

# CÁLCULOS AERODINÁMICOS EN TÚNELES DE FERROCARRIL SIMULACIONES CON EL PROGRAMA OURANOS

.....  
Luis Fort López-Tello  
Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
*NECSO, España*  
Frédéric Gil  
Ingénieur d'Etudes  
*C & S, Francia*  
.....

## RESUMEN

Los códigos CFD no resultan apropiados para la modelación de túneles largos ni de redes de ferrocarriles subterráneos. Por esta razón, el CETU ha desarrollado el programa TRANSIT [1]. Algunos datos para este programa TRANSIT, como por ejemplo la velocidad del aire en las simulaciones de incendios y otros parámetros como la presión del aire para los escenarios de seguridad y confort se pueden obtener mediante el uso del programa OURANOS. Este "software" ha sido desarrollado por CEA/DAM ("Commissariat à l'Energie Atomique/Division des Applications Militaires") para el colectivo Francés encargado de los temas de defensa. Lo utiliza el C.E.G. (i.e. Centre d'Etudes de Gramat) en varias aplicaciones y se ha aplicado por primera vez para distintas simulaciones 2D y 3D de trenes utilizando una red de ferrocarriles de alta velocidad.

## ABSTRACT

The CFD codes are not suitable for the modelling of long tunnels or underground railway lines and as a result the CETU have developed the TRANSIT programme. Some of the data for this TRANSIT programme, such as the air velocity in fire simulations and other parameters such as the air pressure required for safety and comfort, may be obtained by the OURANOS programme. This software has been developed by the CEA/DAM ("Commissariat à l'Energie Atomique/Division des Applications Militaires") for the French group entrusted with defence matters. This has been employed by the C.E.G. (Centre d'Etudes de Gramat) in various applications and has been applied for the first time to various 2D and 3D simulation of high-speed trains.

## 1 INTRODUCCIÓN

La contribución hecha por las simulaciones numéricas al conocimiento de la mecánica física otorga a las herramientas de cálculo numérico un papel indiscutible a la hora de planificar las tendencias del futuro. Los trabajos que presentamos en este documento se realizaron con el programa OURANOS en su versión Euleriana de dos y tres dimensiones. El estudio se ocupa de varias configuraciones.

En una primera etapa, se han realizado simulaciones para establecer la idoneidad del programa para este tipo de simulaciones. La comparación de los resultados obtenidos en las estaciones Eulerianas para dos tipos de configuraciones (trenes de forma cilíndrica y en forma de flecha) revelan que estas configuraciones tienen una gran influencia sobre el nivel de presión.

En una segunda etapa, se analizan varias hipótesis de los "Escenarios de Seguridad y Confort" y se realizan simulacio-

TABLA 1: PARAMETROS DEL AIRE

Masa/volumen (Kg/m³)	1,3	Presión de Referencia (KPa)	100
$\gamma$ (coeficiente politrópico)	1,4	Temperatura de Referencia (° Centígrados)	27
Cv (J/Kg)	641		

TABLA 2: PARAMETROS DE LOS CUERPOS RÍGIDOS

Masa/volumen (Kg/m³)	17860.	C <sub>0</sub> (velocidad del sonido) (m/s)	100,0
$\Gamma_0$	1,67	S <sub>1</sub>	1,73
b	0,	S <sub>2</sub> and S <sub>3</sub>	0,

nes en las configuraciones 2D y 3D. Entre ellas, y para el escenario de confort, se analiza la entrada de un tren en un túnel.

Para el escenario de seguridad, se estudia el cruce de dos trenes en la zona más crítica situada entre dos galerías de escape. También se analizó la hipótesis de cruce de un tren con otro tren averiado que se ha detenido enfrente de una galería de escape. De esta forma, se pueden estudiar la velocidad del flujo de aire y su incidencia sobre las estrategias de escape en caso de incendio.

## 2. MODELACIÓN DE LOS MATERIALES

### Modelación del Aire

El aire tiene un comportamiento perfectamente hidrodinámico y se modela por medio de una ecuación de estado del tipo de gas perfecto. Los parámetros aparecen reflejados en la Tabla 1.

### Modelación del túnel y del tren

Los trenes y los túneles se consideran cuerpos rígidos. Para sus materiales se utiliza una ecuación de estado del tipo "Mie-Gruneisen" [2]. La presión  $p$  y su energía interna específica  $e$  aparecen relacionados en la siguiente expresión:

$$p(v,e) = p_H(v) + G(v)/v \cdot (e - e_H(v))$$

La expresión del coeficiente Mie-Gruneisen es la siguiente:  
 $\Gamma(v) = \Gamma_0 \cdot (1 - \mu) + b \cdot \mu$

Donde  $\mu = 1 - \rho_0 \cdot v$

$$p_H(v) = (\rho_0 \cdot C_0^2 \cdot \mu) / ((1 - S_1 \mu - S_2 \mu^2 - S_3 \mu^3)^2)$$

$$e_H(v) = e_0 + P_H \cdot \mu / (2 \cdot \rho_0)$$

Los coeficientes descritos en la Tabla 2 (masa/volumen y velocidad del sonido) han sido modificados para adaptar su comportamiento al de un cuerpo rígido.

El procesado se ha realizado con la versión Euleriana del hidrocódigo OURANOS. La ecuación de mecánica de medios continuos se procesa mediante un programa del tipo de diferencias finitas y para la determinación de las interfaces en las celdas mixtas se ha aplicado el método SLIC [3].

