

DOCUMENTS

La pollution, le temps et le « temps chimique »

Vincent-Henri PEUCH^{*,**}, Anne DUFOUR^{*}, Daniel MARTIN^{*}

Le « temps chimique » dépend du temps qu'il fait. En d'autres termes, les niveaux de concentration des polluants dans l'atmosphère sont intimement reliés à la météorologie : transport ou accumulation à grande échelle de polluants, rayonnement et températures, stabilité verticale... L'été caniculaire 2003 et la pollution photochimique exceptionnelle associée en sont une illustration récente. On n'imagine plus aujourd'hui la météorologie sans l'apport de modèles numériques ; mis en œuvre dans des conditions opérationnelles, ils sont aujourd'hui un maillon essentiel du processus de veille, d'alerte et de protection des personnes et des biens. Concevoir un système similaire pour la composition chimique de l'atmosphère, tel est l'enjeu du projet MOCAGE (Modèle de chimie atmosphérique à grande échelle de Météo-France), initié en 1999 et qui connaît peu d'équivalents dans le monde. En effet, la particularité de ce modèle, développé à Météo-France avec le soutien de l'ADEME, est de prendre en compte le problème de la pollution dans toute sa généralité, depuis l'échelle planétaire jusqu'à l'échelle nationale. MOCAGE présente aujourd'hui le potentiel pour fournir en temps réel une information environnementale « brute » pour les décideurs et les AASQA, qui peut être ensuite finalisée

par la prévision d'échelle fine, par des traitements statistiques ou par une expertise humaine locale.

Une canicule exceptionnelle sur la France et l'Europe

Le terme de « canicule exceptionnelle », largement relayé dans les médias, n'est pas inapproprié pour caractériser les conditions météorologiques de l'été 2003 : c'est l'été le plus chaud que la France ait connu ces 50 dernières années, tant pour les températures minimales que pour les maximales (Figure 1). Il est plus chaud d'au moins 1,5 °C pour les températures maximales que les trois derniers étés les plus chauds (1976, 1983 et 1994) ; il est plus chaud de 3,5 °C pour les températures minimales que la moyenne climatologique de 1950 à 1980, et de 1,4 °C que 1994, le second été le plus chaud dans les archives. En outre, on note sur les 15 dernières années une tendance à l'augmentation de la température minimale et, dans une moindre mesure, de la température maximale. Cette plus forte augmentation des températures minimales est cohérente avec la compréhension scientifique actuelle du changement climatique.

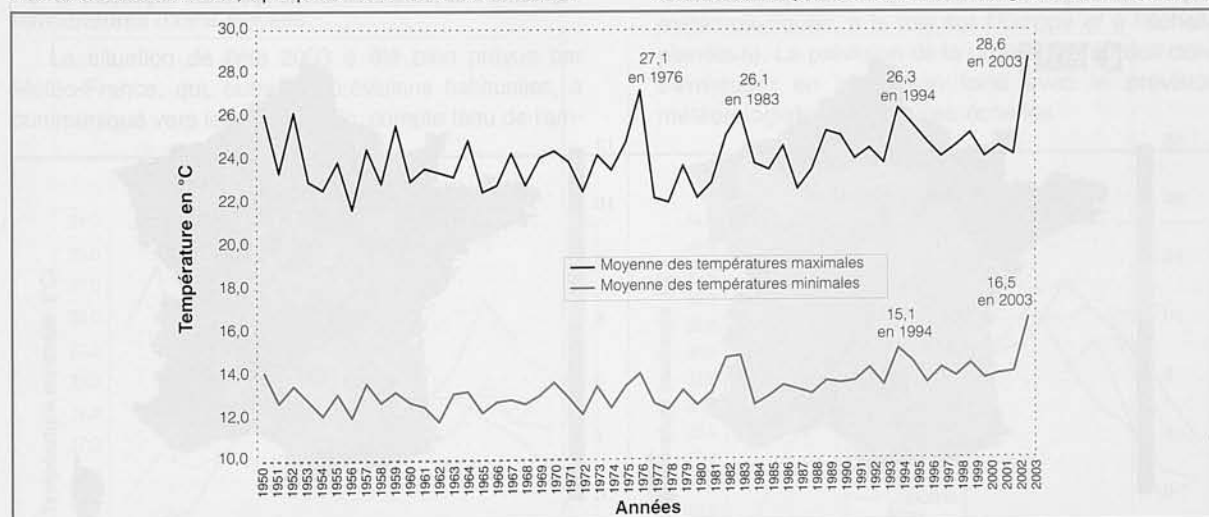


Figure 1.

