

Utilisation d'images satellites pour l'étude  
des pollutions atmosphériques  
liées à des particules

Influence de ces particules sur la santé publique  
*(en abrégé : Satellites, Particules et Santé)*

Un projet de recherche soumis conjointement au

**CNES : Réseau Terre et Espace**

par

*Météo France*

*la Société de Calcul Mathématique SA*

*l'INERIS*

*EdF-Gaz de France, Service des Etudes Médicales*

*l'INSERM*

22 mars 2001, version 7

## **Première partie : Contexte du sujet et analyse du marché**

Les activités d'origine humaine produisent des rejets atmosphériques, sous forme de particules (autre que les gaz). Ce peut être des pollutions accidentelles, ou des conséquences régulières d'activités normales : véhicules, avions, rejets industriels, activités agricoles, incendies, etc...

Ces particules se retrouvent au sein d'aérosols très fins, qui ne se déposent pas. Ils ont une durée de vie assez longue (deux à cinq jours), et sont donc déplacés par les vents sur de grandes distances. Elles ont une influence sur la santé humaine : les mécanismes d'action diffèrent selon les produits, mais sont assez bien connus.

La détection des particules se fait habituellement grâce à des capteurs au sol ; ces capteurs sont extrêmement coûteux, et, de ce fait, sont peu nombreux. Ils ne prennent en considération, actuellement, que des zones extrêmement réduites et ne savent pas mesurer l'étendue d'une pollution.

L'idée du projet est l'utilisation d'images satellites à la place (ou en sus) des capteurs au sol. Les images satellites sont relativement faciles à obtenir ; elles couvrent de larges zones. On peut mettre en évidence la naissance des particules, puis leur transport : on sait donc que le "panache" de la région parisienne, lorsque les vents le favorisent, parviendra dans telle zone, par exemple dans la région d'Orléans, 48 ou 72 heures après. On cherchera - c'est l'objectif du présent projet - à corréliser cette information avec des informations relatives à la santé publique dans la même région : admissions à l'hôpital pour troubles respiratoires, cardio-vasculaires, allergies cutanées en particulier ; absentéisme pour raison médicale (en particulier pathologies cardio-respiratoires) observé chez les salariés des entreprises EDF et Gaz de France.

Le présent projet concerne l'ensemble du "cycle" : depuis la détection des particules jusqu'à leur action sur la santé, en passant par tous les problèmes de propagation, de diffusion, de réaction, etc.

Il est important de bien comprendre que notre projet est "large échelle" : l'analyse sera faite sur une large échelle, et non localement, ce qui n'aurait pas grand sens, compte tenu de la propagation dans l'atmosphère : ceci est compatible avec la précision de l'image des satellites météo (typiquement 1 à 2 km par pixel pour les satellites météo, davantage pour Polder et TOMS). Nous chercherons à obtenir des informations pour des zones de plusieurs centaines de km<sup>2</sup>.

La précision sur les données d'entrée étant de l'ordre du kilomètre, nous nous efforcerons de rester cohérents tout au long de l'étude. Il ne s'agit pas, insistons-y bien, de mettre en évidence telle modification locale due à telle cheminée d'usine. Pour cette raison, nous nous contenterons de modèles d'atmosphère grossiers, de modèles de chimie simplifiés, etc. Nous espérons parvenir ainsi à des conclusions robustes, c'est à dire qui s'accommoderont bien des incertitudes sur les données d'entrée.

Le problème proposé s'insère dans le cadre des modèles climatiques globaux, qui concernent aussi bien les émissions de gaz et l'effet de serre et, à ce titre, intéresse évidemment les industriels, qui sont soumis à des normes de plus en plus sévères en ce qui concerne leurs rejets.

Notre point de départ sera constitué de données, et non de modèles -première originalité !- Les données sont de toute nature : images satellites, données capteurs au sol, informations météorologiques, données épidémiologiques. Nous savons par avance que ces données seront imparfaites, difficiles à obtenir, difficiles à exploiter...

Nous ne chercherons pas -seconde originalité !- à créer des modèles spécifiques pour les différentes étapes que nous considérons (voir plus bas), mais à adapter des modèles existants, et à les rendre cohérents avec l'ensemble des données. Il existe quantité de modèles, qui vont du microscopique au macroscopique, avec toutes les variantes possibles. Notre travail sera de les rendre robustes et de les faire communiquer entre eux : les modèles utilisés dans les cinq paragraphes que nous exposons plus bas devront avoir la même "granularité" : il ne sert à rien que l'un soit fin, alors que les autres sont grossiers. Cet objectif de cohérence est en vérité très difficile à tenir.

