



ECOLE D'INGENIEURS DE GENEVE

LES NOTES TECHNIQUES DU CMEFE

AERODYNAMIQUE DES TRAINS RAPIDES

**EXPOSES DES PHENOMENES RELEVANT
DE LA CIRCULATION EN TUNNEL**

Patrick Haas, Prof. HES

CMEFE-NT-03

Mars 2000



CMEFE – Groupe de compétences en mécanique
des fluides et procédés énergétiques
Ecole d'Ingénieurs de Genève
7, route du Pont-Butin
CH 1213 Petit- Lancy

info@cmefe.ch
<http://www.cmefe.ch>

Tél. 022 54 62 660
Fax 022 54 62 661



SOMMAIRE

Le présent document s'adresse aux ingénieurs de la construction ferroviaire. Il décrit de façon succincte les phénomènes aérodynamiques intervenant lors de la circulation en tunnel. Il propose également une approche générale de ces différents problèmes qui peut être interprétée comme une marche à suivre. Le constructeur du domaine ferroviaire trouvera ainsi à travers ces quelques pages des explications simples lui permettant de mieux évaluer l'importance de certains problèmes aérodynamiques.

Bien que la situation soit un peu différente lorsqu'il s'agit des problèmes aérodynamiques ayant lieu à l'air libre, bon nombre des approches citées peuvent également être utilisées.

NOTATION

A	Aire équivalente de fuite (m ²)
C_{ft}	Coefficient de friction du tunnel
C_{fv}	Coefficient de friction du train (voitures)
C_p	Coefficient de pression $C_p = (p - p_{ref}) / (1/2 \rho U^2)$
C_{xt}	Coefficient de traînée de forme (tête de train)
C_{xq}	Coefficient de traînée de forme (queue de train)
d	Longueur caractéristique de l'écoulement (m)
P_x	Traînée totale du train (N)
P_{xf}	Traînée de friction (N)
P_{xp}	Traînée de forme ou de pression (N)
l_t	Périmètre mouillé du tunnel (m)
l_v	Périmètre mouillé du train (voitures) (m)
L_t	Longueur du tunnel (m)
L_v	Longueur du train (voitures) (m)
p	Pression à l'extérieure du train (Pa)
p_i	Pression à l'intérieure du train (Pa)
P_{tot}	Pression totale $C_p = p + 1/2 \rho U^2$ (Pa)
R	Rayon (m)
Re	Nombre de Reynolds $Re = (U \cdot d) / \nu$
s	Distance d'un point le long d'une abscisse curviligne (m)
St	Section du tunnel (m ²)
S_v	Section du train (voitures) (m ²)
t	Temps (s)
T	Température (°C, K)
U	Vitesse de l'air par rapport au train (m/s)
ν	Vitesse du train (m/s)
V	Volume d'une voiture (m ³)
x	Position d'un point depuis l'entrée du tunnel (m)
π	Masse volumique de l'air (kg/m ³)
τ	Constante de temps de fuite (s)
ν	Viscosité cinématique de l'air (m ² /s)
ξ	Coefficient de perte de charges de l'orifice équivalent

1. EXPOSE DES PHENOMENES

Les phénomènes aérodynamiques liés à la circulation en tunnel sont nombreux. Nous savons par exemple que les fortes variations de la pression ayant lieu lors des entrées en tunnel ou lors des croisements, se traduisent notamment par:

- des cas de chargement en fatigue importants appliqués à la structure
- des fortes variations de la pression à l'intérieur des voitures

Lorsqu'un train entre dans un tunnel, une onde de pression est générée. Son intensité peut atteindre plusieurs kilopascals. Cette onde se déplace en direction de l'autre extrémité du tunnel à une vitesse voisine de celle du son. Une fois l'autre extrémité atteinte, une onde négative est générée par réflexion et remonte alors le tunnel à contresens, croisant ainsi à nouveau le train. Cette onde va ainsi se réfléchir de nombreuses fois sur les extrémités du tunnel, avant de disparaître par amortissement. L'entrée dans le tunnel de la queue du train génère également une onde de pression, mais de signe opposé et d'intensité plus faible. Les différents points de rencontre entre le train et les ondes négatives et positives sont représentés à la figure 1.1.