Moyenne des températures sur la France pour la période du 1^{er} juin au 11 août de 1950 à 2003. Elle est effectuée sur les stations représentatives des 22 régions économiques.

(Source : Météo-France)

* Météo-France. 1, quai Branly, 75340 Paris Cedex 07 - Site Internet : <http://www.meteo.fr>

** Correspondance : Tél. : 05 61 07 96 09 - Fax : 05 61 07 96 10 - E-mail : vincent-henri.peuch@meteo.fr

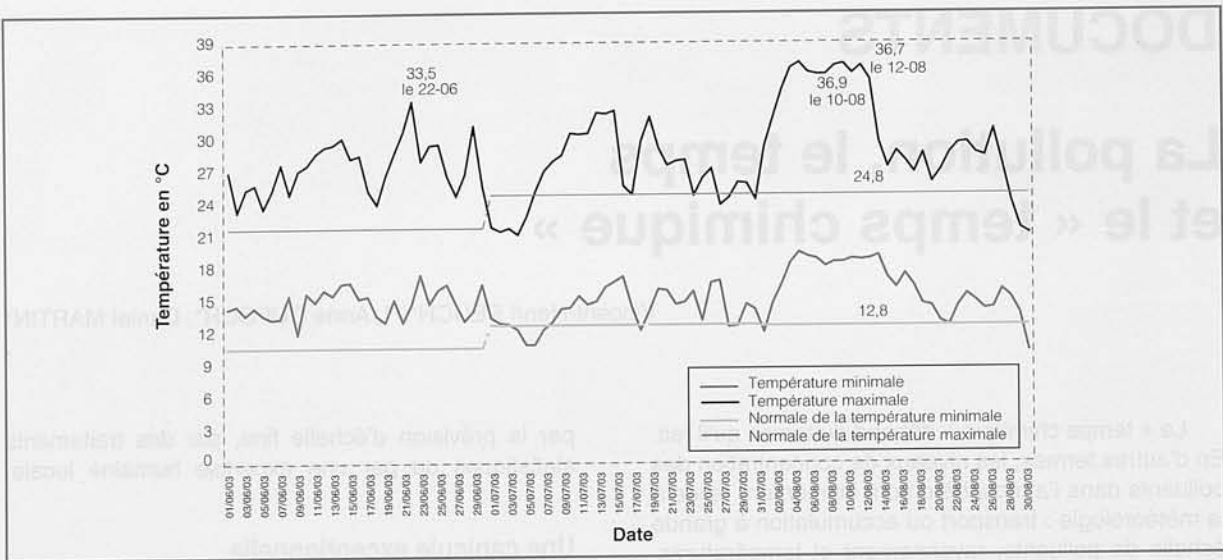


Figure 2.
Températures quotidiennes sur la France pendant l'été 2003.
(Source : Météo-France)

Sur la France, cette canicule a été exceptionnelle par sa durée, de près de deux semaines, et par son intensité (Figure 2). La situation météorologique synoptique associée à cet événement est cependant assez classique en été : des hautes pressions stagnent sur l'Europe de l'Ouest – l'anticyclone des Açores se prolongeant par une dorsale – et forment un obstacle au passage des perturbations orageuses ; on parle de phénomène de « blocage ». Le caractère tout à fait singulier de cette situation est qu'elle a duré bien plus longtemps que d'habitude, et a amené de l'air très chaud et sec en provenance du sud de la Méditerranée en surface comme en altitude. Sur les mois de juin, juillet et août 2003, presque toute la

moitié sud de la France a connu plus de 15 journées avec des températures supérieures à 35 °C (Figure 3a). Des températures supérieures à 40 °C ont été observées dans 15 % des stations (Figure 3b). Presque toutes ces journées dépassant 40 °C sont intervenues entre le 1^{er} et le 18 août (Figure 4b) et on constate, sur la même période, que des températures supérieures à 35 °C ont été observées plus d'un jour sur deux sur une fraction majoritaire du territoire (Figure 4a). D'ailleurs, les records absolus de température maximale ont été battus, au cours des 12 premiers jours d'août 2003, sur plus de 70 stations météorologiques d'un ensemble de 180 stations représentatives de la France métropolitaine.

