	1,90 à 2,10
12 VOITURES (Co = 0,151)	2,47 à 2,61	2,70 à 3,22	2,44 à 2,65	2,60 à 3,35	1,76 à 1,98	1,53 à 2,20	2,20 à 2,34	2,20 à 2,90
8 VOITURES (Co = 0,115)		3,20 à 3,29		2,40 à 3,30		2,20 à 2,86		2,20 à 3,00

La lecture de ce tableau révèle une différence notable entre la partie italienne et la partie suisse. Cette différence ne trouve d'explication que dans le fait que les dispositions constructives retenues pour occulter les rameaux créent un diaphragme et que ce dernier augmente fortement les pertes de charge des rameaux. Ce fait est confirmé par l'examen des valeurs portées dans les quatre premières colonnes du tableau ci-dessus. En effet les gains sur le Cx réalisés par l'ouverture des portes des rameaux restent très faibles. L'existence de fuites entre les galeries minimise également ces gains.

On constate également l'effet bénéfique apporté par la présence de la communication entre les galeries à la station centrale. Les valeurs de la résistance aérodynamique pour les dernières parties du trajet sont légèrement plus faibles que celles obtenues durant la première partie du trajet.

L'influence de la longueur des rames n'est pas très marquante (en ce qui concerne les compositions à 12 et 16 voitures) si l'on tient compte de la précision des mesures, il semble, toutefois, que les valeurs obtenues dans la galerie 1, pour la rame à 8 véhicules, soient notablement plus élevées lorsque les portes des rameaux sont fermées.

Le petit nombre de marches isolées exploitables ne nous a pas permis d'établir un tableau similaire à celui ci-dessus.

Enfin on pourra noter que les résultats obtenus dans la galerie 1 côté Italie dépendent légèrement de la situation des portes des rameaux situés dans la partie suisse (ouvertes ou fermées).

6.6.7 - Comparaison avec les résultats de la campagne d'essais de mai 1987

Il convient de rappeler, qu'au cours de la campagne d'essais de mai 1987 les méthodes utilisées pour la détermination de la résistance à l'avancement étaient :

- mesure de l'effort au crochet,
- marche sur l'erre.

Ces deux méthodes donnaient respectivement la valeur de la trainée de la partie remorquée, la valeur de la résistance aérodynamique de la rame complète pour la partie du tunnel dont les rameaux sont fermés. La longueur de la rame était de 294 mètres.

Pour effectuer une comparaison avec les valeurs de la dernière campagne, nous avons considéré que les forces de pression agissant sur le nez et le culot de la rame étaient les mêmes quelle que soit la longueur du train (16 ou 12 voitures). Le coefficient aérodynamique correspondant est 0.147.

Nous avons fait également l'hypothèse que la trainée de frottement variait linéairement avec la longueur. Dans ces conditions, le coefficient aérodynamique ramené au mètre linéaire a pour valeur :

- pour la campagne de mai 1987 : 0.00083
- pour la campagne de décembre 1987 : 0.00086

Ces chiffres montrent un bon accord.

6.6.8 - Conclusions

Ces essais confirment l'intérêt des rameaux pour diminuer la résistance aérodynamique des trains circulant en tunnel. Cependant les conditions d'exploitation peuvent selon les cas péjorer cet effet (croisement, etc...)

Ils mettent en évidence l'importance des pertes de charge des rameaux sur la traînée des trains. Ils confirment également l'importance de la forme d'entrée des rameaux.

6.7 - Variations de pression sur les faces des véhicules (ΔP EXT/INT)

6.7.1 - Effets stationnaires

Ces mesures ont été réalisées à partir de la marche 34023 du 8/12/87. Le capteur milieu face VE côté RHONE était référencé à l'intérieur de la VE et non au réservoir.

Pour déterminer les valeurs des ΔP EXT/INT avec le plus de précision possible, il a paru souhaitable d'utiliser la traversée complète du tunnel et non les zones d'essai précédemment mentionnées. Cette façon de procéder permet de s'affranchir ainsi des dérives de la chaîne de mesure.

Les annexes 6.7.1.1 et 6.7.1.2 représentent des exemples de tels enregistrements.