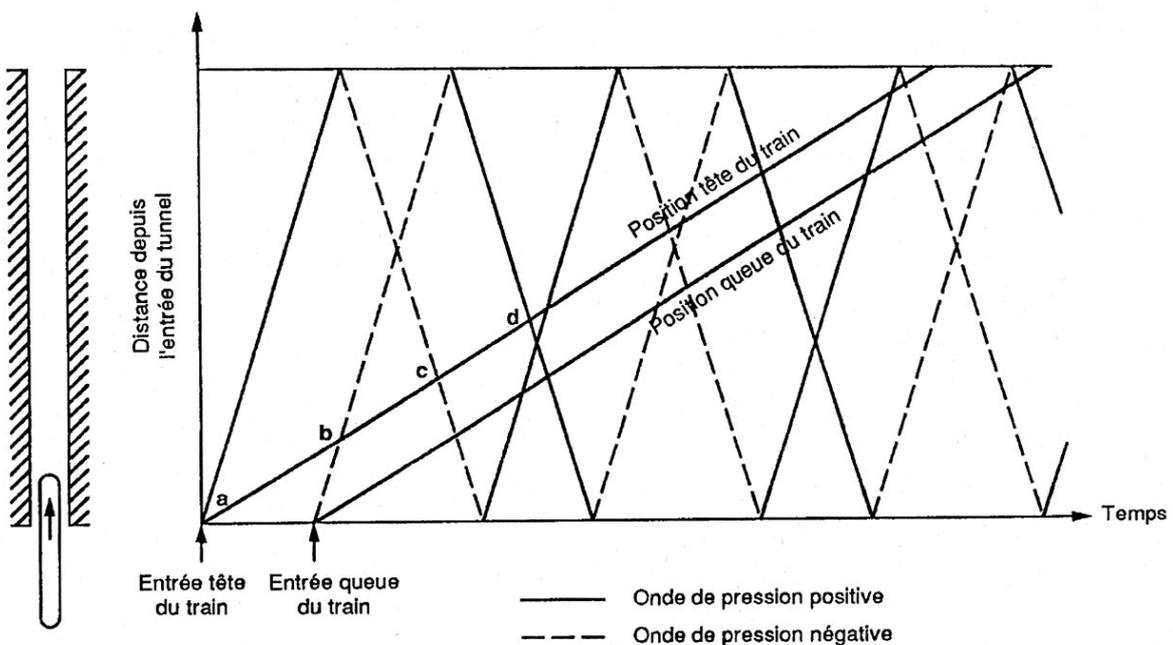


Figure 1.1 : Rencontre du train et des ondes positives et négatives.

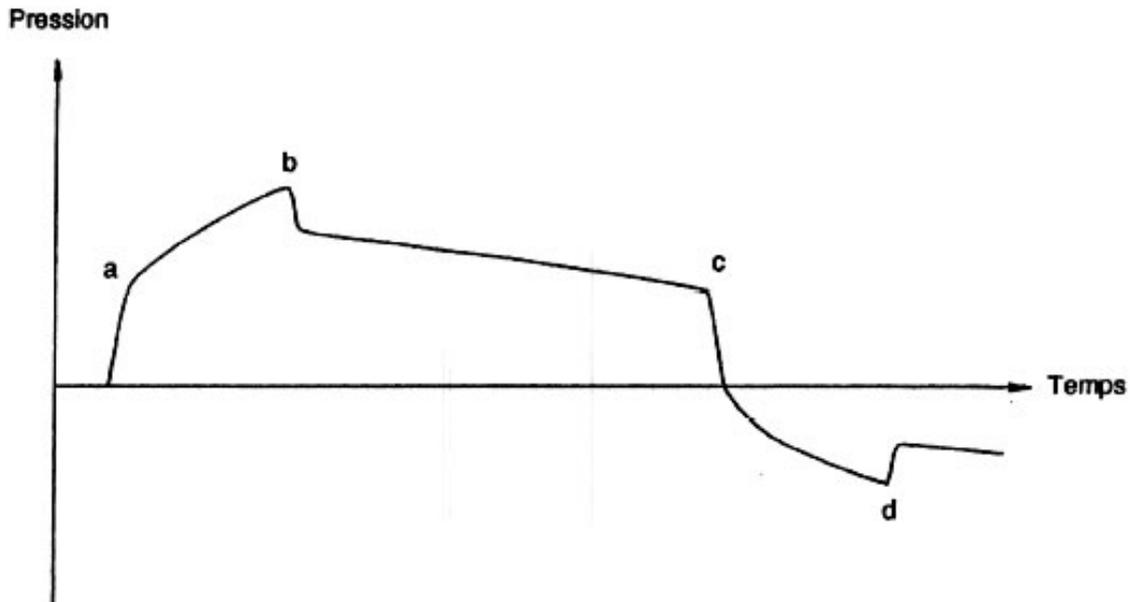


Figure 1.2: Evolution typique de la pression sur les faces latérales des voitures situées en tête de train lors d'une entrée en tunnel. Les points (a) à (d) correspondent à ceux de la figure 1.1 (réf. 2).

