# Gertrude y la contaminación

De la anticipación a la acción



# UN SISTEMA EXPERTO DE GESTIÓN GLOBAL

Diseñado desde el principio como un sistema global que tomara en cuenta todos los parámetros de los desplazamientos en la ciudad, GERTRUDE incluye entre sus objetivos la reducción de la contaminación producida por los vehículos automotores.

Tanto durante los preliminares de la creación del sistema como en los inicios de su aplicación en la práctica, la contaminación siempre ha constituido un parámetro importante en el

funcionamiento de la gestión de la circulación aplicada por GERTRUDE.

A raíz de ese planteamiento y considerando tres razones complementarias: seguridad, eficiencia y protección del medio ambiente, GERTRUDE determinó 43 KM/H como VELOCIDAD MEDIA de progresión de las ondas verdes<sup>1</sup>.



En materia de **SEGURIDAD**, 43 Km/h constituye la velocidad a la cual los riesgos de accidentes que involucran vehículos de dos ruedas y automóviles particulares o camiones se reducen de manera importante y las consecuencias de estos accidentes se minimizan.

En términos de **EFICIENCIA**, esa velocidad también resulta la más adecuada para obtener los flujos vehiculares más importantes, ya que se evitan los efectos de estiramiento debidos a una velocidad mayor. Además, esta velocidad no relega ni los vehículos ligeros de dos ruedas ni los de transporte colectivo, que pueden mantenerla sin problemas.

Finalmente, en lo que se refiere a la **PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE**, es a 43 Km/h que se logra el mejor resultado para que la emisión de ruidos y de contaminantes se reduzcan al mínimo. En efecto, cuando la velocidad de desplazamiento de los vehículos automotores aumenta, el ruido y las emisiones de NOx se incrementan, mientras que la contaminación atmosférica originada por otros contaminantes tales como CO, CO<sub>2</sub> y partículas sólidas suspendidas disminuye.

<sup>1</sup> Onda verde: Regulación de la circulación por medio de la sincronización de los semáforos

# Una jerarquía de eslabones

El principio de funcionamiento del sistema GERTRUDE de gestión de la circulación se basa en una sencilla comprobación de la realidad que se repite en cada ciudad: no todas los tramos de vía tienen la misma importancia aunque tengan calzadas del mismo ancho.

En efecto, entre las arterias que irrigan un barrio, incluso cuando son del mismo ancho o comportan el mismo número de carriles, algunas vías son más transitadas que otras. Por lo tanto, para facilitar la circulación, el sistema mantiene una fluidez permanente en los sectores más solicitados, para evitar su saturación.

Así, disminuyendo la velocidad del flujo de vehículos, sólo cuando es necesario y en los tramos menos transitados de la red, la contaminación global se reduce, ya que la mayoría de los vehículos se encuentra en condiciones apropiadas para emitir un mínimo de contaminantes.

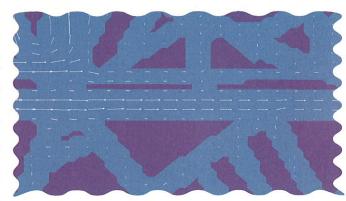
La elección de los sectores o eslabones donde se limitará la velocidad, a proximidad de espacios verdes o en las calzadas más amplias, también permite garantizar una dispersión más rápida de la contaminación, generando un mínimo de molestias ambientales.

## Una circulación fluida

Con el fin de lograr una fluidez permanente, el sistema GERTRUDE mantiene vigentes ondas verdes dinámicas, no sólo en las vías más importantes, sino principalmente en los recorridos más frecuentados de la ciudad. De esta manera, la mayoría de la circulación transita en un flujo uniforme, a casi todo lo largo de sus recorridos, es decir, con un mínimo de paros en los semáforos, logrando con ello un tránsito tranquilo, fluido y regular.

El hecho de que la contaminación emitida por los vehículos en circulación alcance su máximo cuando éstos aceleran, hace que las tasas medidas en los sectores gestionados por el sistema GERTRUDE sean sensiblemente inferiores para un tránsito equivalente a las que se presentan en los mismos sectores cuando no son controlados por GERTRUDE.

Así, la tasa horaria de CO que aumentaba regularmente hasta alcanzar **78 ppm** en la avenida Clemenceau, en Burdeos, nunca ha vuelto a rebasar **32 ppm** desde la implantación de GERTRUDE. De la misma manera, en la calle Augusta en Lisboa, donde las tasas pico de monóxido de carbono llegaban a **86 ppm** por hora, pasaron a **30 ppm** a partir de la implantación del sistema.



No obstante, en ambos casos el número de vehículos que pasaba cada hora en esas calles se había incrementado sensiblemente (aproximadamente en un 50%) a raíz de una mejoría en las condiciones de circulación.