La troisième originalité de notre projet est de vouloir faire travailler ensemble des organismes qui n'ont ni le même statut, ni les mêmes objectifs, ni la même ancienneté, ni le même degré de précision. L'ambition affichée doit être suffisamment forte pour être fédératrice, et en même temps suffisamment souple pour que chacun y trouve son intérêt.

Conformément aux objectifs du Réseau "Terre et Espace", l'ambition ultime est la création d'une structure de valorisation (voir Cinquième Partie, ci-dessous) qui diffuserait des "cartes de risque", en exploitant les images provenant d'un satellite spécialisé qui sera lancé en 2003. On peut donc considérer le présent projet comme une pré-étude de faisabilité permettant de tester cette ambition : à partir d'un jeu restreint de données déjà obtenues, tester le principe de cette approche, dans le cadre d'une méthodologie scientifique aussi rigoureuse que possible.

On trouvera le cadre scientifique précis dans la description fournie par chaque équipe, avec une bibliographie séparée pour chaque sujet : il s'agit de disciplines distinctes, qui collaborent peut-être pour la première fois.

## Seconde Partie : Description du projet

### A. Méthodologie et démarche envisagée

L'organisation du projet est divisée très naturellement en cinq phases :

#### 1. Où sont les particules ?

On distingue grossièrement deux origines :

Les particules dites "primaires", qui sont émises comme telles, par les différentes activités,

Les particules dites "secondaires" qui se créent à partir de gaz qui se condensent localement.

La proportion de chacun des deux types varie selon la zone (citadine ou campagne), et les mécanismes de transformation sont relativement bien connus (voir le paragraphe "INERIS").

A partir de données provenant de satellites (images, analyse de la réflectance, de la polarisation, etc) on cherchera à connaître le taux de particules présentes dans certaines régions et l'évolution de ce taux au cours du temps. Les images satellites sont fournies par Météo France ; elles pourront être complétées par d'autres sources si nécessaire (Landsat, Organisation Mondiale Météorologique, Agences Météorologiques Européennes). Voir ci-dessous la contribution de Météo France pour plus de détails.

Trois sortes de satellites existent :

Les satellites météo usuels, qui ont une résolution de l'ordre du kilomètre. Ils voient la lumière sur trois longueurs d'ondes différentes, mais ne peuvent distinguer les particules. Ils peuvent voir des gouttelettes (taille de l'ordre de 20 à 50 microns), mais les particules sont mille fois plus petites. Ces images satellites nous seront cependant utiles, car elles permettent de vérifier que la zone que l'on observe (à partir des autres satellites) est dépourvue de nuages : la résolution des autres satellites est plus faible, et ne permet pas cette vérification.

Le satellite POLDER voit les particules et les aérosols, y compris au dessus de la terre, mais avec une résolution de 25 km. Il n'a été en activité que 9 mois, en 1997 (le lancement d'autres satellites de même fonction est prévu pour 2003, voir plus bas). Il fonctionne par détection de la polarisation de la lumière, du fait des particules.

Le satellite TOMS sert à l'observation de la couche d'ozone ; il peut voir les particules, par atténuation de la lumière. Cette observation est bonne au dessus de la mer ; un peu moins bonne au dessus de la terre. La résolution est de 100 km. Ce satellite est en activité.

Notons qu'en 2003 un nouveau satellite appelé PARASOL fournira régulièrement ce type de données (PARASOL : Polarisation et Anisotropie des Réflectances au sommet de l'Atmosphère, couplées avec un Satellite d'Observation emportant un Lidar). Son but est de permettre d'améliorer la caractérisation des propriétés radiatives et microphysiques des nuages et des aérosols, nécessaire pour comprendre et modéliser leur impact radiatif (source : CNES). Le présent projet représente donc une pré-étude de faisabilité, réalisée sur données satellites limitées, mais qui deviendront communes en 2003.

On commencera donc par réaliser ce qu'on appellera un "modèle de détection" : quelles sont les particules que les images permettent de détecter ? Quelle taille, quelle nature, quelle densité ? Des études existent déjà sur ces questions (voir la bibliographie) ; nous commencerons par les recenser et évaluer leur pertinence pour le présent projet.

Les particules que les satellites détectent, par variation de la polarisation, sont dans la gamme de taille comprise entre le centième de micron et le micron. Il s'agit notamment des "black carbons", résultant de la combustion des moteurs diesels. Ces particules sont susceptibles de se combiner avec des hydrocarbures de type HAP ; elles pénètrent profondément dans les poumons et possèdent des propriétés mutagènes ; certaines peuvent devenir cancérigènes.