Le système d'onde qui se développe dans l'espace formé par le ou les tunnels peut devenir très complexe. C'est par exemple le cas lorsque plusieurs trains sont présents et génèrent des systèmes d'ondes qui se superposent, ou lorsque des rameaux d'anti-pistonnement sont placés dans le but de réduire la traînée des trains. Ces derniers vont agir comme des ouvertures supplémentaires rendant ainsi plus nombreuses les ondes provenant de réflexions.

Lorsque nous observons l'évolution de la pression régnant dans la section annulaire entre le train et la paroi du tunnel, nous voyons que les instants où les ondes réfléchies rencontrent le train sont clairement visibles. La figure 1.2 représente une telle évolution lors d'une entrée en tunnel pour les voitures situées en tête de train. Nous observons d'abord une brutale augmentation de la pression provoquée par l'entrée du train dans le tunnel (point a). Puis la pression augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale au moment où l'onde négative générée par la queue du train est présente à l'endroit considéré (point b). La pression perd alors de l'intensité au fur et à mesure que les premières voitures s'approchent de la sortie du tunnel. La rencontre de l'onde générée par la tête de train et réfléchiée sur la sortie du tunnel se fait au point (c). La pression diminue alors rapidement. L'ampleur de cette chute de pression correspond à l'onde initiale générée à l'entrée du tunnel, moins un amortissement. Puis c'est au tour de l'onde négative générée par la queue du train, et également réfléchiée à la sortie du tunnel, de croiser les premières voitures (point d). Et ainsi de suite.

Ces variations importantes de la pression extérieure au train se répercuteront à l'intérieur de celui-ci avec un certain retard, dont l'étanchéité est la cause. Si un niveau de confort élevé est recherché, une étanchéité importante est souhaitée, tandis que si des cas de chargement faibles de la structure sont souhaités, les voitures devront être peu étanches.

Il est important de comprendre quelles sont les différentes grandeurs à la base des variations de pressions extérieures et intérieures aux voitures. En ce qui concerne la pression extérieure, celle-ci est influencée avant tout par:

- Les gabarits du tunnel et du train (sections, périmètres mouillés)
- Les coefficients de friction (tunnel et train)
- Les coefficients de forme (tête et queue de train)
- La vitesse du train
- Les caractéristiques d'éventuels rameaux d'anti-pistonement

En ce qui concerne la pression intérieure, il faut encore ajouter

- L'étanchéité des voitures

Dans un projet, la majorité de ces grandeurs sont généralement données par le client en termes de spécifications techniques, ou sont du recours du génie civil. Les actions que le constructeur des trains pourra entreprendre porteront alors sur les grandeurs suivantes:

- Le coefficient de friction du train
- Les coefficients de forme (tête et queue de train)
- L'étanchéité des voitures

Dans le but de minimiser les variations de pression à l'intérieur des voitures. le constructeur du train va prendre différentes actions pour réduire au maximum la traînée. et il se fixera également des objectifs quant à l'étanchéité des voitures.

2. ORIGINES DE LA TRAÎNÉE D'UN TRAIN

Avant d'aborder les façons qu'il existe pour minimiser la traînée, voyons quelles sont ses origines.

La mécanique des fluides nous montre que toute force aérodynamique agissant sur un corps a pour origine la viscosité. De même, tout corps plongé dans un écoulement non visqueux, ne subit aucune traînée, ni portance.

Dans le cas qui nous concerne, si la portance est généralement faible, la traînée est par contre très importante. Pour un train passager traditionnel roulant en tunnel à une vitesse de 150 (km/h), elle se situe généralement aux environs de 200 (kN), la puissance dissipée dans l'air étant alors de 8 (MW) ! Ces valeurs varient fortement en fonction de la vitesse du train et de sa longueur.

La distribution générale de pression le long du tunnel loin des ondes réfléchies, est représenté à la figure 2.1. On y distingue des régions où se produit essentiellement de la traînée de forme (ou de pression), et des régions où se produit essentiellement de la traînée de friction.

La traînée de forme ou de pression provient de la distribution de pression générée par l'écoulement autour du corps. L'action de ces pressions se fait de façon normale à la surface du corps au point considéré. La traînée totale de forme est alors l'intégrale sur toute la surface du corps des contributions selon l'axe des x des termes (pression x surface).

$$(F_x)_p = \int p \sin \theta dS$$

La friction de l'air sur les parois du train génère de la traînée de façon directe, en donnant lieu à des forces tangentes à ces surfaces. C'est la traînée de friction.