# Una verdadera experiencia en la gestión de la contaminación

Habiendo integrado, desde su diseño, el elemento contaminación como un parámetro esencial en la gestión de la circulación, el sistema GERTRUDE elaboró estrategias en tiempo real, específicas a la contaminación atmosférica producida por los vehículos automotores, para poder actuar sobre el tránsito y minimizar el riesgo de rebasar los umbrales.

Desde 1980 los softwares de aplicación de estas estrategias han podido ser utilizados en Burdeos, con los datos proporcionados por una red de medición de CO constituida por 24 captadores instalados en los lugares más sensibles de la ciudad.

Optimizados permanentemente y en comunicación constante con el Instituto Europeo del Medio Ambiente de Burdeos, han permitido a GERTRUDE forjarse una verdadera experiencia en materia de tratamiento de la contaminación producida por los vehículos automotores mediante la gestión del tránsito.

# UN MODELO PARA UNA SOLUCIÓN CON TRES OBJETIVOS

La solución propuesta hoy por GERTRUDE para luchar contra la contaminación atmosférica producida por los vehículos automotores consiste en considerar este dato como un parámetro prioritario en la gestión de los desplazamientos, con un triple objetivo:

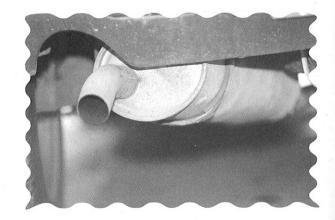
- 1) Evitar los picos de contaminación, retrasando al máximo su aparición.
- 2) Reducir de manera progresiva, flexible y sin brutalidad, la densidad de la circulación sector por sector y/o en el conjunto de la ciudad, en caso de riesgo de surgimiento de esos picos.
- 3) Poder planificar a corto y a mediano plazo, gracias a los modelos de predicción y de simulación, para evaluar el impacto sobre el medio a mbiente de las medidas contempladas, relativas a los transportes colectivos y/o las infraestructuras.

Para lograrlo, el sistema recurre a diferentes módulos de predicción y de acción:

### Un módulo de modelización de emisiones y de dispersión de contaminantes producidos por los vehículos automotores

Este módulo permite reconstituir de manera precisa las tasas de contaminación en cualquier punto del sector estudiado y predecir la evolución en función de los diversos parámetros, incluyendo los

componentes meteorológicos. Esta herramienta se basa sobre métodos de cálculo desarrollados en el laboratorio MASTER de la escuela de Química de Burdeos. Recibe los datos procedentes del módulo de gestión y modelización del tránsito y se ajusta a la realidad, mediante las mediciones de contaminación que pueden llegarle ya sea de los captadores específicos del sistema o de los de la red de vigilancia de la calidad del aire.



#### Un modulo de modelización del tránsito

Este módulo, basado en códigos informáticos desarrollados por GERTRUDE, permite reconstituir el conjunto de los flujos vehiculares en función de la topografía de la red vial y del estado de la circulación, tal como lo miden los captadores y, en cierta medida, predecir su evolución. Una de sus aplicaciones consiste en un simulador de tránsito que permite reflejar fielmente el comportamiento y el estado de la circulación en una situación dada y, por consiguiente, estudiar y predecir los niveles de contaminación.

#### Módulos de acción

Estos módulos son los algoritmos del sistema Experto de gestión del tránsito GERTRUDE que reaccionan en tiempo real a las evoluciones de la situación, con el fin de alcanzar el triple objetivo previamente definido en materia de medio ambiente. Así, después de haber estudiado el conjunto de los datos de una ciudad y gracias a las herramientas proporcionadas por los modelos de emisión y dispersión de la contaminación y de simulación del tránsito, GERTRUDE puede aplicar e implementar en el sistema de gestión de la ciudad, los diversos algoritmos necesarios para satisfacer sus requerimientos en materia de medio ambiente, tomando en cuenta sus exigencias específicas.

### La modelización de los contaminantes

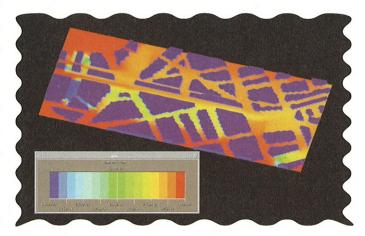
#### Un módulo tridimensional

El modelo de GERTRUDE es un módulo tridimensional en volumen terminado, desarrollado para simular la emisión y la dispersión de los contaminantes emitidos por los vehículos.

Realizada en un medio urbano o semiurbano, esta modelización toma en cuenta la topografía y la meteorología, los obstáculos y los edificios, las reacciones químicas, así como la influencia de la

vegetación y la naturaleza del terreno, sobre la dispersión. También puede integrar y tomar en consideración los efectos de la radiación solar y las condiciones atmosféricas.