On sait aussi que la présence dans l'atmosphère de certaines particules est susceptible de modifier la pluviosité : derrière les zones industrielles, les gouttelettes de pluies sont réduites et donc précipitent moins.

Ce fait a été prouvé sur une grande échelle, de manière indiscutable, pour la première fois en 1998, en utilisant des données satellites concernant la région de Pékin : la pollution due aux activités humaines crée des particules qui modifient la pluviosité sur une zone d'environ 1 000 km en mer de Chine (source : Météo France).

Ce qui vient d'être dit concerne surtout les particules primaires. Pour les particules secondaires, nous examinerons les mécanismes de formation, et nous utiliserons les images satellites pour mettre en évidence les pollutions qui, par la suite, conduisent à la création des particules secondaires.

Les satellites de type POLDER ne voient que par beau temps, mais ceci ne constitue pas un obstacle au projet. En effet, quand il y a des nuages, les polluants ne sont pas bloqués dans les couches inférieures de l'atmosphère ; ils diffusent en altitude et de ce fait se dispersent plus facilement. Les situations de beau temps (situations anticycloniques sans nuages) sont donc les seules où on est susceptible d'observer les "panaches" de particules dont nous parlons ici (ce fait s'observe facilement : c'est seulement par beau temps que l'on observe la teinte marron grisée de l'atmosphère que l'on attribue à la pollution).

Le satellite POLDER a effectué deux rotations chaque jour pendant huit mois ; il y a donc une prise de vue diurne. Quatre situations "de crise" ont été recensées et analysées par Météo France : une en hiver et trois au printemps. Elles concernent des zones de dimensions 200 km x 400 km environ, et les observations ont duré de trois à sept jours. Les données satellitaires fournies par Météo France sont donc du type suivant : telle zone, dont les dimensions sont connues, a reçu pendant telle durée (dates connues) un excès de particules en quantité mesurable. Les particules concernées sont celles de dimension inférieure à 2,5 micromètres ; on considère en effet que les particules plus grosses auront sédimenté : elles ne voyagent pas sur plusieurs dizaines ou centaines de km, et c'est à cette distance des sources de pollution (agglomérations) que l'étude se situe.

## **2. Comment se transportent les particules ?**

On utilisera un modèle de propagation des particules : elles partent de tel endroit ou de telle zone, et diffusent sur tel territoire. Ceci requiert des modèles atmosphériques assez

simples (vents dominants, pluviosité, etc). La conversion de particules primaires (qui peuvent disparaître) ou l'apparition de particules secondaires pourra avoir lieu sur la totalité du trajet.

De tels modèles de propagation existent déjà : comme précédemment nous les recenserons et les utiliserons. L'objectif du projet n'est pas de créer de nouveaux modèles de propagation, mais de valider ceux qui existent, en examinant s'ils sont pertinents pour le transport des particules. S'ils ne le sont pas, il y aura lieu d'incorporer des termes correctifs, tenant compte des redépôts en particulier. Lorsque les conditions de température le permettent, les particules peuvent être incorporées à un brouillard, qui devient beaucoup plus chargé qu'un brouillard ordinaire, et donc beaucoup plus dangereux. Une partie des particules sédimente, une autre partie s'évapore et est réincorporée le jour suivant. On peut parfaitement détecter par satellite des situations de brouillard dans des vallées, mais l'impact que ces brouillards peuvent avoir sur la santé humaine n'a jamais été mis en évidence, c'est pourquoi nous préférons aborder la question au niveau des particules en général, sans nous restreindre aux situations de type brouillard.

Au terme des deux premiers paragraphes, on répond ainsi à la question suivante : dans une zone donnée (la zone "d'arrivée"), quelle est la densité de particules ? Elles sont émises ailleurs, et ont été transportées.

### **3. Toxicité des particules présentes**

Il s'agit ici de recenser les connaissances actuelles sur la toxicité des particules aériennes, et éventuellement de les compléter par des expérimentations spécifiques. Les polluants particulaires que l'on retrouve dans l'environnement sont nombreux et de natures très différentes (matériaux biologiques, métaux, aérosols liquides, poussières minérales et organiques...) et les combinaisons observables sont infinies.