$$(F_x)_f = \int \tau \cos \theta dS$$

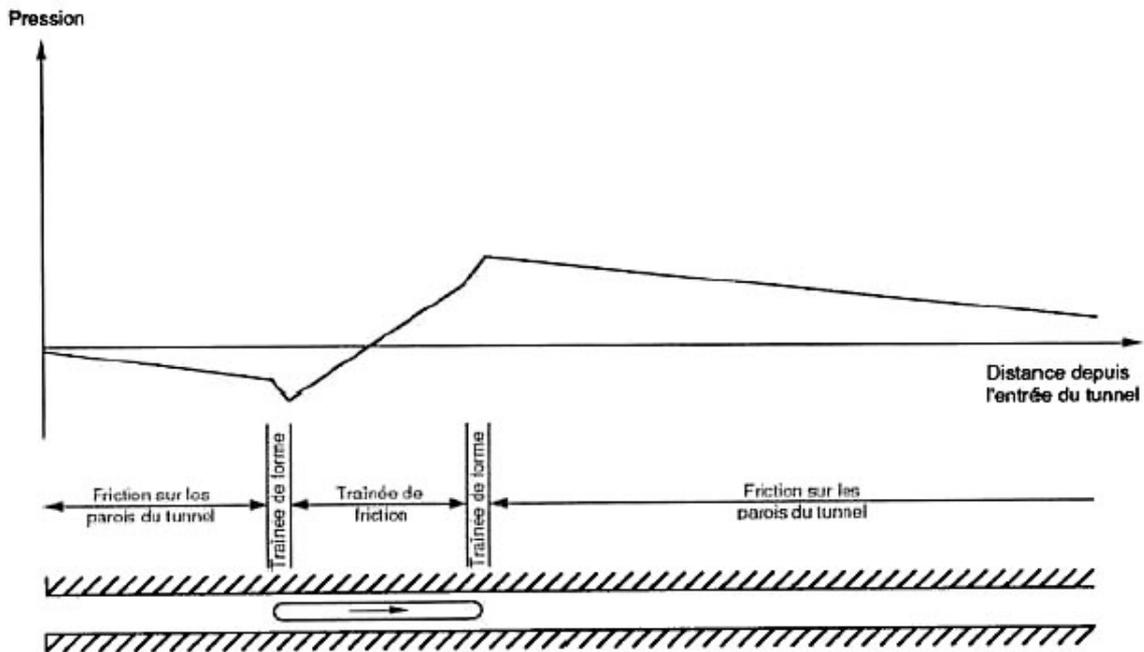


Figure 2.1 : Evolution de la pression dans le tunnel loin des ondes positives et négatives.

Dans le cas d'un train en tunnel, la friction contribue aussi à la traînée totale de façon indirecte. La friction provoque une diminution de la pression le long du train. Ce gradient de pression a pour conséquence une différence de pression entre l'amont et l'aval du train dont l'intensité atteint plusieurs kilopascals et qui agit alors sur toute la section du train.

$$F_x = F_{xv} + F_{xf} + \Delta p S_v$$

On définit généralement le coefficient de forme C_{xt} selon la figure 2.2. Sa valeur se situe aux environs de

- < 0.20 pour un train traditionnel et à haute vitesse
- 0.40 pour un train marchandise

$$C_{xt} = (p_{tot 1} - p_{tot 2}) / (1/2 \rho U^2)$$

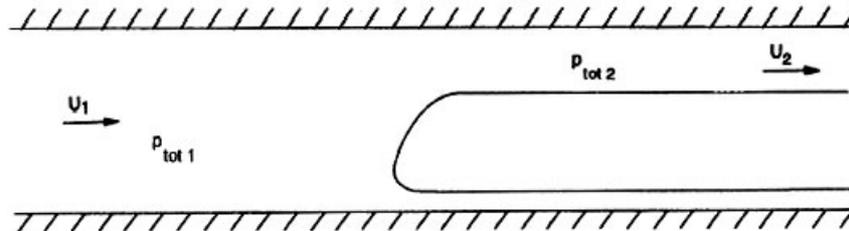


Figure 2.2 : Définition du coefficient de forme.

On définit également le coefficient de friction C_{fv} du train en tunnel selon la figure 2.3. Sa valeur se situe aux environs de

0.0060	pour un train à haute vitesse
0.0090	pour un train passagers traditionnel
0,0400	pour un train de marchandises

Ce coefficient est fonction de la rugosité, du nombre de Reynolds et du rapport de section du tunnel. Cependant, pour des nombres de Reynolds élevés, ce dernier devient fonction uniquement de la rugosité et du rapport de section du tunnel, selon le diagramme de Moody.

$$C_{fv} = \tau / (1/2 \rho U^2)$$

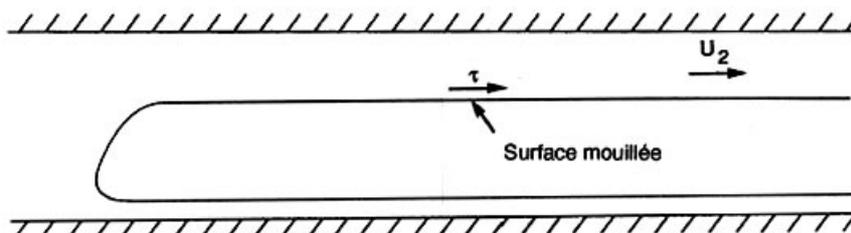


Figure 2.3 : Définition du coefficient de friction.