Les valeurs maximales relevées sur chacun des enregistrements ont été portées dans les colonnes "EFFETS STATIONNAIRES" des annexes 6.7.1.3 (pour la journée du 8.12) 6.7.1.4 (pour le 9.12) et 6.7.1.5 (pour le 10.12).

L'amplitude maximale observée est de 170 Pa (marche 34057 du 10.12.87, annexe 6.7.1.2) la voiture étant alors en queue d'un convoi de 12 voitures.

6.7.2 - Effets non stationnaires

Les valeurs des sollicitations dynamiques sur les parois de la voiture d'essai ont été relevées sur les oscillogrammes et portées dans les tableaux des annexes 6.7.1.3 à 6.7.1.5. Elles apparaissent au passage de la tête du train devant chaque rameau ouvert. Lorsque la partie centrale du train est en face du rameau, le mouvement de l'air dans celui-ci s'inverse et les sollicitations dynamiques sur le train sont quasi nulles. Il est à noter que ces mesures n'ont été effectuées que sur la VE.

Les sollicitations dues aux rameaux sont toujours de faible durée : au maximum 0,2 seconde à la base du signal à 160 km/h. Les signaux très brefs (< 0,05 s) n'ont pas été pris en compte du fait de leur faible effet réel sur la structure des véhicules.

La valeur maximale (1375 Pa) est apparue au moment du franchissement du rameau n°59 au cours de la marche n° 34028 du 8.12. La voiture était alors en tête du train (voir détail E de l'annexe 6.7.1.6).

Les planches des annexes 6.7.1.6, 6.7.1.7 et 6.7.1.8 regroupent les effets de loupe tant sur les sollicitations dynamiques les plus marquantes que sur les différences de pression droite/gauche (paragraphe 6.8 ci-après).

6.8 - Effets latéraux dus aux rameaux

6.8.1 - Relation entre la position du train et la vitesse de l'air -----

RESERVE B.R.

6.8.2 - Variations de pression sur les faces opposées des véhicules (DELTA P) ----- DROITE/GAUCHE -----

Ces variations de pression apparaissent au moment du franchissement des rameaux ouverts. Elles n'ont été enregistrées que sur les zones d'essais définies dans chaque tunnel.

Les tableaux récapitulatifs des annexes 6.8.2.1 à 6.8.2.8 donnent les valeurs suivantes, pour chaque zone d'essai :

- vitesse maximale du train dans la zone d'essai,
- valeur de l'ondulation crête à crête du signal,
(cette ondulation a été définie "écart moyen c. à c".)
- valeur moyenne des variations de pression crête à crête obtenues pour tous les rameaux de la zone
- valeur crête à crête maximale obtenue
- valeur de la crête positive pour ce même signal
- valeur de la crête négative pour ce même signal
- numéro du rameau où ces valeurs ont été obtenues

Les valeurs importantes apparaissant sur ces tableaux font l'objet d'un effet de loupe sur les annexes 6.7.1.6 à 6.7.1.9.

En composition 16 véhicules (journées des 8 et 9.12.1987) la valeur maximale de 1250 Pa crête à crête a été observée à deux reprises :

- au cours de la marche 34070 du 08.12, à l'extrémité LAUSANNE à 140 km/h au droit du rameau n° 59 (détail I de l'annexe 6.7.1.7).
- au cours de la marche 34028 du 09.12 dans les mêmes conditions et au même endroit (détail M de l'annexe 6.7.1.7).

En composition 12 véhicules (journée du 10.12.87) la valeur de 1250 Pa a été fréquemment dépassée ; on a atteint notamment en tête du train un delta P crête-crête de 1500 Pa au cours de la marche 34024 et de 1625 Pa au cours de la marche 34028 côté LAUSANNE au cours de circulations, dans la partie italienne. Il est à noter que pour ces marches, la vitesse était de 160 km/h. Ces deux valeurs ont été observées au droit du rameau n° 59 et font l'objet des détails ZB et ZC de l'annexe 6.7.1.9.