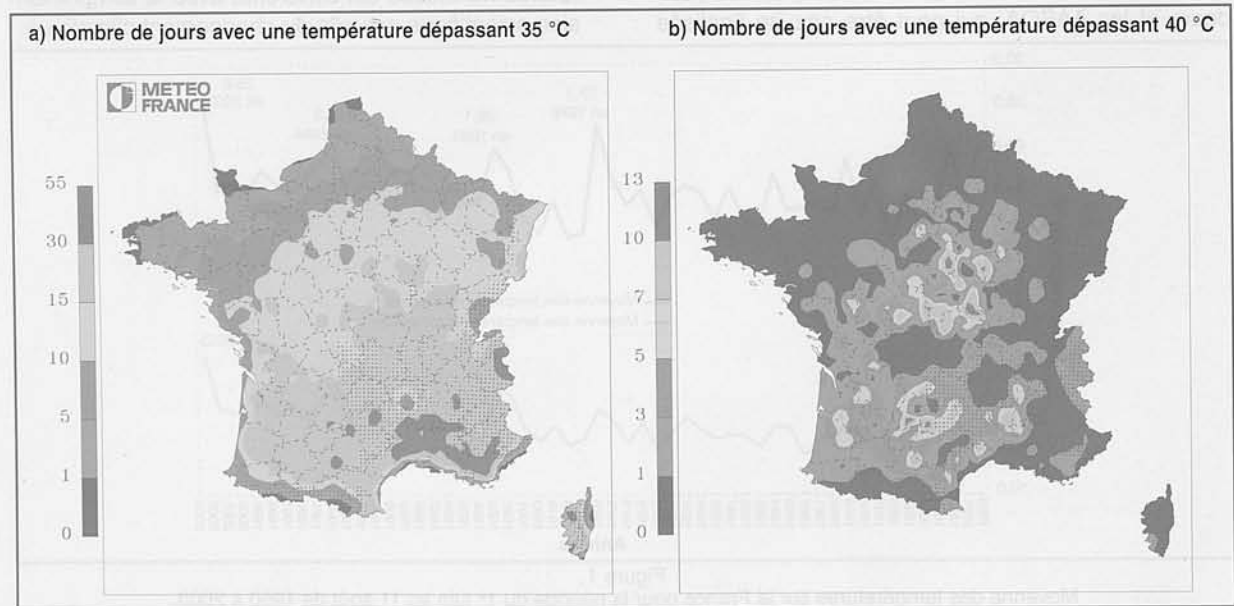


Figure 3.
Nombre de jours où la température maximale a été supérieure à 35 °C (a) et à 40 °C (b) ;
sur la période du 1^{er} juin au 31 août 2003.
Seules les stations dont l'altitude est inférieure à 500 m sont considérées (882 stations au total).
(Cartes : Météo-France)

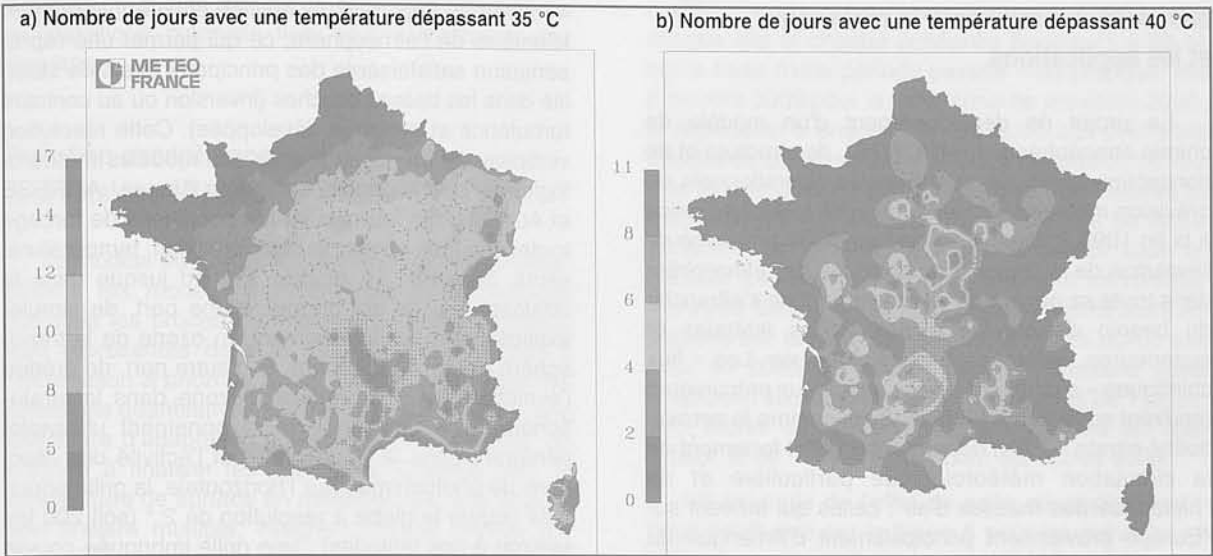


Figure 4.
Nombre de jours où la température maximale a été supérieure à 35 °C (a) et à 40 °C (b) ;
sur la période du 1^{er} au 18 août 2003.
(Cartes : Météo-France)