3. MINIMISATION DE LA TRAINÉE DE FORME

La traînée de forme ou de pression sera ramenée à sa valeur minimale en procédant à une optimisation de forme telle que décrite dans la référence 1 (modèles PAN et ACL).

On peut en effet montrer que la traînée d'un corps dont la géométrie peut être définie par un nombre limité de plans joints par des rayons, varie selon la loi présentée à la figure 3.1. Nous voyons qu'il existe des rayons au-delà desquels il n'y a plus rien à gagner. Ces rayons sont appelés rayons critiques. Pour des question d'esthétique et de place à l'intérieur du véhicule. il peut être intéressant d'avoir des rayons égaux aux rayons critiques. La traînée sera alors minimale (pour des valeurs raisonnables des rayons) et les aspects esthétiques et utilitaires optimaux.

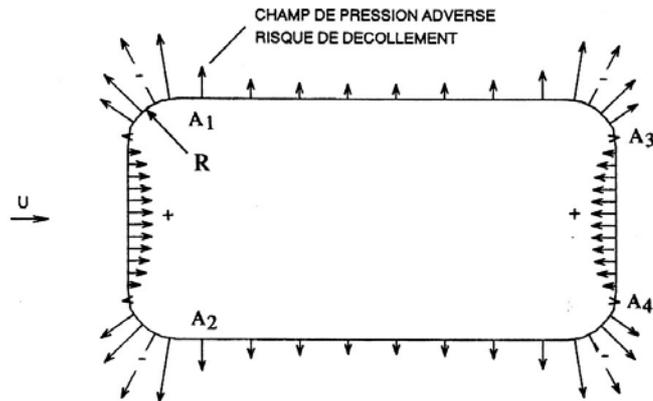


Figure 3.1 a : Géométrie envisagée et distribution de pression (si le fluide était non-visqueux)

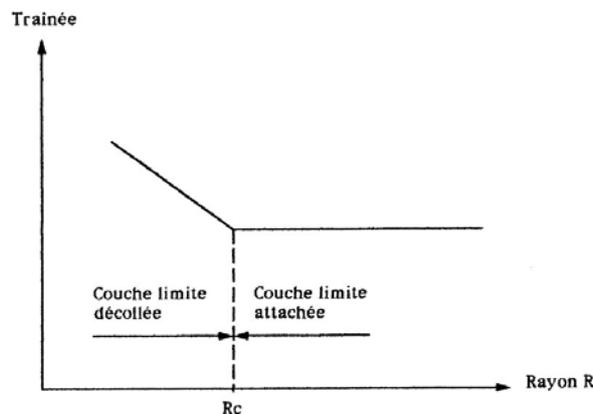


Figure 3.1 b : Variation de la traînée en fonction du rayon pour le corps à la figure 3.1a.

Ce genre d'optimisation permet non seulement de minimiser la traînée, mais est une façon efficace d'aborder les problèmes de la génération de bruit et des instabilités de l'écoulement (vorticités). Dans la mesure où elle représente une quantité raisonnable de travail, elle est vivement conseillée.

La valeur définitive du coefficient de forme peut être évaluée en procédant à un essai statique (train fixe) sur des modèles, ou par une résolution numérique de l'écoulement. Dans le cas de l'essai sur modèle à échelle réduite, il conviendra de s'assurer par visualisation que les conditions d'écoulement sont respectées (écoulement attaché ou décollé). L'état de la couche limite (laminaire ou turbulent) au point de décollement doit impérativement être respecté. Si ce n'est pas le cas, la position du point de transition pourra être fixée à l'aide d'un artifice tel un m-rceau de corde collé ou toute autre rugosité.

Si l'analyse numérique est choisie, les nombres de Reynolds présents dans l'industrie ferroviaire étant élevés, il conviendra d'être attentif aux conséquences d'une valeur trop basse. Il faudra également porter une attention particulière à la modélisation de la turbulence, un écoulement laminaire se comportant très différemment d'un écoulement turbulent.

4. MINIMISATION DE LA TRAINEE DE FRICTION

La traînée de friction pourra être minimisée en soignant au mieux la construction des voitures et en utilisant éventuellement des jupes.

Il faut noter ici que toutes les traînées de forme autres que celles se produisant aux extrémités du train, sont généralement incluses dans la traînée de friction. Elles sont donc assimilées à de la rugosité.