## 3. VALIDACIÓN DE LAS CONFIGURACIONES BIDIMENSIONALES

Los primeros cálculos hacen referencia a la fase crítica, en la que un tren entra en un túnel durante 4.4 segundos. La configuración axilsimétrica 2D aparece reflejada en la figura 1.

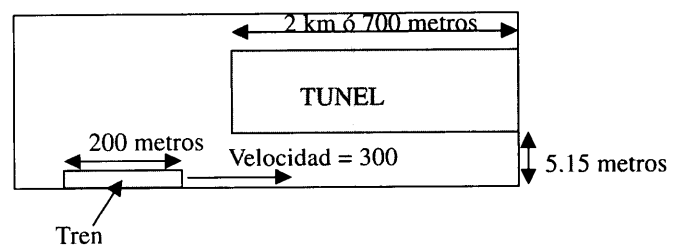


Figura 1 : Configuración Inicial.

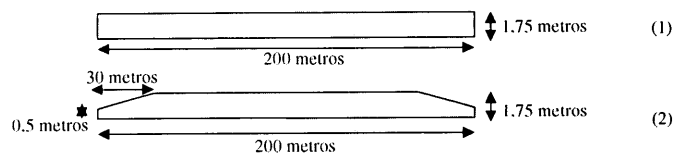
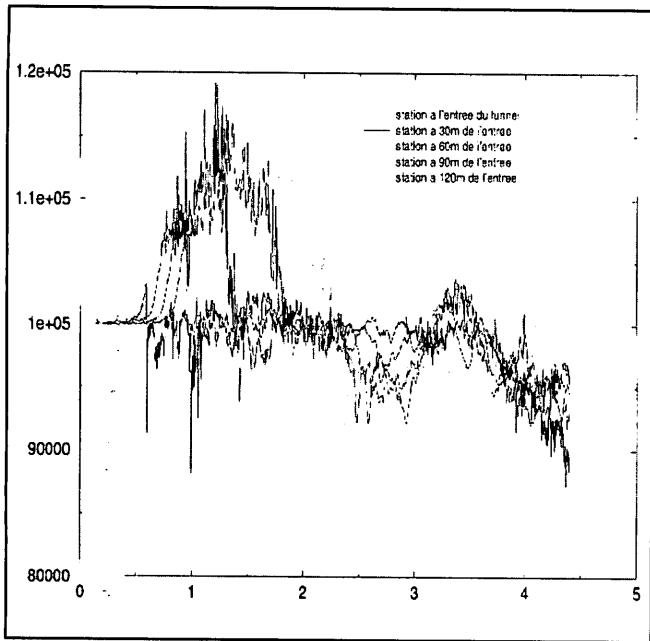
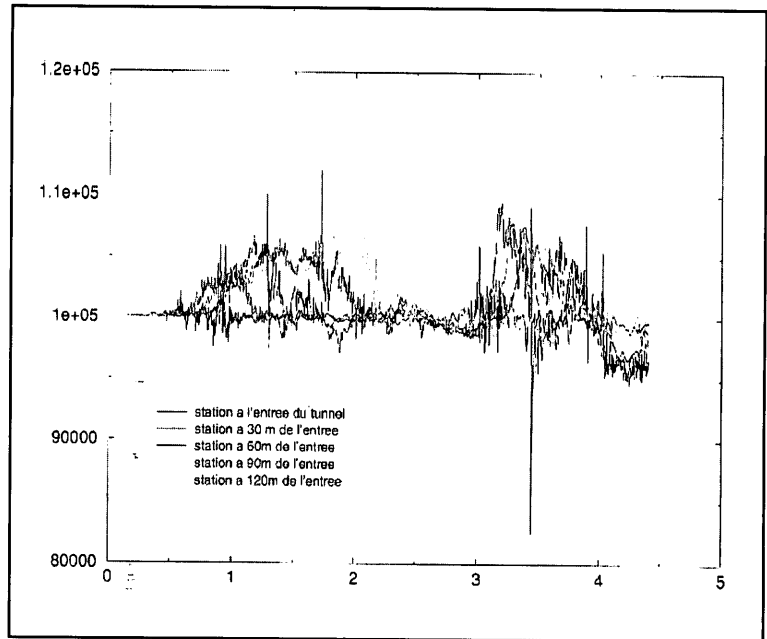


Figura 2 : configuraciones de tren; (1) en forma de cilindro, (2) en forma de flecha.



**Figura 3 :** Datos de la presión para un tren "en forma cilíndrica" desplazándose a 300 Km/h por un túnel con una sección transversal de 83 m<sup>2</sup>.



**Figura 4 :** Datos de la presión para un tren "en forma de flecha" desplazándose a 300 Km/h por un túnel con una sección transversal de 83 m<sup>2</sup>.