Los contaminantes gaseosos (NOx, CO, HC O<sub>3</sub>...) o partículas (partículas sólidas suspendidas, Pb...) emitidos por los vehículos se calculan a partir de los datos de tránsito (flujos horarios, tipos de vehículos, velocidad, condiciones de circulación, cruceros, semáforos, vehículos parados) proporcionados por mediciones en tiempo real y/o de archivos.



Para el cálculo de dispersión también podrán integrarse otro tipo de fuentes, tales como las emisiones producidas por chimeneas industriales cercanas, por la calefacción urbana o cualquier otra causa.

#### El enfoque matemático

#### La capa límite urbana

Antes de estudiar el desplazamiento de los contaminantes es necesario tener un buen conocimiento de los movimientos del aire en las áreas urbanas, que producen cabo en las capas bajas de la atmósfera y, más particularmente, en un espacio comprendido entre el suelo y 4.5 veces la altura promedio de los edificios de la ciudad, espacio denominado capa límite urbana.

Porque si de manera general los movimientos atmosféricos son relativamente turbulentos, resultan particularmente complejos en el interior de esa capa, debido a la heterogeneidad de la topografía de las ciudades (recirculación múltiple, estelas, etc...).

Además, la importancia de los efectos térmicos sobre la estructura misma de la capa límite urbana y sobre los movimientos de aire que en ella se producen, requiere la realización de un balance radiativo de la superficie.

#### Las ecuaciones de la dinámica y de la térmica

El enfoque euleriano considerado se basa en las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos que traducen los principios de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía. El sistema de ecuaciones obtenido se complementa además con una ley de estado que tiene por objeto tomar en cuenta las variaciones de la masa volúmica en función de la temperatura, así como con un conjunto de condiciones límites e iniciales.

Para las condiciones de entrada a la velocidad, se utiliza en primer lugar un perfil de viento logarítmico antes de utilizar datos meteorológicos más precisos.

#### Modelización de la turbulencia

Sistema imprevisible, desordenado, con fuerte capacidad de mezcla y que implica una amplia gama de escalas espaciales, la turbulencia puede, en lo absoluto, ser modelizada en todas sus escalas gracias a un sistema de ecuaciones definido previamente con una trama del orden Re<sup>9/4</sup> que rebasa los límites actuales de la informática.

Sin embargo, a pesar de su carácter aleatorio, se puede modelizar la turbulencia mediante un enfoque estático, determinando las características promedio de los movimientos del aire, con un sistema apropiado de ecuaciones.

El paso de las ecuaciones deterministas a las ecuaciones estáticas se basa en la descomposición de Reynolds, donde todo campo se descompone en un campo medio y en un campo fluctuante de promedio nulo.

Por lo tanto, se optó por el sistema k- $\mathbf{\mathcal{E}}$ , modelo de orden 1 a 2 ecuaciones, basado sobre el concepto de viscosidad turbulenta. Pero otros modelos tales como RNG o V<sup>2</sup>f también pueden ser ensayados.

#### Modelización de la dispersión de los contaminantes

Los contaminantes emitidos por los vehículos automotores son de dos tipos: contaminantes primarios (CO, NOx, HC,...) directamente emitidos por los motores y contaminantes secundarios, resultantes de reacciones químicas y fotoquímicas, tales como O<sub>3</sub>. Como se trata de contaminantes pasivos, no afectan la dinámica.

Para modelizar su dispersión se utilizan ecuaciones de difusión para la concentración de contaminantes que comprenden dos términos fuentes.

El primero representa la cantidad de contaminantes emitidos por los vehículos. Las informaciones necesarias para su evaluación (número y velocidad promedio de los vehículos) son proporcionadas por el sistema GERTRUDE. El segundo representa la generación o la destrucción de un contaminante por combinación de reacciones químicas. Algunas mediciones de contaminantes efectuadas in situ mediante captadores fijos y móviles permiten ajustar y validar el modelo. El caso del movimiento de partículas también es tomado en cuenta.

#### Los métodos de resolución

#### El código Aquilón

El programa informático Aquilón se basa en la simulación numérica de las ecuaciones de la mecánica de fluidos y de la térmica, para fenómenos estacionarios o inestacionarios en los medios heterogéneos (fluidos, porosos, sólidos) en presencia de obstáculos de permeabilidad y de geometría variables.

Fue validado en múltiples casos de prueba, tales como el estudio del movimiento de aire detrás de un escalón o alrededor de un cilindro, la convección natural en medio poroso, etc...