La détermination du coefficient de friction pendant la phase de développement est difficile. D'une part des essais sur modèles à échelle réduite sont fortement influencés par le nombre de Reynolds et par le mouvement relatif du train par rapport au tunnel. Et d'autre part, l'analyse numérique se heurte à des problèmes de modélisation, spécialement pour le dessous des voitures, pour les bogies, pour les renforts éventuelles de la tôle, enfin pour tous les petits éléments tels que poignées, baies de fenêtres, etc. Une telle modélisation est déconseillée.

Pour cette analyse un essai statique (train fixe par rapport au tunnel) pose le problème de la quantité d'air qui passe entre le sol et le dessous du train. Le profil de vitesse est alors très différent de la réalité et la contribution du dessous du train est sous-évaluée. C'est pour cette raison que certains centres de recherche ont élaboré des moyens d'essais où le train est en mouvement par rapport au tunnel. La mesure des différentes grandeurs nécessaires au dépouillement est alors réalisée en régime non permanent.

Dans tous les cas et quelque soit le moyen d'analyse choisi. une comparaison avec des valeurs réelles existantes, voir l'analyse des performances d'un train existant à l'aide de l'approche choisie en guise de validation. est souhaitable.

La mesure de la valeur finale de ce coefficient dans le tunnel donne lieu à un essai très intéressant. Différentes méthodes existent pour déterminer: celui-ci. Parmi celles-ci nous pouvons distinguer les méthodes suivantes:

La méthode numérique : (mesure entre plusieurs points + méthode numérique)

La méthode numérique consiste à mesurer en plusieurs points du tunnel les pressions et les vitesses ayant lieu en fonction du temps. Les coefficients de friction du tunnel et du train sont déterminés lors du passage du train entre ces points à l'aide de calculs numériques basés généralement sur la méthode des caractéristiques. bien que d'autres méthodes numériques peuvent ici être utilisées.

La méthode de Hara : (mesure lors de l'entrée en tunnel)

T. Hara a décrit une méthode simple de détermination du coefficient de friction (référence 2). Les grandeurs nécessaires à sa détermination sont faciles à mesurer (pressions sur la paroi latérale des voitures). Le calcul se fait lors de l'entrée en tunnel. entre les points (a) et (b) de la figure 1.2. Cette méthode utilise les équations décrivant les pertes de pression dans des conduites hydrauliques (régime permanent), des équations de la thermodynamique, ainsi que des équations décrivant le mouvement des ondes de choc planes normales.

La méthode par décélération : (mesure de la décélération d'un train)

Un train est lancé à une certaine vitesse dans un tunnel, la force totale agissant sur celui-ci étant estimée par la mesure de sa décélération. La valeur de la traînée totale du train est obtenue en procédant à une analyse de la courbe force totale = $f(\text{vitesse})$, et en extrayant de celle-ci la composante d'ordre deux.

5. LE ROLE JOUE PAR L'ETANCHEITE A L'AIR DES VOITURES

Après avoir effectué le travail décrit dans les chapitres précédents, le constructeur s'occupera de l'étanchéité des voitures. Cette grandeur est sans aucun doute celle pour laquelle la marge de manœuvre est la plus importante.

L'étanchéité des voitures sera d'abord définie à l'aide d'une valeur minimale, représentant le niveau d'étanchéité requis pour satisfaire aux exigences de confort, et d'une valeur maximale définie de façon "arbitraire" qui sera utilisée pour calculer les cas de chargement de la structure.

Connaissant l'écoulement généré par le mouvement des trains dans le tunnel, un modèle numérique est alors utilisé pour calculer l'évolution de la pression à l'intérieur des voitures (PINT).

L'étanchéité du volume peut alors être modifiée, afin d'évaluer son effet sur le confort des passagers et sur la pression différentielle (cas de chargement). Il permet de définir rapidement une marge dans laquelle l'étanchéité des voitures doit se situer, et d'évaluer l'impact d'une source de fuites en termes de confort.

Cette marge de valeurs sera utilisée pendant la phase de développement, et la valeur finale fera l'objet d'un essai (voir chapitre 7).

Selon le niveau d'étanchéité souhaité, le constructeur orientera sa construction de façon différente et tout au long du développement, il analysera autant que possible l'impact des différentes sources de fuites sur l'ensemble (système de climatisation, orifices de drainage, etc.).