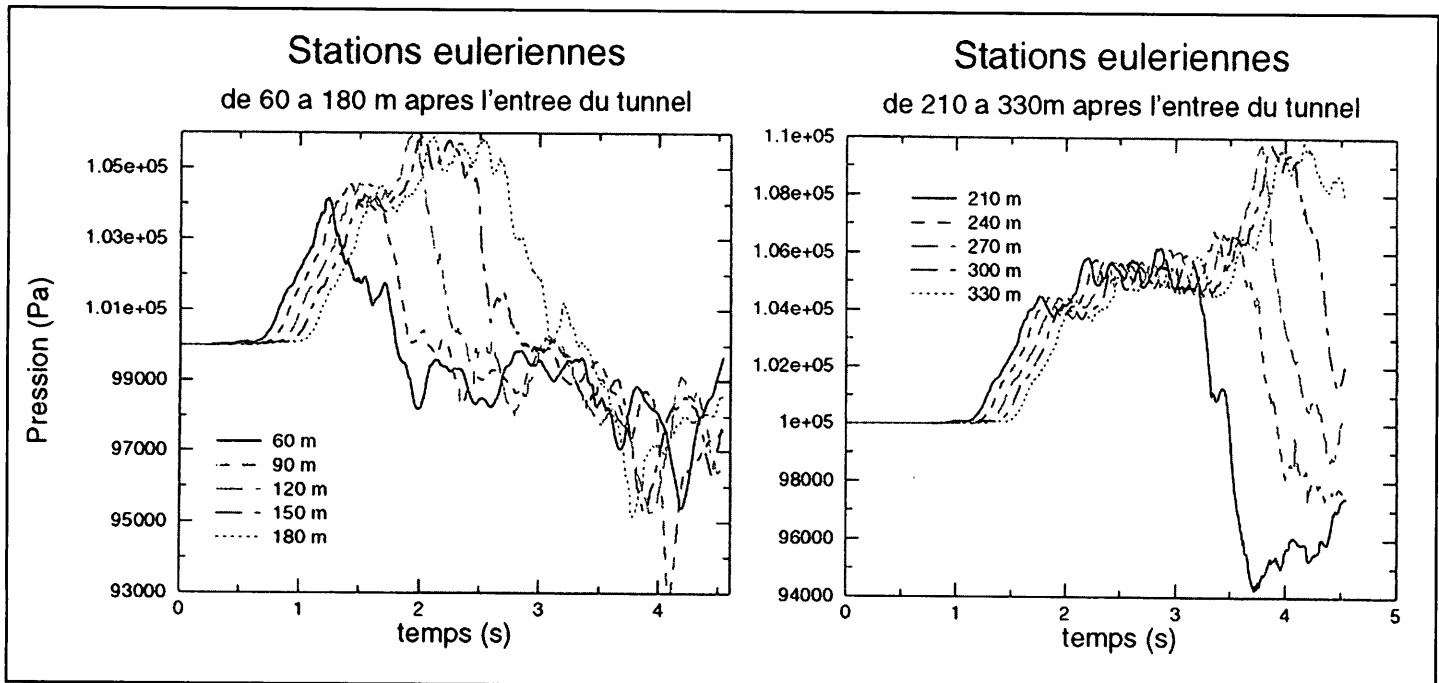
Para estas simulaciones se han utilizado las dos configuraciones de tren indicadas en la figura 2.

Se utilizó una malla irregular, en la que el tamaño de retícula más pequeño era de unas 40 celdas/metro en la zona de entrada al túnel.

**Resultados.**

Los resultados aparecen reflejados en las figuras 3 y 4.

Se puede concluir, por lo tanto, que :



**Figura 5 :** Datos de presión para un tren desplazándose a 300 Km/h a través de un túnel con una sección de 90m<sup>2</sup>.