Cette canicule de la première quinzaine d'août a aussi touché nos voisins européens, mais dans une mesure moindre ; l'Espagne et l'Italie ont ainsi été concernées pendant cette même période. Seule l'Andalousie a connu une canicule plus sévère que la France, mais il faut noter que la population de cette région a un seuil biocritique de température bien supérieur au seuil de celle du nord de la France : 41 °C contre 26 °C. Du 7 au 14 août 2003, à Paris-Montsouris, les températures minimales sont restées le plus souvent au-dessus des 23 °C. Parmi les stations comparées sur la figure 5, seule Lisbonne enregistre des valeurs de températures minimales de cet ordre. En ce qui concerne les températures maximales, du 4 au 12 août 2003, Paris-Montsouris et Orange restent largement au-dessus des 36 °C ; Madrid, également mais avec des températures moins élevées.

La situation de l'été 2003 a été bien prévue par Météo-France, qui, outre les prévisions habituelles, a communiqué vers le grand public, compte tenu de l'am-

pleur de l'événement prévu, le 1^{er} août (annonce de la canicule), le 7 août (poursuite pour encore une semaine), et le 13 août (fin de l'épisode). Le communiqué du 7 août attirait en outre explicitement l'attention sur le risque sanitaire associé. Un dossier complet sur la canicule et son analyse dans le contexte du changement climatique est disponible (<http://www.meteo.fr/meteonet/actu/archives/dossiers/canicule/canicule2003.htm>).

Ces températures exceptionnellement élevées ont été accompagnées d'une généralisation des épisodes photochimiques. D'ailleurs, dans un contexte de baisse des polluants primaires anthropiques sur le plan national depuis le début des années 1990, la pollution par l'ozone ne présente pas de tendance marquée ; elle est principalement caractérisée par une variabilité inter-annuelle forte liée aux conditions météorologiques, à la fois sur l'Europe et à l'échelle planétaire. La prévision de la qualité de l'air doit donc s'envisager en interaction forte avec la prévision météorologique à toutes ces échelles.

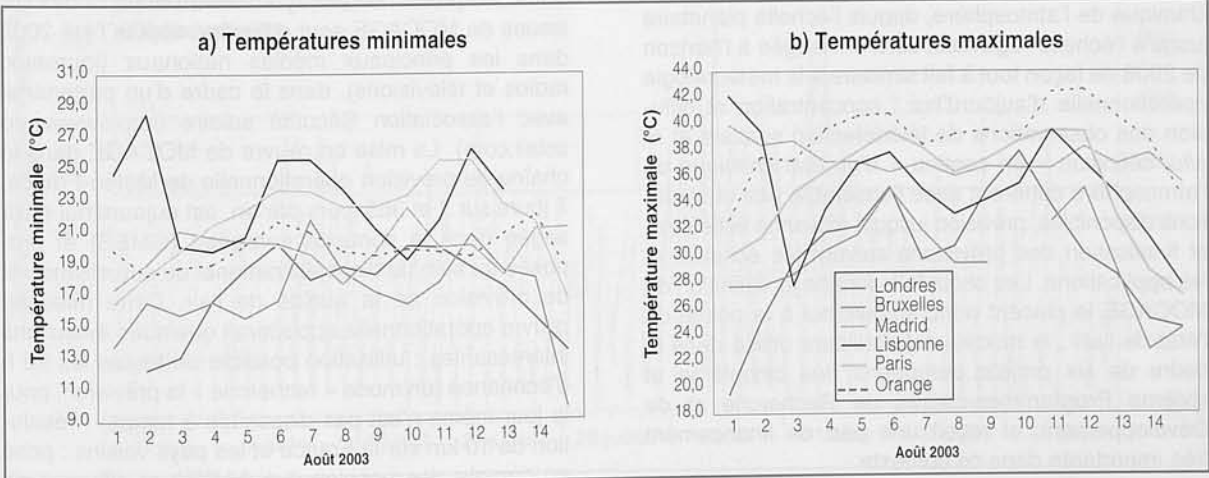


Figure 5.
Températures minimales (a) et maximales (b) dans différentes villes européennes sur la période du 1^{er} au 15 août 2003.
(Source : Météo-France)