C'est très souvent en ce même rameau que le maximum a été atteint dans le tunnel n° 2 dans le sens ISELLE-BRIGUE. L'annexe 3.1.4 permet de constater que ce rameau n° 59 est de section importante (4,35 m) et est orienté dans le sens inverse des autres rameaux.

Pour illustrer ce fait, l'annexe 6.7.1.9 comporte des effets de loupe sur les variations obtenues au droit du rameau 59 et d'un autre rameau de la même zone au cours de la même marche d'essai (détails ZA et ZB d'une part, détails ZF, ZG et ZH d'autre part).

La zone d'essai dans le tunnel n° 1 n'englobant pas le rameau n° 59, il est impossible de comparer les valeurs obtenues au cours des circulations dans l'un et l'autre tunnel.

L'annexe 6.8.2.9 donne un extrait de la marche n°34024 représentant l'évolution des paramètres entre les PK 165,7 et 164,2. On constate qu'au droit des rameaux n° 89 et 87 les variations de pression sont toutes importantes, particulièrement à l'extrémité LAUSANNE et sur la voiture d'essai, c'est-à-dire en tête de la rame d'essai, alors que la vitesse n'atteint pas encore 130 km/h. L'observation du graphique de circulation permet de constater qu'un croisement a eu lieu à cette heure et à cet endroit avec une navette de transport d'automobiles ; cela est dû vraisemblablement à l'existence d'un fort flux d'air dans les rameaux n°89 et 87 entraînant une forte pression sur les faces des véhicules de l'avant du train croiseur côté rameaux au droit de ceux-ci.

En conclusion, compte tenu des restrictions déjà émises au § 6.7.2, on observe, pour les mesures effectuées, que :

- les écarts de pression maxima entre les faces opposées des véhicules n'ont pas excédé 1500 Pa (et exceptionnellement 1625 Pa à 160 km/h),
- les variations sont généralement plus faibles à l'arrière du train. Dans certaines configurations, elles sont noyées dans le bruit de chaîne de mesure.

6.8.3 - Variations selon la hauteur

Cette comparaison concerne les variations de pression relevées au droit des rameaux pour les prises de pression statique situées sur une même section droite de la voiture d'essai c'est-à-dire PS1, PS2 et PS6 de l'annexe 5.2.2.3.

Le signal de la prise PS1 a été remplacé par le signal du détecteur de franchissement de la niche 6.

En conclusion, aucune variation de pression sensible avec la hauteur n'a pu être mise en évidence.

6.8.4 - Variation selon la distance le long du train

Cette comparaison utilise les résultats des annexes 6.8.2.1 à 6.8.2.8 mais en regroupant sur un même tableau les maxima obtenus en tête et en queue du train (extrémités DOMODOSSOLA et LAUSANNE) ; les variations obtenues en milieu de rame sont inappréciables.

Aucune règle ne peut raisonnablement être déduite des tableaux obtenus donnés en annexes 6.8.4.1 à 6.8.4.3 en considérant comme seul critère la position le long du train. Les variations de pression droite/gauche semblent systématiquement plus importantes en tête du train mais seulement lorsque celui-ci circule dans la partie italienne.

6.9 - VITESSE DE L'AIR DANS L'ANNEAU TRAIN-TUNNEL

6.9.1 - Principe de la mesure

La chaîne de mesure décrite au paragraphe 5.2.2 donnait un signal par tube de PRANDTL à raison de 500 Pa/V répondant à la loi :

$$U_i = f(P \text{ dynamique}) = 0.5 k \rho V_i^2$$

avec U_i = valeur en volts du signal électrique image de la pression dynamique mesurée par le tube de PRANDTL i

$k = 5.10^{-3}$ (facteur d'échelle)

V_i = vitesse d'air au point i par rapport au train

Rappelons que cette loi n'est valable que si l'écoulement peut être considéré comme laminaire et tant que l'axe du tube de PRANDTL et la direction de l'écoulement ne forment pas un angle supérieur à sept degrés.

Les huit signaux d'un même peigne étaient dirigés vers les huit voies de l'enregistreur KONTRON ; l'annexe 6.9.1 représente l'un des enregistrements réalisés à l'aide de cette structure. On y remarque qu'en fait la voie 4 était utilisée pour enregistrer la pression atmosphérique puis la vitesse du convoi sur la zone d'essai.