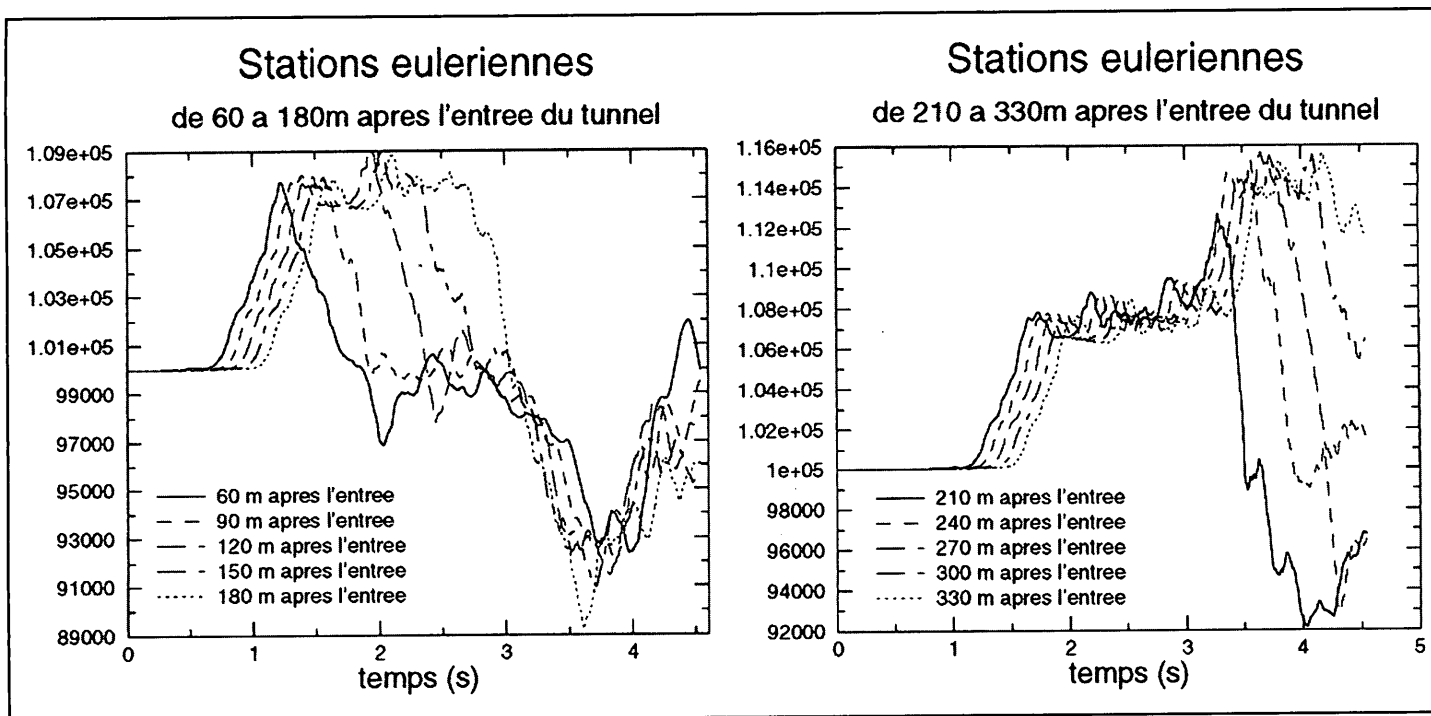


Figura 6 : Datos de presión para un tren desplazándose a 300 Km/h a través de un túnel con una sección de 56,7m<sup>2</sup>.

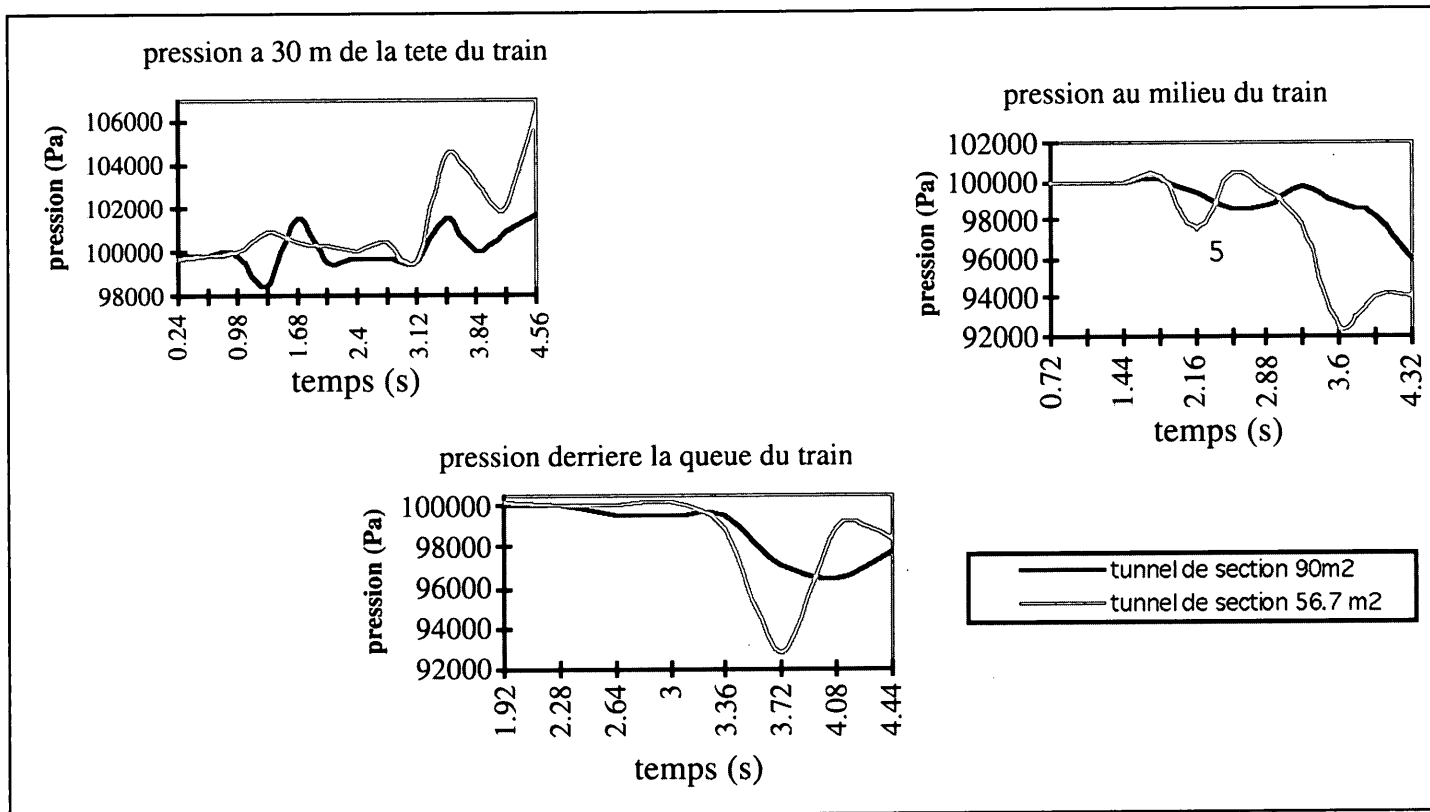


Figura 7. Comparación de los datos de presión para un tren desplazándose a 300 km/h a través de un túnel con una sección de 90m<sup>2</sup> y 56.7 m<sup>2</sup> (las presiones se miden en el centro del tren).