Il faudra dans un premier temps établir une relation entre les classes de particules observables, avec les trajectoires et déplacements du panache calculables par Météo France, et les classes de particules pour lesquelles des données de toxicité humaine ou animale sont disponibles. Par exemple, il est possible de faire transporter et déposer (par trajectographie ou grâce aux modèles de Météo France) des particules de diamètre inférieur à 2,5 micromètres en même temps que les "particules diesel", que la toxicologie et l'épidémiologie différencient. On fera dans ce cas l'hypothèse, dans un premier temps, que les effets des classes s'additionnent, mais on pourra aussi la valider partiellement par des expérimentations animales spécifiques.

Il s'agit ici de comprendre les mécanismes de toxicité : par exemple, comment agissent les hydrocarbures présents dans les particules. Nous prendrons en compte les niveaux de concentration des différents polluants ou particules.

Là encore, des études ont déjà été réalisées par l'INERIS (voir le chapitre correspondant), mais ici nous sommes en présence d'une situation spécifique : telles conditions atmosphériques, telles particules, et il faudra voir quelles conséquences peuvent fournir les études générales.

Nous chercherons également à valider les prédictions de concentrations de particules au niveau du sol. L'INERIS a accès à des données de concentrations au sol et pourra en développer de nouvelles si besoin est.

Au terme de ce troisième paragraphe, nous aurons la réponse à la question suivante : en quoi les particules présentes sont-elles toxiques ?

#### **4. Action sur la santé humaine**

Il n'est pas souhaitable de prédire le risque pour la santé humaine, provenant des particules, seulement sur la base des données animales. L'épidémiologie a développé de nombreuses études sur les particules et leurs effets sur la population et ces études serviront de base à l'établissement de relations approximatives entre exposition et risque pour certains effets (comme l'asthme).

Les prédictions faites en terme de risque seront "validées", dans la mesure du possible, à l'aide de données observées sur la population française. C'est pour cette partie que les interventions de l'INSERM et de EdF sont essentielles. La question de la comparaison entre prédictions et données épidémiologiques sur des échelles de temps et d'espace différentes pose des problèmes statistiques qui sont intéressants par eux-mêmes, et l'INERIS y apportera également sa contribution.

Au terme de ce quatrième paragraphe, nous aurons la réponse à la question suivante : quelles conséquences les particules toxiques peuvent-elles avoir sur la santé humaine ? Quelles sont les conséquences épidémiologiques qui pourraient être observables, par exemple lors des admissions dans un hôpital ? Ces conséquences épidémiologiques dépendent non seulement de la teneur en particules, mais aussi d'informations météorologiques usuelles : température, hygrométrie, etc.

#### **5. Corrélation épidémiologique**

Nous effectuerons l'analyse correspondante : les effets sur la santé que les paragraphes précédents laissent prévoir ont-ils été réellement observés, et l'ont-ils été dans un laps de temps en correspondance avec ce que prévoient les modèles de propagation ? Typiquement, pour un déplacement de 100 à 200 km, une corrélation doit être observée au bout d'un laps de temps de deux à trois jours avec les admissions à l'hôpital pour troubles respiratoires, allergies diverses, et problèmes cardio-vasculaires. Il est possible également que certaines maladies infectieuses enregistrent un regain d'admissions, parce que les organismes humains sont affaiblis par la pollution.

Bien que les niveaux de pollution atmosphérique aient été considérablement réduits ces dernières décennies dans la plupart des grandes villes occidentales, la pollution atmosphérique constitue toujours une problématique majeure de santé publique. En effet, plusieurs études épidémiologiques récentes ont rapporté une relation entre marqueurs de pollution et accroissement de la mortalité et de la morbidité cardio-respiratoires, à des niveaux de pollution n'excédant pourtant pas les seuils recommandés par la réglementation (Dockery and Pope 1994 ; Pope, Thun et al. 1995).

Les marqueurs de pollution utilisés dans les études épidémiologiques sont les indicateurs (dioxyde de soufre-SO<sub>2</sub>, particules-FN, dioxyde d'azote-NO<sub>2</sub> et ozone O<sub>3</sub>) communément mesurés par les réseaux de surveillance de l'air extérieur. Ces réseaux

sont constitués de capteurs terrestres fixes et sont implémentés, en France, dans les grandes agglomérations urbaines. La loi sur l'air de 1996 (Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie 1996) prévoit que toutes les agglomérations de plus de 100 000 habitants soient dotées d'un tel réseau de surveillance. Les réseaux de mesure ont pour première fonction l'acquisition de données utiles au respect des réglementations en matière de qualité de l'air ambiant. Ils ne permettent pas d'évaluer l'exposition individuelle des sujets (ce qui constitue d'ailleurs une des principales limites des études épidémiologiques conduites à l'heure actuelle), mais ils fournissent une information globale sur l'exposition des populations en milieu urbain ; à la différence de ce que fournissent les images satellites, ces données d'exposition ne comportent pas d'information d'étendue : quelle est exactement la taille de la zone concernée ?