6.9.2 - Analyse des phénomènes

Chaque enregistrement semblable à celui de l'annexe 6.9.1 a été analysé de la façon suivante :

- une zone où la vitesse et les pressions dynamiques étaient constantes a été déterminée,
- pour chaque tube de PRANDTL, la vitesse (V_i) a été calculée à partir de la pression dynamique selon la formule ci-dessus.
- le "coefficient de vitesse" C_{v_i} a été déterminé de la façon suivante :

$$C_{v_i} = \frac{V_{air} \text{ (au point } i)}{V \text{ train}}$$

L'annexe 6.9.2 représente l'évolution de C_v en fonction de la distance des points par rapport à la paroi du train.

L'observation de ces annexes conduit aux remarques suivantes :

- dans la partie italienne, bien que la vitesse du train soit absolument constante, les pressions dynamiques évoluent "en dents de scie", traduisant l'existence de rameaux ouverts. Ce phénomène est plus ou moins important en fonction de la longueur du train, de la position du peigne par rapport à la tête du train et de sa hauteur par rapport au rail. C'est pourquoi le graphe correspondant comporte une zone hachurée délimitée par deux courbes enveloppe dont l'une est le lieu des C_v maxima et l'autre le lieu des C_v minima ;
- à la distance zéro du point par rapport à la paroi du train, le C_v est nécessairement nul puisque la vitesse de l'air par rapport au train est nulle. Par contre pour une distance très faible (premier point, $d = 20 \text{ mm}$) C_v est déjà très important, l'air environnant étant peu entraîné par le train,
- à la distance 960 mm du point par rapport à la paroi du train (paroi du tunnel) le C_v est nécessairement de 100 % (air immobile par rapport au tunnel).
- lorsque C_v est supérieur à 100 %, ceci signifie que la vitesse de l'air au point considéré est supérieure à la vitesse du train par rapport au sol. L'air dans l'anneau train-tunnel se déplace donc dans un mouvement de sens opposé à celui du train.

6.9.3 - Comparaison sol/mobile

Il est possible de confirmer les faits mentionnés ci-dessus par l'observation des signaux des anémomètres installés par BR dans le tunnel : canaux 7 et 9 (anémomètres à moulinet) et canaux 2 et 6 (anémomètres à rafale) dans les galeries I et II au PK 6,2 (sections O et H de l'annexe 5.1).

Les éléments nécessaires pour juger de la bonne concordance entre les mesures au sol et les mesures effectuées à partir du train dans un cas précis ont été rassemblés sur l'annexe 6.9.3. La coupe de la section droite du tunnel et de la voiture permet de positionner le peigne P de tubes de PRANDTL (embarqué) et l'anémomètre à "rafale" repéré G. Le graphe $C_v = F(d)$ permet de constater que pour une distance > 500 mm de la paroi du train C_v 100 % (l'air est donc immobile par rapport au tunnel). Les enregistrements des anémomètres à rafale et à moulinet ont été complétés par l'indication de la vitesse de l'air au moment du passage du peigne au droit des anémomètres.

6.9.4 - Résultats comparatifs

Les annexes 6.9.4.a à 6.9.4.e ont été élaborées en rapprochant les graphes semblables à ceux de l'annexe 6.9.2 de façon à mettre en évidence :

- l'influence de la longueur du train et de la distance du peigne par rapport à la tête du train, pour le peigne supérieur (annexe 6.9.4.a) et pour le peigne inférieur (annexe 6.9.4.b) : on constate que la tête du train refoule l'air dans l'anneau train-tunnel au niveau des caisses (peigne supérieur) mais pas au niveau des bogies (peigne inférieur) ; en milieu de la rame, le C_v est de 100 % au niveau des caisses. Les parties basses de l'avant du train semblent entraîner une certaine masse d'air.
- l'influence de l'ouverture des portes des rameaux (annexe 6.9.4.c). La comparaison est effectuée pour un train de 16 voitures circulant dans la même galerie (tunnel I) successivement dans la partie suisse (le 7 ou le 8-12, portes des rameaux fermés) puis dans la partie italienne. Dans la partie suisse, le coefficient de vitesse est pratiquement toujours au moins égal à 100 % quelle que soit la position du peigne supérieur (refoulement d'air dans l'anneau train-tunnel) alors que dans la partie italienne ce phénomène ne se produit que pour la tête du train (sans doute lorsque le rameau capable d'évacuer dans l'autre tunnel la masse d'air mise en compression est loin devant le train).
- l'influence de la section du tunnel : l'annexe 6.9.4.d est établie pour la circulation d'une composition identique dans la partie suisse des tunnels I et II (rameaux fermés) ;