MOCAGE, un outil pour la recherche et les applications

Le projet de développement d'un modèle de chimie atmosphérique (MOCAGE), de structure et de conception analogue aux modèles opérationnels de prévision météorologique, a été initié à Météo-France à la fin 1999. L'objectif est de prendre le problème de l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère dans toute sa généralité, et notamment de s'affranchir du besoin de conditions aux limites latérales et supérieures, externes ou climatologiques. Les « flux chimiques » d'ozone et de ses principaux précurseurs (souvent sous forme de réservoirs, comme le peroxy-acétyl-nitrate – PAN) dépendent en effet fortement de la circulation météorologique particulière et de l'historique des masses d'air ; celles qui arrivent sur l'Europe proviennent principalement d'Amérique du Nord, région caractérisée par de fortes émissions anthropiques. Sur la France, on estime la variabilité induite sur l'ozone à une dizaine de $\mu\text{g.m}^{-3}$ en moyenne. Sur la base des campagnes de mesures récentes ESCOMPTE (région de Fos-Berre-Marseille) et Minos (Méditerranée), il existe aujourd'hui un consensus scientifique international pour reconnaître le caractère hémisphérique, voire planétaire, de la pollution ainsi que l'importance des contributions occasionnelles des couches élevées de la troposphère et de la basse stratosphère.

Le modèle MOCAGE décrit l'atmosphère à l'aide d'un ensemble de grilles de calcul imbriquées : la grille principale couvre l'ensemble du globe et s'étend jusque dans la moyenne stratosphère (35 km d'altitude environ) ; trois grilles supplémentaires permettent d'effectuer des zooms pour la prévision sur l'Europe et la France, jusqu'à une résolution horizontale de 10 km environ. Aujourd'hui, quelques projets similaires voient le jour aux États-Unis et au Canada, et MOCAGE apparaît comme un prototype tout à fait adapté aux ambitions du programme GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) de l'Union européenne et de l'Agence spatiale européenne. Dans ce contexte, l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère, depuis l'échelle planétaire jusqu'à l'échelle régionale, sera envisagée à l'horizon de 2008 de façon tout à fait similaire à la météorologie opérationnelle d'aujourd'hui : concentration et diffusion des observations de télédétection spatiale et *in situ*, définition « en continu » d'un état chimique de l'atmosphère cohérent avec l'ensemble des observations disponibles, prévision jusqu'à moyenne échéance, et finalisation des prévisions suivant les échelles et les applications. Les choix faits lors de la définition de MOCAGE le placent donc aujourd'hui à la pointe de l'état de l'art ; le modèle est d'ailleurs utilisé dans le cadre de six projets européens des cinquième et sixième Programmes-cadres de Recherche et de Développement, et reçoit une part de financement très importante dans ce contexte.

Sur la verticale, les différentes grilles de MOCAGE ont une résolution identique et comportent

47 niveaux. Sept niveaux environ couvrent le premier kilomètre de l'atmosphère, ce qui permet une représentation satisfaisante des principaux effets de stabilité dans les basses couches (inversion ou au contraire turbulence et mélange développés). Cette résolution verticale est identique à celle des modèles météorologiques opérationnels de Météo-France, ARPEGE et ALADIN, qui fournissent les conditions de forçage toutes les trois ou six heures : pression, température, vents, humidité. Le modèle s'étend jusque dans la stratosphère, ce qui permet, d'une part, de simuler explicitement l'enrichissement en ozone de la troposphère par la stratosphère, et d'autre part, de prédire l'évolution du profil vertical d'ozone dans la stratosphère, qui conditionne le rayonnement ultraviolet pénétrant dans la troposphère et l'activité des réactions de photochimie. Sur l'horizontale, la grille principale couvre le globe à résolution de 2° (soit 200 km environ à nos latitudes) ; une grille imbriquée couvre l'Europe tout entière et une partie de l'Atlantique à 1° de résolution ; la France et les pays voisins sont couverts à une résolution de $0,25^\circ$, soit 25 km environ. Les résultats présentés ici correspondent à ce dernier domaine. Le modèle possède une représentation très complète des différents processus physiques (advection, diffusion turbulente, convection profonde, lessivage) et chimiques (photolyse, chimie de l'ozone troposphérique et de ses précurseurs, chimie des halogènes) d'importance pour la composition chimique de l'atmosphère. Plus de 120 espèces gazeuses sont aujourd'hui prises en compte, et une version incluant en outre les différentes composantes chimiques de l'aérosol est en cours de développement et d'évaluation.