Cette information d'exposition est absente ou très parcellaire dans toutes les zones du territoire français non couvertes par un tel réseau de surveillance, c'est-à-dire les zones rurales ou les agglomérations de petite taille. Bien que ces zones soient sans aucun doute exposées à un niveau de fond moins élevé, elles peuvent être soumises, sous des conditions météorologiques particulières, à des pollutions dont la source est relativement éloignée. L'utilisation des images satellites aux fins exposées dans le présent projet permettra d'acquérir des connaissances sur ce sujet et ainsi d'affiner les études d'impacts (sanitaires et environnementaux) des émissions liées aux transports ainsi qu'aux activités industrielles.

Une meilleure compréhension des impacts de la pollution permettra de mieux orienter les politiques de réductions d'émissions élaborées au niveau national et international.

Un autre intérêt de ce projet réside dans le fait qu'il permettra d'étudier l'impact de pollutions dont la composition est sans doute différente de celles des grandes agglomérations. En effet, une des difficultés majeures dans l'interprétation des études épidémiologiques est liée au mélange complexe que constitue la pollution atmosphérique. De ce fait, les mesures effectuées par les réseaux de surveillance sont considérées comme des marqueurs de la pollution, sans que l'on puisse pour autant attribuer une variation de la mortalité et/ou morbidité à l'un ou l'autre des composants mesurés.

L'étude de la relation entre pollution et santé dans des zones moins polluées permettrait peut-être d'améliorer les connaissances sur l'effet spécifique de particules fines (qui sont les plus susceptibles d'être transportées à des longues distances de leur source, du fait de leur poids plus faible et donc de leur plus lente déposition, à la différence des particules de taille plus importante).

### **Schéma d'organisation : la collaboration entre les participants**

Elle se fait en ordre logique d' "entrée en scène" :

- Météo France fournit les données (images satellites, et compléments sol) et participe à l'élaboration des modèles de propagation,
- La Société de Calcul Mathématique réalise les différents modèles, en partenariat avec les divers organismes, et coordonne l'ensemble du projet,
- L'INERIS développe les mécanismes de toxicité, en partenariat avec la SCM,
- l'INSERM et EdF, Service des Etudes Médicales, s'occuperont des implications sur la santé humaine.



## Troisième partie : Valorisation des résultats de l'étude

Cette étude cherche à utiliser des images satellites en lieu et place de capteurs au sol ; cette idée, qui est essentiellement nouvelle en ce contexte, peut avoir plusieurs conséquences que nous porterons à la connaissance d'utilisateurs potentiels.

Tout d'abord, l'étude permettra de "dimensionner" les informations futures que devront livrer les satellites : la résolution est-elle suffisante pour conclure ? Sinon, quelle résolution serait souhaitable ? Ces informations sont précieuses pour Météo France.

Elle permettra ensuite de tester la robustesse des modèles : la création, le transport des particules, tout cela résulte de modèles théoriques. Ces modèles sont-ils pertinents, ou doivent-ils être revus ? Ces questions préoccupent non seulement des organismes comme l'INERIS, mais aussi toutes les entreprises qui s'occupent de modèles de pollutions atmosphériques (par exemple Aria Technologies). Nous veillerons donc à informer ces entreprises et organismes des résultats de l'étude.

Enfin, le résultat en soi : la présence de zones polluées par des particules, est intéressant pour toutes les collectivités locales : Villes, Conseils Généraux, Conseils Régionaux.

L'ensemble des résultats sera présenté lors d'un colloque co-organisé par tous les organismes participants.

La SCM rédigera en outre, avec Météo France, un rapport de synthèse simplifié et l'adressera aux responsables des collectivités locales.

A terme, si les résultats de l'étude sont satisfaisants, les partenaires prévoient la mise en place d'une structure de valorisation, qui commercialisera les résultats : le produit fini étant un ensemble de cartes de risques. La trajectographie sera réalisée par Météo France avec la SCM ; à partir de 2003 le nouveau satellite PARASOL fournira les données opérationnelles (PARASOL : Polarisation et Anisotropie des Réflectances au sommet de l'Atmosphère, couplées avec un satellite d'Observation emportant un Lidar).