l'annexe 6.9.4.e concerne la circulation d'une rame plus courte (8 voitures seulement) dans la partie italienne des tunnels I et II (rameaux ouverts). Aucune différence significative due à la différence de section des deux tunnels ne peut être mise en évidence mais ces deux annexes confortent les observations déjà effectuées.

6.9.5 - Conclusion

Les parties basses du train entraînent une certaine masse d'air alors qu'au niveau des caisses et surtout à l'avant, il y a refoulement de l'air dans l'anneau train-tunnel ; cette différence de comportement est très marquée dans un tunnel sans rameaux.

6.10 - Profils de vitesse dans les rameaux et dans le tunnel

RESERVE BR

6.11 - Mesures diverses

Ces mesures avaient pour but de définir certaines contraintes sur les éléments constitutifs des rames porte-véhicules destinées au trafic transmanche. Elles ont été réalisées à l'aide de l'enregistreur KONTRON essentiellement les 8, 9 et 10 décembre 1987 et les résultats des dépouillements (dont certains ont déjà été utilisés au cours de ce rapport) sont récapitulés dans l'annexe 6.11.1.

Il s'agit des signaux suivants :

- pression sur la face de la voiture d'essai par rapport à l'intérieur (résultats commentés au paragraphe 6.7.1),
- différence de pression entre la tête et la queue du train (résultats utilisés pour calculer le coefficient de frottement du train),
- différences de pression entre chacune des plates-formes et l'intérieur de la voiture d'essai,
- vitesse de l'air dans l'un des véhicules de la rame.

6.11.1 - Variations de pression sur les plates-formes

Un capteur de pression différentiel a été installé à chaque extrémité de la voiture d'essai et mesurait la pression différentielle de part et d'autre de chacune des portes battantes d'extrémité.

La forme du signal est absolument homothétique de la pression tête-queue du train et constitue donc une fraction de cette pression, avec une valeur négative pour la plate-forme arrière, par rapport à l'intérieur de la voiture.

L'amplitude du signal dépend également de la position des portes d'intercirculation du train qui étaient toutes ouvertes, sauf une, pour certaines circulations dont la position dans le train est donnée dans la colonne "PORTES TRAINS".

Ainsi, pour des circulations de BRIGUE vers ISELLE (marches impaires) d'une composition de 16 voitures toutes portes intérieures ouvertes, (la voiture d'essai occupant la 8ème position), la pression sur la plate-forme avant (DOMODOSSOLA) de la VE atteint un maximum de 640 à 830 Pa lors de la traversée de la partie suisse du tunnel I. Ce maximum n'est plus que de 415/435 Pa lorsque les portes d'intercirculation entre les 4ème et 5ème véhicules sont maintenues fermées, ne laissant ainsi subsister qu'un ensemble de 3 véhicules toutes portes ouvertes devant la voiture d'essai. On retrouve d'ailleurs des valeurs voisines (360/415 Pascals) lorsque toutes conditions identiques par ailleurs, la voiture d'essai est en 4ème position (marches 34019 et 34023 du 10.12.87).

Remarque 1 : Pour une différence de pression de 400 Pa s'appliquant sur une porte battante de 2m de hauteur et 0,70 m de largeur, l'effort à exercer par un passager au niveau de la poignée pour ouvrir cette porte atteint une valeur approximative de 300 N.