**TABLA 3 : CARACTERÍSTICAS DE LAS SIMULACIONES**

	Velocidad del tren	Sección de los trenes	Sección de los túneles	Relación de Bloqueo
1ª simulación	300 Km/h	8 m <sup>2</sup>	90 m <sup>2</sup>	0,089
2ª simulación	300 Km/h	8 m <sup>2</sup>	56,7 m <sup>2</sup>	0,141
3ª simulación	350 Km/h	9,12 m <sup>2</sup>	56,7 m <sup>2</sup>	0,161

▼ La máxima amplitud de la presión en función de los registros de tiempo de una estación euleriana representada por un sensor fijo es de aproximadamente 10KPa,

▼ El nivel de presión es mayor que el correspondiente resultado reflejado por [4]. Esta diferencia puede ser debida a la simplicidad de la geometría y a la simplicidad del modelo que viene representado por una modelación axil simétrica,

▼ El nivel de presión depende en gran medida de la configuración del tren. La amplitud máxima es igual a 20 KPa para un tren de configuración "cilíndrica" y de 10 KPa para un tren de configuración en forma de flecha.

▼ La máxima presión se alcanza en el "tapón de aire" que se crea en la parte delantera del tren.

No obstante, se observa que :

▼ La distribución de las velocidades del flujo de aire es aceptable, en relación al tamaño de la retícula. Para los siguientes cálculos, se supondrá una retícula de 25 cm por celda en la zona crítica.

▼ Un túnel de 700 metros de longitud es suficiente para que no existan ondas reflejadas que pudieran producir perturbaciones en los cálculos.

Estos resultados permiten obtener una buena idea de los fenómenos y de la magnitud de las ondas transitorias de presión que se producen en los túneles de ferrocarril. En consecuencia, llegamos a la conclusión que el programa OURANOS arroja buenos resultados y permite estudiar configuraciones más realistas.

#### **4. ESCENARIO DE SEGURIDAD Y CONFORT**

Esta fase se ocupa de la realización de simulaciones sobre configuraciones reales que permitan cuantificar la velocidad y la presión del aire en relación a las especificaciones de seguridad y confort exigidas:

▼ Para el escenario de seguridad, la máxima amplitud de presión debe ser inferior a 10 KPa durante 4,4 segundos,

▼ Para el escenario de confort, la máxima amplitud de presión debe ser inferior a 2,5 KPa durante 4,4 segundos.

#### **4-1 SIMULACIONES 2D**

En este apartado, se ha asumido la hipótesis de que la sección del túnel, la del tren y la velocidad de éste son los únicos parámetros que inciden en la magnitud de los transitorios de presión generados por los trenes al desplazarse. Como ejemplo, se han realizado cálculos axil simétricos 2D con la configuración de tren "en forma de flecha" que aparece en la figura 1. Se ha relacionado el nivel de presión a la relación de bloqueo y a la velocidad del tren.

Las primeras dos simulaciones se ocupan de la fase crítica de la entrada de un tren desplazándose a 300 Km/h en un túnel durante 4,4 segundos.

La tercera simulación tiene en cuenta la entrada de un tren en un túnel de vía única para el escenario de seguridad. Estos resultados hay que compararlos con los de un tren desplazándose por un túnel de vía doble.

Las secciones de túnel y tren y las velocidades de circulación, aparecen reflejadas en la Tabla 3.

#### **Resultados**

Los resultados de las figuras 5, 6 y 7 muestran:

▼ Que la máxima amplitud de variación de la presión según los registros de tiempo de una estación euleriana es de aproximadamente 13KPa, para una relación de bloqueo de 0,089 (1ª simulación) y de 21 KPa para una relación de bloqueo de 0,141 (2ª simulación),

▼ La máxima variación de presión en el centro del tren es dos veces mayor para una sección transversal de 56,7 m<sup>2</sup> (8 KPa) que para una de 90 m<sup>2</sup> (4 KPa).

▼ La máxima variación de presión es de aproximadamente 24 KPa (relación de bloqueo de 0,161) para un tren que se desplace a 350 Km/h. Este valor hay que compararlo con el valor de 21 KPa (relación de bloqueo de 0,141 y una velocidad de 300 Km/h). Llegamos a la conclusión que la influencia de la velocidad es menos importante que la de la relación de bloqueo.

▼ Para la tercera simulación, la presión es igual a 9 KPa en el centro del tren.

▼ El flujo de aire está sujeto a esfuerzos cortantes entre la carrocería del tren y el muro del túnel.