6. CONSTANTE DE TEMPS DE FUITE

L'étanchéité d'une voiture est généralement représentée par une constante de temps notée τ , définie comme le temps nécessaire pour qu'une pression différentielle (pression extérieure moins pression intérieure) soit ramenée de 4'000 (Pa) à 1'000 (Pa) ou de 3'000 (Pa) à 100 (Pa) selon le projet, la pression extérieure étant restée constante (voir figure 6.1). Certaines personnes utilisent aussi une définition plus traditionnelle dans le monde de la physique, pour laquelle la pression différentielle vaut 37% de la valeur initiale après un temps équivalent à la constante de temps. Dans tous les cas, la constante de temps doit être clairement définie pour un projet donné. Notons que ces définitions ne diffèrent que d'un facteur près, et qu'il est donc facile de passer de l'une à l'autre.

Les valeurs de la constante de temps se situent aux environs de

- 3 à 10 (s) pour un train passager traditionnel
- 10 à 50 (s) pour un train à grande vitesse

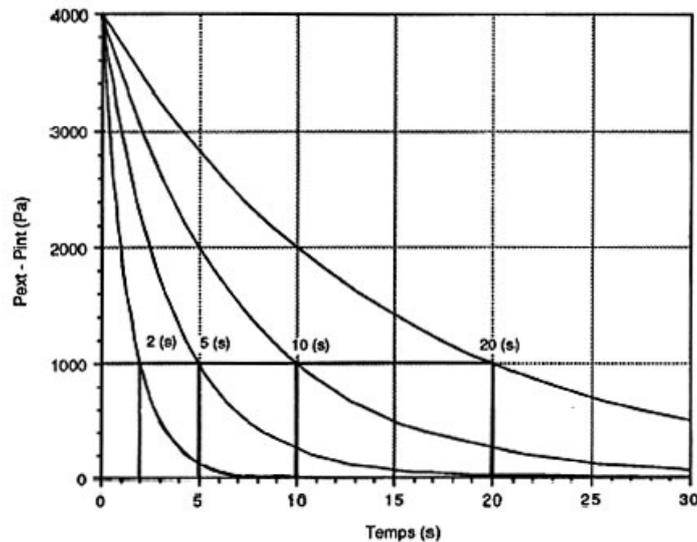


Fig. 6.1: Définition de la constante de temps (ici la définition basée sur le temps entre 4000 et 1000 Pa a été choisie)

Lorsque la constante de temps de fuite d'un volume est connue, ses caractéristiques de fuite sont alors connues, indépendamment de tout autre paramètre, à l'exception de la pression et de la température de l'air.

Les fuites se produisant à travers les différentes ouvertures d'un volume sont souvent ramenées à une aire équivalente notée A. Celle-ci est définie comme étant la section d'un orifice (dont le coefficient de perte de charge est fixé) qui donnerait le même niveau de fuite que l'ensemble des sources de celui-ci.

Si l'aire équivalente de fuite d'une voiture est connue, les caractéristiques de celle-ci ne le sont que si son volume est également connu, c'est la raison pour laquelle on utilisera de préférence la constante de temps pour définir l'étanchéité d'un volume.

7. MESURE DE LA CONSTANTE DE TEMPS DE FUITE

La mesure de la constante de temps de fuite doit être réalisée afin de montrer que la valeur finale des voitures se trouve dans la marge utilisée pendant la phase de développement du projet.

Cet essai s'effectue sur une voiture choisie dans la série de production de manière à représenter au mieux l'ensemble de celle-ci. L'installation d'essai comporte un éjecteur relié au par une conduite munie d'une vanne servant à obturer en un temps très court la conduite au moment désiré (voir figure 7.1). L'éjecteur fonctionne en étant alimenté avec de l'air comprimé.

Au début de l'essai la vanne est complètement ouverte. On alimente l'éjecteur avec l'air comprimé et on règle la pression différentielle agissant sur la voiture jusqu'à obtenir la valeur désirée. Lorsque celle-ci est obtenue, la vanne d'obturation est rapidement fermée et la mesure de l'évolution de la pression intérieure est réalisée au moyen d'un capteur de pression installé au centre de la voiture. La courbe de pression en fonction du temps est alors comparée à des courbes théoriques afin de déterminer la valeur de la constante de temps cherchée. Une valeur représentant les caractéristiques dans des conditions standards de pression atmosphérique et de température est calculée.

L'éjecteur doit être choisi en fonction des caractéristiques de la voiture (volume intérieure, étanchéité attendue, etc.) et du niveau de pression à laquelle l'essai doit être effectué. Il existe différents fabricants distribuant ce type d'éléments. Notons ici que la pression d'alimentation en air étant élevée (jusqu'à 6 bars), l'écoulement dans l'éjecteur est de type supersonique et l'essai est assez bruyant.

Si la personne désirant faire un tel essai est en possession d'un ventilateur ou si de fortes puissances sont recherchées, on pourra utiliser un ventilateur en lieu et place de l'éjecteur.