Remarque 2 : Origine de ces différences de pression

Les différences de pression régnant sur les plates-formes ne peuvent s'expliquer par la répartition de la différence de pression tête/queue le long de la rame (maximum 3780 Pa pour 15 véhicules soit 250 Pa par voiture alors que l'on obtient 760 - (-480) soit 1240 Pa d'une plate-forme à l'autre de la voiture d'essai portes fermées : essai 34065 du 08.12.87).

Par ailleurs, ces faits sont confirmés par une manipulation inopinée consistant à ouvrir l'une des portes de la voiture d'essai : l'annexe 6.11.2 représente la variation de la pression différentielle de part et d'autre de la face de la voiture d'essai lors des deux marches d'essai au cours desquelles une personne a traversé la voiture : on constate au moment de l'ouverture de chaque porte des variations de pression de signes opposés sur la face VE dont l'amplitude peut atteindre 500 Pa (marche 34065 du 08.12.87) ; bien entendu, au moment où cette variation a lieu, la pression sur la porte ouverte s'annule tandis que la pression sur la porte de l'autre plate-forme augmente d'autant : la pression qui régnait sur la plate-forme est reportée à l'intérieur de la voiture.

Remarque 3 : Les différences de pression stationnaires entre l'intérieur et l'extérieur de la voiture d'essai ont été mesurées au milieu de la face du véhicule, portes des plates-formes fermées. Il est certain que la présence d'un tel obstacle à l'intérieur du train crée une discontinuité de nature à augmenter la différence de pression stationnaire intérieur/extérieur au voisinage de cet obstacle. Aucune mesure particulière n'a été effectuée pour confirmer cette constatation a posteriori.

6.11.2 - Vitesse de l'air dans la rame

Cette mesure a été réalisée à l'aide d'un anémomètre à diaphragme préalablement étalonné en soufflerie et dont la réponse était de la forme :

$$P_{dyn} = 0.5 k \rho V^2$$

avec $k = 1,5$

Le capteur associé était un capteur de pression différentiel KELLER (0,5 bar pleine échelle) avec une transmission en boucle de courant aux normes 4/20 mA.

L'anémomètre à diaphragme était installé dans le couloir d'une voiture type VU accroché au porte-bagages donc à peu près à hauteur du visage.

Les colonnes 12 et 13, 20 et 21 de l'annexe 6.11.1 donnent les valeurs de delta P max relevés et la vitesse qui a été calculée pour chaque marche dans les parties suisse et italienne des tunnels. Ces valeurs ont été portées également sur l'annexe 6.11.3 à partir de laquelle il est aisé de comparer les résultats obtenus en fonction de la configuration du train d'essai :

- influence du sens de circulation (comparaison figures 1 et 2 d'une part, 8 et 9 d'autre part) : on mesure une vitesse de l'air plus élevée dans l'avant dernier véhicule d'un tronçon de 7 voitures (sens BRIGUE - ISELLE) que dans le deuxième (sens ISELLE - BRIGUE),
- influence de la longueur du tronçon,
 - a) marches impaires, sens BRIGUE - ISELLE (comparaison des figures 1, 3 et 8) : la vitesse de l'air dans la voiture médiane d'un tronçon de 3 véhicules (figure 3) n'est pas réduite d'une façon sensible.
 - b) marches paires, sens ISELLE-BRIGUE (comparaison des figures 2, 4 et 9) : dans ce sens de circulation la partition de la rame produit une diminution importante de la vitesse de l'air dans le tronçon réduit de 3 véhicules.
- influence de la position du tronçon de 3 véhicules (comparaison des figures 4 et 6) : si le tronçon réduit est positionné en tête du train, la vitesse de l'air y est diminuée considérablement,
- influence des rameaux : les valeurs entre parenthèses ont été obtenues dans la partie italienne des tunnels 1 et 2 ; on constate que ces valeurs sont toujours plus faibles que dans la partie suisse où les rameaux, même ouverts, sont dotés d'un double étranglement constitué par les portes subsistant dans les parois maçonnées.

NOTA 1 : On peut d'ailleurs considérer que le mouvement de l'air dans le train est l'un des effets dus à la différence de pression tête/queue : or, les valeurs de ce paramètre atteignent un rapport de 2 à 1 pour les circulations du 8.12.87 entre la partie suisse (rameaux fermés ce jour) et la partie italienne (rameaux toujours ouverts et de grande section). Toutefois, cette différence de pression tête/queue peut également être due à la différence de vitesse de circulation (160 km/h au lieu de 140 km/h).