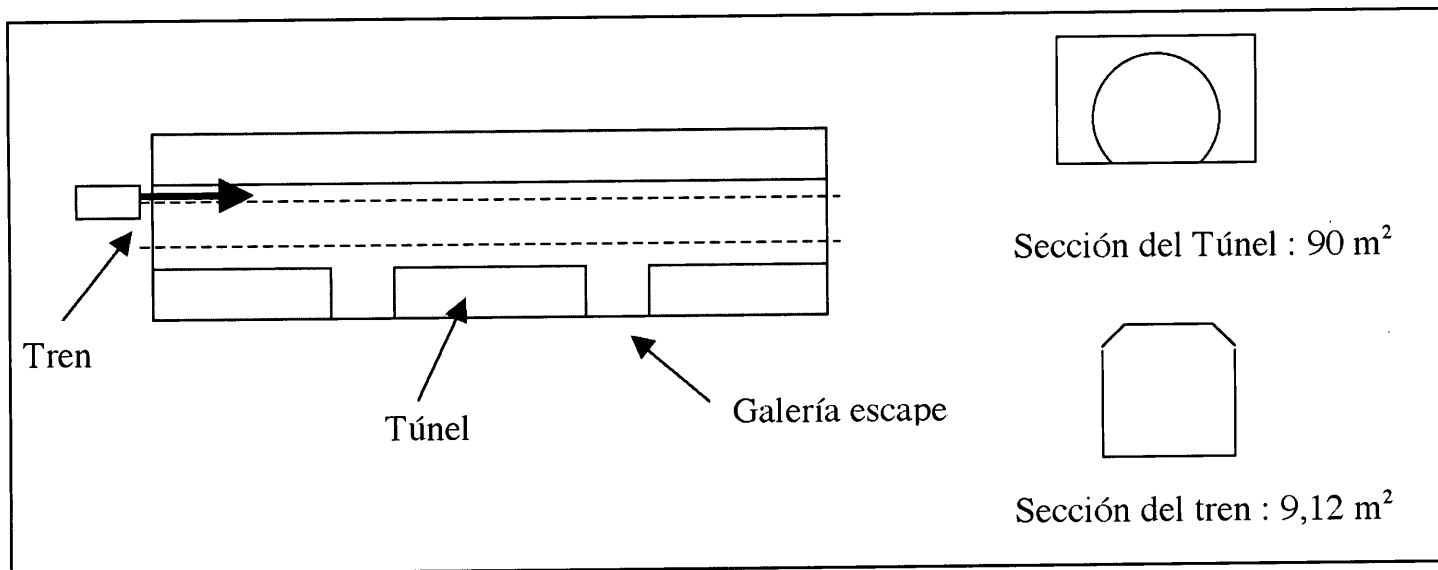


Figura 8 : Configuración inicial y secciones transversales.

## Conclusiones

Los estudios axilimétricos 2D permiten cuantificar los niveles de presión debidos a trenes de alta velocidad que se desplazan por un túnel. Estos niveles son en general más altos que los calculados por otros métodos [4], si bien se cuantifican según relaciones de bloqueo. Por ejemplo, La máxima amplitud es dos veces mayor para una sección transversal de  $56,7 \text{ m}^2$  que para una de  $90 \text{ m}^2$ . Por otra parte, se observa la influencia de la velocidad del tren. Con objeto de aproximar de una forma más realista estos fenómenos, se procede a realizar los cálculos 3D.

### 4-2 SIMULACIONES 3D

Estas simulaciones se refieren al desplazamiento de uno o dos trenes a lo largo de un túnel de doble vía. Se realizaron con el tren en forma de "flecha" representado en la figura 1. Las configuraciones estudiadas han sido las siguientes:

- ▼ El desplazamiento de un tren a lo largo de un túnel de doble vía,
- ▼ Un tren que viaja en la dirección opuesta se cruza con otro tren averiado que se ha detenido en frente de una galería de escape,
- ▼ El cruce de dos trenes en la zona más crítica: la situada entre dos galerías de escape.

#### 4-2-1 DESPLAZAMIENTO DE UN TREN A LO LARGO DE UN TUNEL DE DOBLE VIA.

Se ha considerado un tren desplazándose a una velocidad de  $300 \text{ Km/h}$ , en un túnel de doble vía. La configuración y las secciones transversales aparecen indicadas en la figura 8.

## Resultados

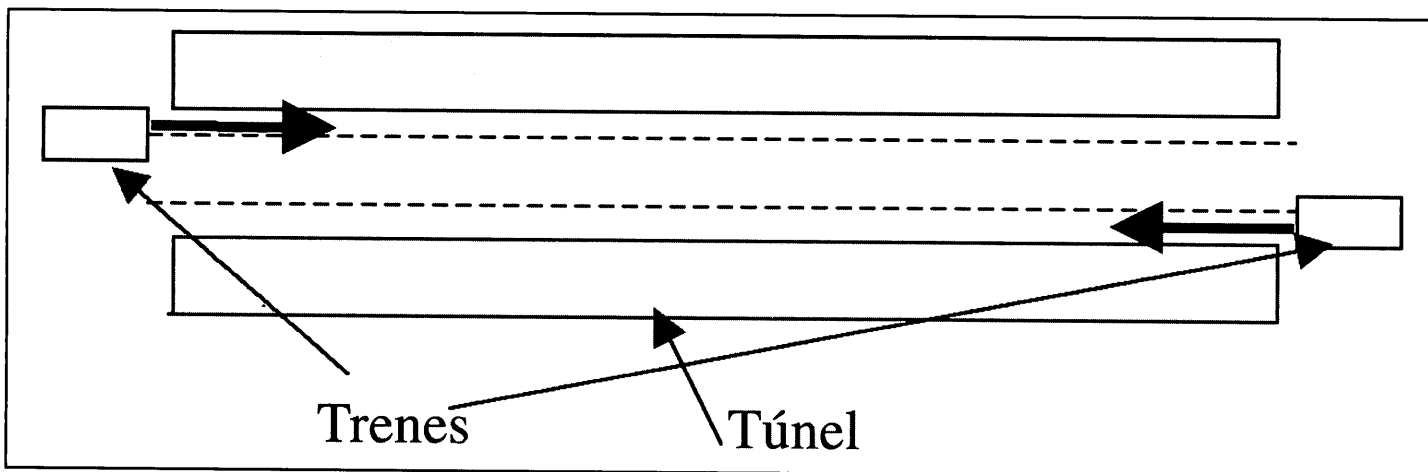
- ▼ La máxima variación de presión es igual a  $10 \text{ KPa}$ ,
- ▼ En el centro del tren, la máxima amplitud de variación de presión es inferior a  $3 \text{ KPa}$  durante  $4,4$  segundos, para una relación de bloqueo de  $0,101$ . Si comparamos este valor con los resultados obtenidos en el párrafo 4-1, se puede confirmar que una configuración axisimétrica 2D sobrealora la presión. En consecuencia, la especificación del escenario de confort queda cumplida para un tren con una sección transversal de  $8 \text{ m}^2$ .