Tous les jours, depuis mai 2001, des prévisions à 4 jours d'échéance (96 h) sont effectuées et utilisées par le Centre national de recherches météorologiques de Météo-France, notamment dans le cadre de collaborations (comme le projet Pioneer du Programme national de chimie atmosphérique en 2001 et 2002). Quelques résultats des prévisions sont montrés en temps réel, à titre de démonstration, sur le site Internet de Météo-France (<http://www.meteo.fr>). En outre, les prévisions de rayonnement et de l'index UV issues de MOCAGE sont diffusées depuis l'été 2002 dans les principaux médias nationaux (journaux, radios et télévisions), dans le cadre d'un partenariat avec l'association Sécurité solaire (<http://www.info.soleil.com>). La mise en œuvre de MOCAGE dans la chaîne de prévision opérationnelle de Météo-France, 7 jours sur 7 et 365 jours par an, est aujourd'hui envisagée dans le contexte européen (GMES) et proposée au sein du dispositif national de surveillance et de prévision de la qualité de l'air. Cette mise en œuvre opérationnelle apporterait quelques évolutions intéressantes : utilisation possible de toutes les 96 h d'échéance (en mode « recherche » la prévision, pour le jour même n'est pas disponible à temps) ; résolution de 10 km sur la France et les pays voisins ; prise en compte des besoins des AASQA et diffusion de prévisions chimiques cohérentes avec les prévisions météorologiques déjà utilisées pour l'élaboration des

bulletins de qualité de l'air, la prévision déterministe ou statistique d'échelle fine, et l'interprétation des mesures.

Pollution exceptionnelle et prévisions MOCAGE

Le modèle MOCAGE est entièrement déterministe, comme les modèles météorologiques, c'est-à-dire que tous les processus importants pour la pollution sont représentés dans le modèle, sans recours à l'information *a priori* ou à des climatologies. Pour les prévisions quantitatives sur des sites particuliers, une procédure d'adaptation statistique est appliquée, de manière à finaliser les prévisions. Comme pour la température de surface en météorologie, une régression linéaire multiple, intégrant l'ozone prévue par MOCAGE et diverses autres variables issues des prévisions météorologiques, est mise en œuvre. Les

coefficients de cette régression sont ajustés pour chaque site et chaque échéance horaire (1 à 96 h), sur la base d'une période passée – en pratique, mai à octobre 2002 pour la campagne de prévision 2003 ; la régression a ensuite été appliquée aux prévisions effectuées quotidiennement. Cette adaptation permet à la fois de corriger certains défauts intrinsèques au modèle chimique ou reliés aux problèmes de représentativité et de spécificité des différents sites de mesure. Les biais du modèle brut sont intrinsèquement très faibles, et bien que les coefficients aient été calculés sur la base de l'été 2002, moins pollué que celui de 2003, on obtient des biais moyens après adaptation statistique pour 2003 de moins de $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour toutes les échéances (J à J + 3) sur les sites ruraux, et de 1 à $2,5 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour les autres sites.

Un exemple de l'effet de cette adaptation statistique est illustré sur la figure 6 pour les prévisions à 24 h, sur le site de Cadarache (AIRMARAIX). Comme cela a été vu au cours de la campagne ESCOMPTE