NOTA 2 : Un autre facteur de différence peut être décelé dans la réalisation des césures : au niveau de la voiture d'essai, la perméabilité est plus importante, pour des raisons géométriques, que pour une jonction CORAIL/CORAIL. D'ailleurs, seules les passerelles de la voiture d'essai ont été trouvées relevées au cours de plusieurs marches d'essais.

6.12 - Sélection de marches pour la simulation

Ce travail a déjà été réalisé au cours de la dernière réunion commune entre les réseaux.

7 - CONCLUSIONS

- 1) La campagne d'essais dans le tunnel du SIMPLON s'est avérée riche en enseignements sur les phénomènes aérodynamiques stationnaires et instationnaires, occasionnés par la circulation de trains dans des tunnels longs à voie unique, reliés entre-eux par des rameaux de pistonnement.
- 2) Nous pouvons affirmer que l'essentiel des objectifs définis au point 2 du rapport ont été réalisés de manière satisfaisante. Toutefois la procédure de mise en oeuvre s'est avérée complexe dans certains cas. Par exemple, il est à noter que la cohérence des résultats d'une marche à l'autre est affectée par le maintien du trafic commercial dans le tunnel pendant la durée des essais.

Pour cette raison, le niveau de dispersion des résultats peut être considéré comme tout à fait acceptable.

- 3) Ces tests ont permis de confirmer les hypothèses sur :
 - la nature tridimensionnelle et turbulente des écoulements,
 - l'importance relative des rameaux de pistonnement sur la résistance aérodynamique des trains.
- 4) Les essais ont été réalisés avec un train spécial modulable dont la longueur maximale était de 453 m. Ce dernier circulant à des vitesses comprises entre 140 et 160 km/h était inséré dans le service commercial. Sa vitesse, plus élevée que celle des autres trains, lui donnait une influence aérodynamique prédominante sur les conditions d'écoulement dans le tunnel. On a ainsi obtenu des données définitives sur les répartitions des flux d'air dans les galeries et sur la résistance à l'avancement du train d'essais.
- 5) Le $C_{f_{TU}}$ a été déterminé par 2 méthodes, l'une stationnaire, et l'autre basée sur la méthode des caractéristiques. La première donne un résultat de 0,0072 et la seconde de 0,0069. Une moyenne arithmétique des 2 résultats conduit à la valeur de 0,0071.
- 6) Le $C_{f_{TR}}$ a été calculé par deux méthodes. La première utilise la variation de pression générée par le train à son passage en un point du tunnel. Celle-ci fournit un coefficient de frottement de 0,0082. La 2ème méthode utilise la chute de pression mesurée entre deux points sur le train. Il en résulte un coefficient de frottement de 0,0069. La moyenne arithmétique conduit à la valeur de 0,0076.

- 7) Les calculs des coefficients de perte de charge ont été effectués pour le rameau n° 30 (rameau de mesure).

Quatre hypothèses de circulations ont été envisagées et sont reprises ci-dessous avec les coefficients de perte de charge correspondants (K_p) :

- a - train dans la galerie n° 1 et s'approchant du rameau (écoulements divergents) :
 $K_p = 4,2$
- b - train dans la galerie n° 1 et s'éloignant du rameau (écoulements convergents) :
 $K_p = 2,1$
- c - train dans la galerie n° 2 et s'approchant du rameau (écoulements divergents) :
 $K_p = 2,6$
- d - train dans la galerie n° 2 et s'éloignant du rameau (écoulements convergents) :
 $K_p = 2,8$

La géométrie des rameaux de pistonnement du tunnel du SIMPLON est inhabituelle. Il n'existe pas de données disponibles dans la littérature pour effectuer des comparaisons avec les coefficients de perte de charge mesurés pour le rameau complet.