#### 4-2-2 CRUCE DE DOS TRENES EN LA ZONA MAS CRITICA: LA SITUADA ENTRE DOS GALERIAS DE ESCAPE

Esta simulación se refiere al cruce de dos trenes en la zona más crítica: la situada entre dos galerías de escape. Esta configuración aparece representada en la figura 9. Los dos trenes se desplazan a una velocidad de  $350 \text{ Km/h}$ .

## Resultados

- ▼ La máxima amplitud de variación de presión en el túnel es igual a  $38 \text{ KPa}$ . Este valor es muy alto, pero se puede explicar por el "tapón de aire" que se forma delante del otro tren que se cruza.
- ▼ En el centro del tren, la máxima amplitud de variación de presión en el exterior es de aproximadamente  $25 \text{ KPa}$  durante  $4,4$  segundos, para una relación de bloqueo de  $0,101$ . Este elevado valor se debe también al "tapón de aire". En este caso no se cumple la especificación para el escenario de seguridad, si no se supone una cierta estanqueidad en el tren.



**Figura 9 : Configuración inicial.**

#### 4-2-3 CONFIGURACION DE ACCIDENTE

La configuración aparece indicada en la figura 10. El tren se desplaza a una velocidad 350 Km/h por el interior del túnel. El tren que se ha detenido está situado en frente de una galería de escape, situada en el lado opuesto.

tren y el muro del túnel (la dirección de la corriente de aire se invierte),

▼ A medida que el tren se aleja, la velocidad de la corriente de aire está en torno a 30 m/s, durante los primeros segundos. A partir de este punto, cae rápidamente hasta aproximadamente 5 m/s. Este valor es el que se debe utilizar en las estrategias de escape en caso de incendio.

#### Resultados

▼ La máxima variación de presión es igual a 10 KPa. Este valor es el mismo que el de la presión generada cuando sólo un tren se desplaza a 300 Km/h, a lo largo de un túnel de doble vía,

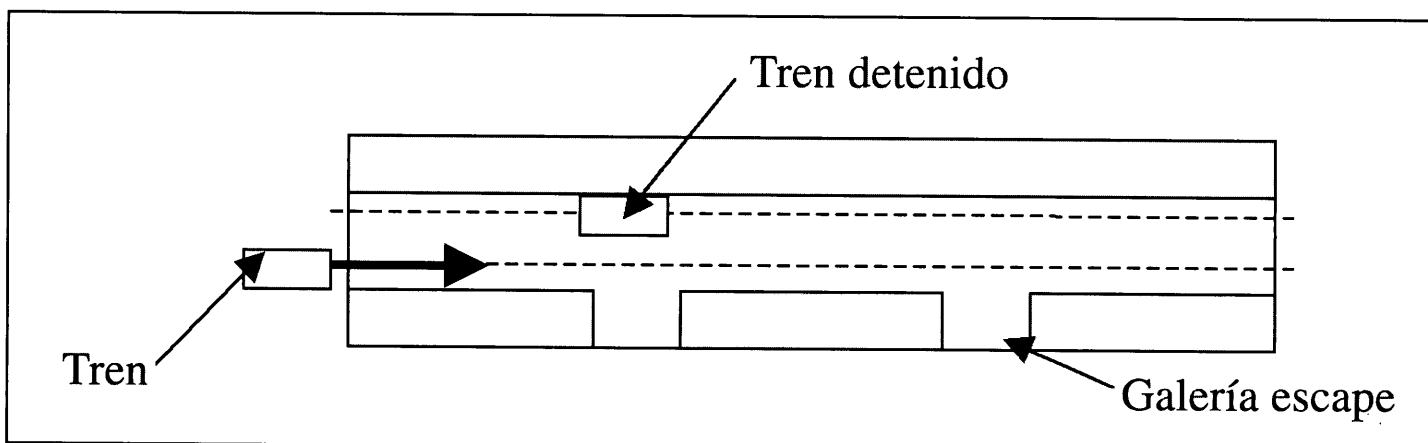
▼ En el centro del tren, la máxima amplitud de variación de presión es inferior a 5 KPa durante 4,4 segundos, para una relación de bloqueo de 0,101,

▼ Como podemos ver en la figura 11, la corriente de aire está sujeta a esfuerzos cortantes entre la carrocería del

#### 5. CONCLUSIONES

Se han realizado varios cálculos relativos a la circulación de trenes de alta velocidad en configuraciones 2D y 3D. Estos cálculos permiten cuantificar la intensidad de los transitorios de presión generados por los trenes cuando se desplazan por túneles de doble vía o de vía única.

La fase de validación ha dado buenos resultados. En consecuencia, en una fase posterior, se han podido estudiar configuraciones reales con objeto de ver la influencia que ejercen la