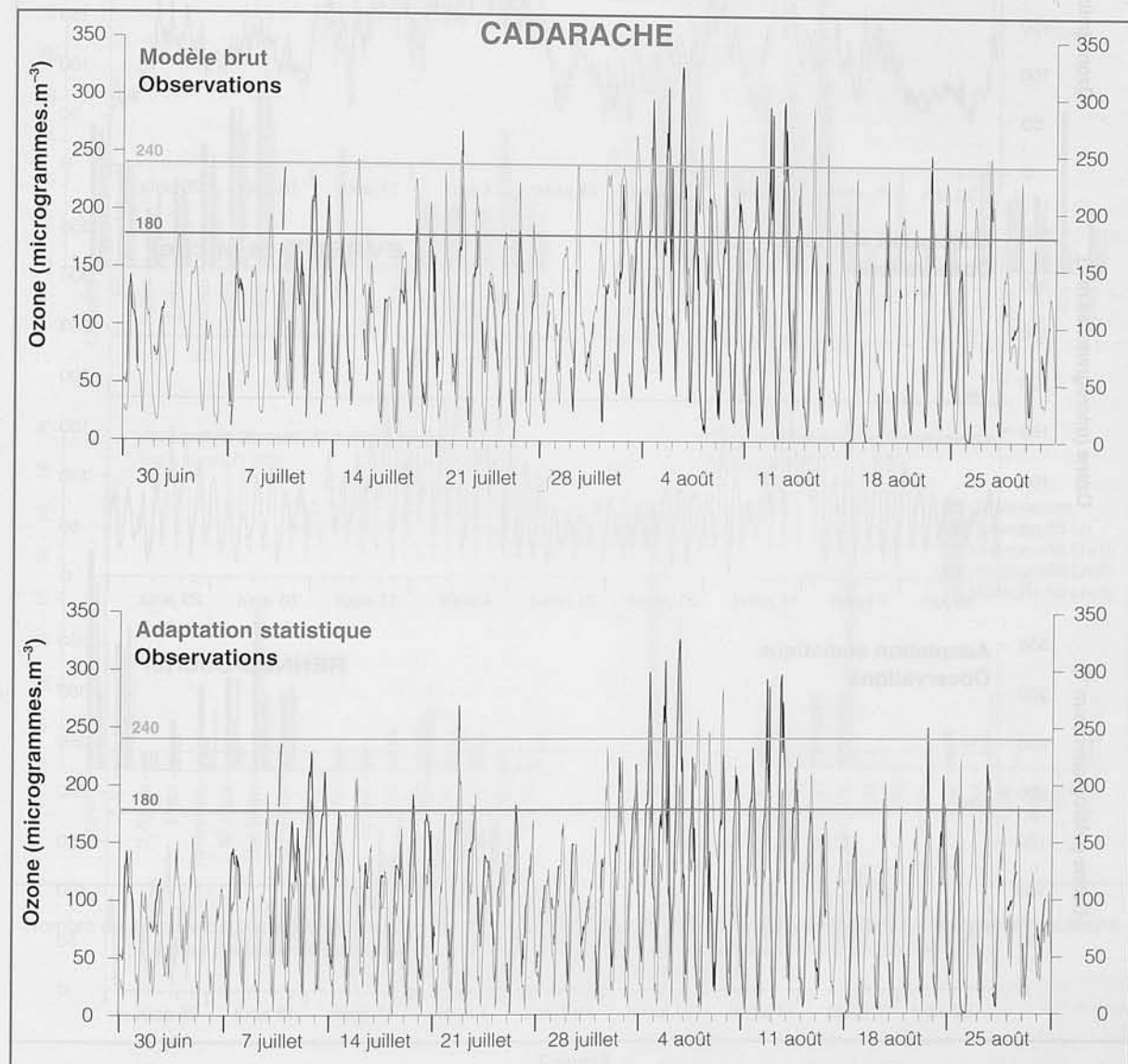


Figure 6.

Observations et prévisions (J) MOCAGE avant (haut) et après (bas) adaptation statistique à Cadarache (station AIRMARAIX) pendant la période du 1^{er} juillet au 31 août 2003.

(juin-juillet 2001), ce site est particulièrement intéressant et, bien qu'éloigné de sources directes de pollution anthropique, il reçoit des masses d'air très polluées par un effet de canalisation dans la vallée de la Durance. Ces masses d'air proviennent de l'étang de Berre et/ou de l'agglomération marseillaise en régime de flux synoptique faible (comme cela est le cas en situation de « blocage ») et en présence de brises de mer. On voit immédiatement l'effet de l'adaptation statistique, qui permet d'améliorer les prévisions : sur ce site particulièrement difficile, le taux de fausses alertes du dépassement à $180 \mu\text{g.m}^{-3}$ est grandement amélioré. Les basses valeurs

mesurées la nuit quasiment tous les jours sont également corrigées efficacement.

L'analyse des performances des prévisions sur les sites de mesure de la Banque de données sur la qualité de l'air (BDQA) de l'ADEME montre des résultats remarquables. Globalement, le taux des erreurs de moins de 20 % sur la prévision du pic quotidien est de l'ordre de 80 %, et les performances ne se dégradent que très marginalement avec les échéances ; les échéances J + 2 et J + 3, utiles pour l'anticipation et la prise éventuelle de mesures préventives par les décideurs, sont ainsi tout à fait utilisables. La figure 7