#### Los métodos numéricos

El sistema compuesto por ecuaciones fundamentales promediadas y ecuaciones de turbulencia es en primer lugar discretizado en tiempo por un esquema implícito Gear de orden 1 o 2 de diferencias terminadas.

Ya que las ecuaciones son no lineales y acopladas, una serie de iteraciones permite aproximarse a la solución.

- → iteración de acoplamiento entre las ecuaciones;
- → iteración de linearización;
- → iteración de linearización de las ecuaciones de Navier-Stockes por el método "lagrangiano" aumentado, o por el método de proyección.

Luego las ecuaciones se discretizan por el método de los volúmenes terminados sobre una trama cartesiana, homogénea o no, desfasada en velocidad, presión, temperatura, utilizando diferentes esquemas: centrado, upwind, quick.

Los sistemas lineales obtenidos son resueltos mediante un método iterativo de descenso de los gradientes conjugados BICGSTAB, con un precondicionamiento de tipo Jacobi o Milu.



También se utiliza un método adaptativo de refinamiento local multitrama, del laboratorio Master, cuyo concepto estriba en una arquitectura multitrama jerarquizada que utiliza diferentes niveles de tramas: una trama de base que ocupa todo el campo físico y una o varias tramas de zoom sobrepuestas, con un paso de discretización más fino.

## La modelización del tránsito

Fase preliminar indispensable para la implantación de módulos de acción directa sobre el tránsito, la modelización de los flujos dinámicos que constituyen la circulación de la ciudad ha tomado la forma de una previsión a corto plazo de los porcentajes direccionales en los cruceros.

El problema para constituir el conjunto de los porcentajes direccionales de un crucero, es decir el porcentaje de vehículos que en cada ciclo del semáforo deben seguir de frente, dar vuelta a la derecha o dar vuelta a la izquierda por cada una de las cuatro entradas del crucero, residía en su complejidad y en la necesidad de contar con muchas informaciones. En efecto, parecía imposible poder resolver un problema de doce incógnitas con sólo ocho ecuaciones.

La solución consistió en utilizar todas las informaciones proporcionadas por el sistema GERTRUDE y, paralelamente, plantear una nueva ecuación del problema con una programación dinámica. Efectivamente, cada segundo el



sistema GERTRUDE recaba, gracias a su red de captadores - constituida esencialmente por bucles electromagnéticos - informaciones sobre los conteos (N), los intervalos vehículares (I.V.), las filas de espera (F.A.T.) y las tasas de ocupación (T.O.),...

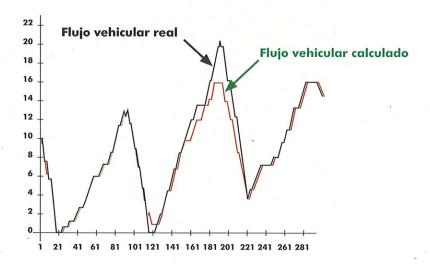
Por lo tanto, para obtener una modelización explotable por los sistemas, se tomó en cuenta el factor tiempo. De esta manera, la modelización temporal obtenida tiene la doble ventaja de tratar cantidades instantáneas y reales, incluyendo todas sus fluctuaciones, y de poder ser aplicada a redes complejas con varios cruceros e incluso a redes entramadas.

Este método de cálculo permite obtener un cierto número de resultados utilizables de inmediato que pueden ser explotados a más largo plazo:

- → la evaluación de los porcentajes direccionales;
- → la evaluación de las velocidades y de los tiempos de recorrido;
- → el estado de cada una de las rutas;
- → las matrices Origen-Destino que permiten realizar estudios a bajo costo sobre los desplazamientos en la ciudad.

La fiabilidad de los resultados obtenidos proporciona además dos ventajas complementarias:

- → una cuantitativa, que ofrece la posibilidad de reducir el número de tomas de información y por consiguiente disminuir el costo de instalación y mantenimiento de la red de captadores;
- → otra cualitativa, ya que una información faltante puede ser reconstituida y que el conjunto de las informaciones cuenta con un seguimiento permanente.



#### De esta forma, se pueden contemplar tres aplicaciones muy positivas:

- → una nueva manera de posicionar los captadores que les permite una mayor eficacia a un costo menor;
- → métodos de guiado de los vehículos e informaciones a los usuarios basadas sobre el estado del tránsito, tal y como lo encontrarán y no como estaba antes de que sean difundidas;
- → métodos de predicción a corto y mediano plazo, indispensables para un control eficiente de la contaminación atmosférica producida por los vehículos automotores.





9 rue de Ségur 33000 BORDEAUX Tel. +33 5 56 99 30 20 - Fax +33 5 56 24 48 89

> E. Mail: info - gertrude @ gertrude.fr Internet: http://www.gertrude.fr