Les caractéristiques d'une voiture ne correspondent pas toujours exactement aux fonctions théoriques représentant celles d'un volume muni d'un orifice, certains éléments tels que le système de climatisation ou des joints, n'agissant pas comme des orifices. Une analyse détaillée des courbes doit être réalisée.

Cet essai a été normalisé par AFNOR (référence 3).

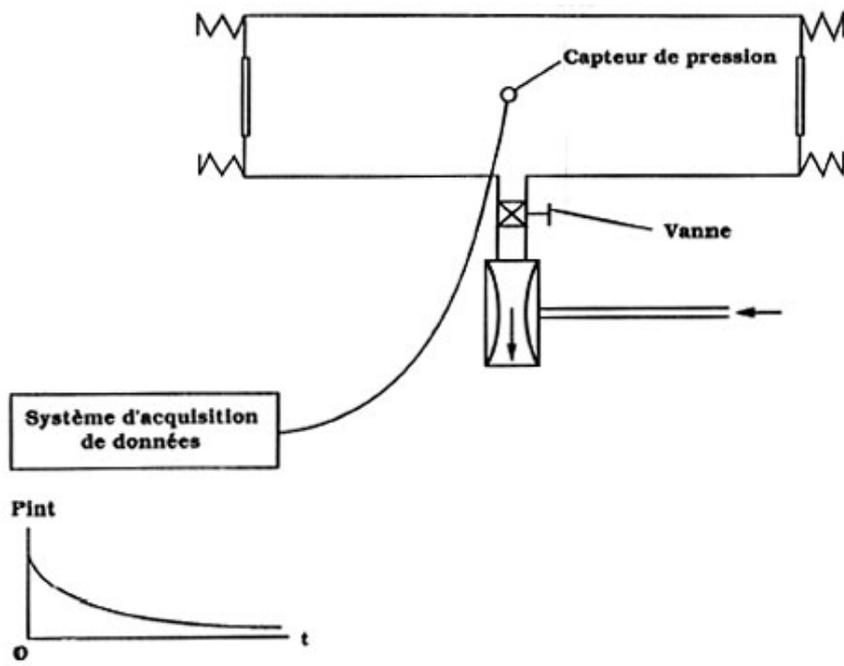


Figure 7.1 : Schéma de l'installation de mesure de l'étanchéité des voitures



8. CONCLUSIONS

Une partie des phénomènes aérodynamiques intervenant lors de la circulation en tunnel ont été présentés dans les chapitres précédents.

Bien que la détermination des coefficients de friction et de forme sur modèle soit assez délicate, nous pouvons dire que la définition des scénarios représentatifs du mode d'opération du tunnel est très importante et est à la base de tout calcul.

La liste des phénomènes aérodynamiques présentée dans ce document n'est pas exhaustive, elle a pour unique objectif d'offrir une introduction aux différentes questions qui peuvent être soulevées. La présence de tunnels sur une ligne ferroviaire doit être considérée comme un facteur important de limitation de la vitesse.

Genève, le 18 mars 2000.

Patrick Haas
Ingénieur de recherche

BIBLIOGRAPHIE

1. HAAS P., *Analyse de couches limites et minimisation de la traînée*, Note technique du CMEFE, CMEFE-NT-02, 12.03.2000.
2. Hara T., *Method of measuring of aerodynamic drag of trains*, Quart. Rep. Rail Tech. Res. Inst., JNR, vol. 6, n° 2, 1965, pp. 52-55.
3. AFNOR, *Méthodes de mesure de l'étanchéité à l'air d'un véhicule et de ses sous-ensembles*, norme NF F 17-011, novembre 1991.
4. Gaillard, M., *Zur Aerodynamik der Zugbegegnung im Tunnel und auf offener Strecke*, Doktor Diss. Nr. 4874, ETHZ, Zurich, 1973.
5. L'ERRI publie également un certain nombre de rapports ferroviaire sur l'aérodynamique.

STANDARD / SITUATION	REMARQUE	VITESSE DE VARIATION	AMPLITUDE
Standard DB, Allemagne	Lignes avec beaucoup de tunnels (entrées...)	300-500 (Pa/s)	1'000 (Pa)
Standard JNR, Japon	Lignes avec beaucoup de tunnels (entrées...)	200 (Pa/s)	1'000 (Pa)
Standard FS, Italie	-	500 (Pa/s)	1'500 (Pa)
Standard BR, Angleterre	4 (kPa) / 4 (s) acceptable plusieurs fois par heure	1'000 (Pa/s)	4'000 (Pa)
Nageur entrant dans l'eau après un plongeon de 10 (m)	Jusqu'à 6 (m) sous l'eau en 2 (s)	30'000 (Pa/s)	60'000 (Pa)
Plongée sous-marine	20 (m) sous la surface	Faible	200'000 (Pa)

- Vitesse de variation de la pression : points de repères.