**Figura 10 : Configuración inicial.**

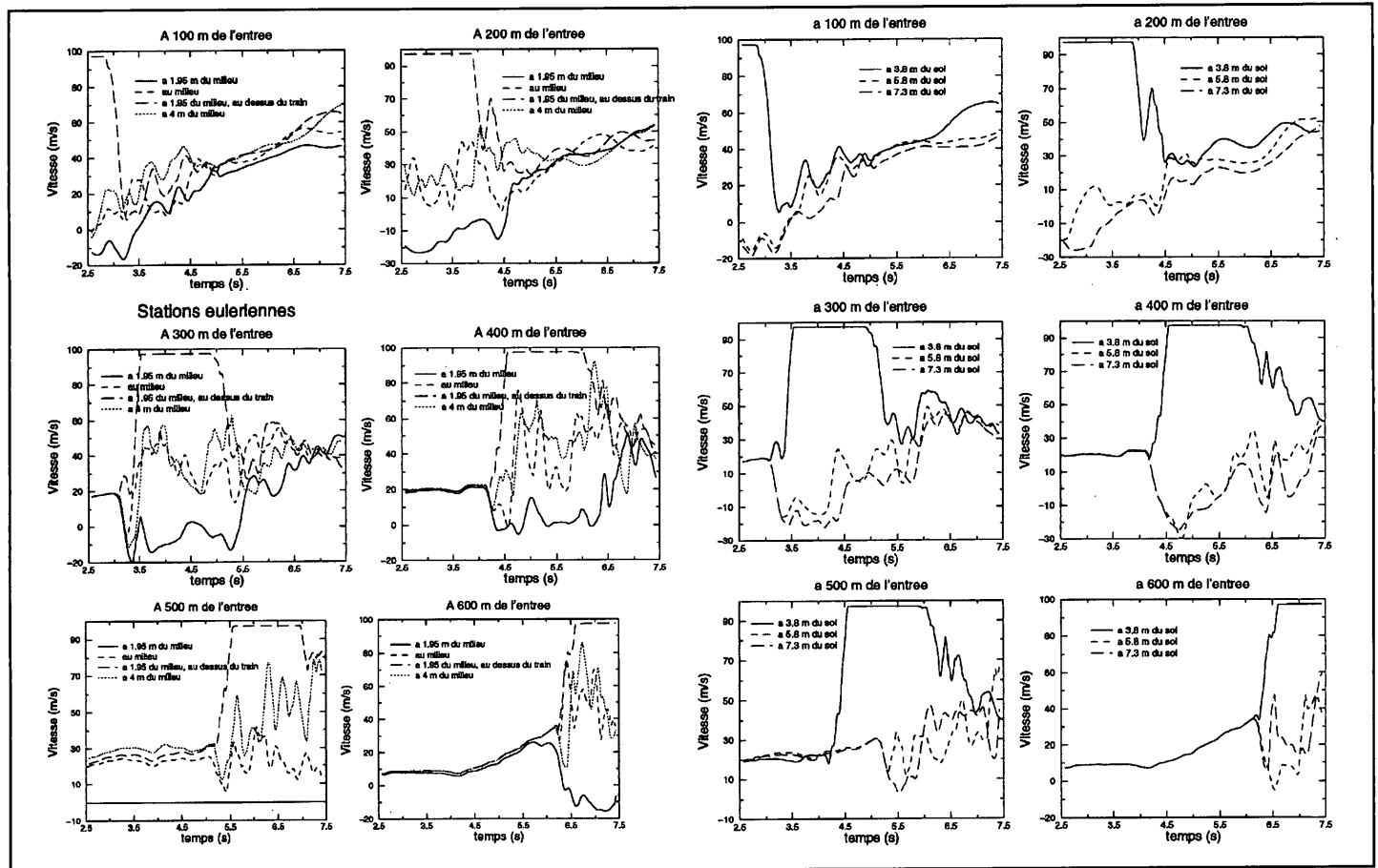


Figura 11 A: Perfiles de velocidades en el túnel, sobre la horizontal.  
Figura 11: Gráfico velocidades - tiempos en el túnel.

Figura 11 B : Perfiles de velocidades en el túnel, sobre la vertical.

velocidad del tren y la relación de bloqueo; dicha relación de bloqueo se debe extrapolar a otras secciones transversales de trenes y túneles.

Con las configuraciones 2D, se observa que la variación de presión es doble en un túnel de vía única (con una sección transversal igual a 56,7 m<sup>2</sup>) que en un túnel de doble vía (con una sección transversal igual a 90 m<sup>2</sup>). Una simulación 3D demuestra que se cumplen las especificaciones del escenario de confort, dado que el nivel de presión es inferior a 3 KPa.

Para el escenario de seguridad, un cálculo axilimétrico 2D arroja una máxima amplitud de variación de presión de 9 KPa durante 4,4 segundos. Una simulación 3D de trenes que se cruzan en la zona más crítica situada entre dos galerías de escape, arroja un nivel de variación de presión alto. En este caso, se deberá aumentar la sección transversal del túnel, si no se confía en la estanqueidad de los trenes.

Se ha estudiado también el escenario de un tren que se desplaza por un túnel a una velocidad 350 Km/h y se cruza con otro tren que se ha detenido enfrente de una galería de escape, situada en el lado opuesto. Este escenario permite definir las es-

trategias de escape en caso de incendio, utilizando las velocidades obtenidas con estas simulaciones.

## REFERENCIAS

- [1] Chasse, P and Fort, L "Simulation of fire in a railway system with long double track tunnels. Escape strategies" ITC Fourth Int. Conf. "Safety in Road and Rail Tunnels". Madrid April 2001.
- [2] Steinberg, D. J. "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials" UCRL—MA—106439, Febrero 1991.
- [3] Noh, W. F. and Woodward, P "The SLIC (Simple Line Interface Calculations) method UCRL—52111 (1976).
- [4] Peiró, J. "Aerodynamic calculations... ", U.K. Department of Aeronautics Imperial College April 1999

## AGRADECIMIENTOS

Los autores dan las gracias al "Centre d'Etudes de Gramat" por autorizar la publicación de este estudio y por la utilización de sus recursos, programa Ouranos y superordenador. ■