- 8) Les coefficients de formes avant et arrière du train sont déduits des enregistrements de pression en un point du tunnel au cours du passage du train d'essais. Leurs valeurs sont respectivement de 0,1 et 0,2.
- 9) Lorsque les portes des rameaux sont fermées dans la partie suisse du tunnel, les effets des fuites à travers celles-ci et des écoulements par les "cross-over" sont considérables. Le flux d'air dans la galerie 2, dû à ces écoulements parasites peut atteindre 80 % de celui généré par la circulation d'un train dans la galerie 1.
- 10) Lorsque les portes des rameaux dans la partie suisse du tunnel sont fermées, la traînée aérodynamique de la rame d'essai la plus longue est 2,4 à 3,3 fois celle obtenue à l'air libre.

L'ouverture des portes produit une faible diminution de la traînée qui atteint alors la valeur de 2,2 à 2,8 fois celle de l'air libre.

Dans la partie italienne, où les rameaux sont ouverts en permanence et ont une section d'environ 1 m^2 supérieure à celle de la partie suisse, la traînée est de 1,7 à 2,2 fois celle de l'air libre. Ceci représente une diminution d'environ 30 % de la traînée mesurée dans la partie suisse lorsque les portes sont fermées.

La résistance aérodynamique en tunnel varie à peu près linéairement en fonction de la longueur du train.

Les gains de C_x occasionnés par l'ouverture des portes des rameaux côté suisse sont très faibles par rapport à ceux obtenus dans la configuration portes fermées. Cela vient des dispositions constructives retenues pour occulter ces galeries de liaison. La faible section d'ouverture crée un diaphragme.

- 11) La différence de pression stationnaire mesurée entre l'intérieur et l'extérieur de la paroi de la voiture d'essai n'a pas dépassé 170 Pa au milieu de la face. Des valeurs plus élevées peuvent apparaître au niveau d'une discontinuité (porte d'intercirculation fermée).

Lors du passage des véhicules de tête et de queue du train devant un rameau, des variations de nature instationnaire apparaissent sur les parties du véhicule situées au droit des rameaux. La durée de ces variations ne dépasse pas 0,2 s. Une amplitude de 1375 Pa a été obtenue.

Dans les mêmes conditions, la variation de pression entre les faces opposées d'un même véhicule, peut atteindre une valeur un peu plus élevée (maximum constaté : 1625 Pa) mais il est à noter qu'elle ne concerne qu'une faible partie de la face du véhicule.

L'orientation du rameau par rapport à l'axe du tunnel a certainement une grande influence sur les valeurs susceptibles d'être observées.

- 12) Les parties basses du train entraînent une certaine masse d'air, alors qu'au niveau des caisses, surtout à l'avant, il y a refoulement de l'air dans l'anneau train-tunnel. Cette différence de comportement est très marquée dans un tunnel sans rameaux.

La vitesse maximale de l'air par rapport au train, est de 0,4 fois la vitesse du train et de sens opposé au niveau des baies.

- 13) La vitesse d'air maximale générée dans le rameau de mesure par le passage des trains n'a jamais excédé 45 m/s.

Lorsque le train s'approche du rameau, la vitesse s'accroît progressivement. Elle atteint son maximum juste avant le passage du nez devant l'ouverture du rameau, décroît aussitôt, puis s'annule lors du passage du train. Lorsque la queue libère l'ouverture du rameau, la vitesse d'écoulement s'inverse pour atteindre une valeur maximale opposée, et décroît progressivement lorsque la queue du train s'éloigne.

- 14) Lorsque les portes d'intercirculations sont ouvertes, la différence de pression tête-queue induit une circulation d'air à l'intérieur du train. Un cloisement permet de réduire considérablement cet effet désagréable.

	GALERIE 1	GALERIE 2
P K	Section (m ²)	Section (m ²)
1	23,7	23,5
2	23,3	23,5
3	23,7	23,7
4	23,6	24,2
5	23,2	24,3
6	24,7	24,3
7	24,7	24,3
8	24,8	
9	24,9	
10	22,8	24,4
11	24,5	24,6
12	24,0	23,8
13	22,7	23,9
14	22,9	24,2
15	22,9	
16	23,0	23,8
17	22,5	24,1
18	23,2	23,8
19	23,0	24,2
20	23,0	24,1