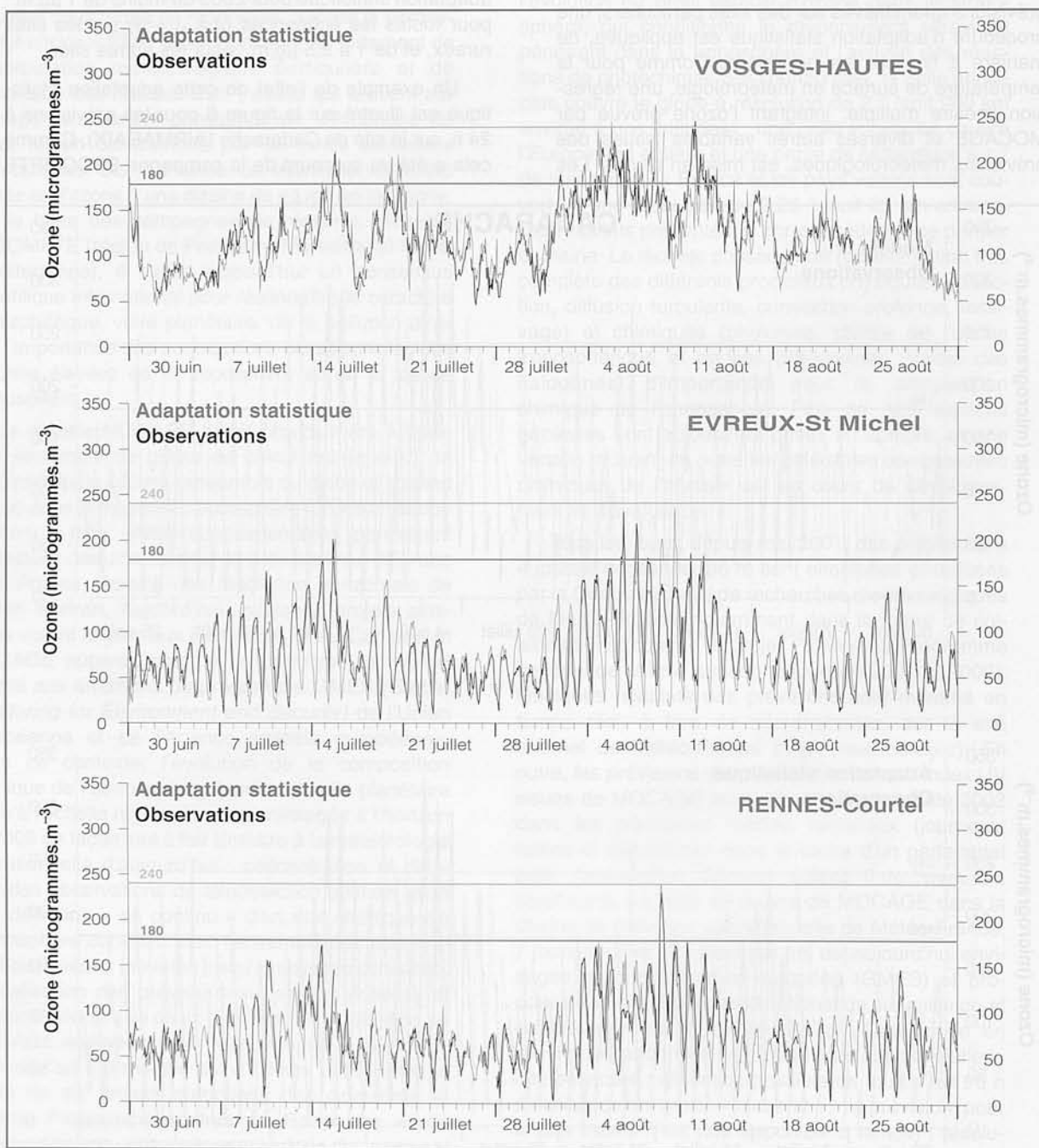


Figure 7.

Observations et prévisions (J) MOCAGE avec adaptation statistique aux Vosges-Hautes (station ASPA), Evreux – Saint-Michel (station AIR NORMAND) et Rennes-Courtel (station AIRBREIZH), pendant la période du 1^{er} juillet au 31 août 2003.

illustre la qualité des prévisions sur trois sites très différents de Cadarache répartis sur le territoire national. On observe sur cette figure que la prévision finalisée rend très bien compte des deux épisodes généralisés du 5 au 15 juillet et du 4 au 14 août, associés aux vagues de chaleur sur la France (Figure 2, p. 362). Si l'on entre plus avant dans l'étude des performances (Figure 8), on constate sans surprise sur un échantillon de sites que la prévision de dépassement de seuils est d'autant meilleure que le seuil est peu élevé : il est plus « facile » de prévoir un événement fréquent qu'un épisode atypique et exceptionnel. Toutefois, les taux de succès sont satisfaisants, au moins jusqu'au seuil actuel d'information de la population de 180 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Conclusion

La pollution de l'air et la météorologie sont intimement imbriquées, comme le rappellent les épisodes photochimiques associés à la canicule de 2003. Le projet MOCAGE de Météo-France a abouti maintenant du point de vue de la recherche, et des perspectives d'application et de mise en œuvre dans des conditions similaires aux modèles météorologiques opérationnels s'ouvrent. La qualité des prévisions au cours de l'été 2003 confirme tout le potentiel de ce nouveau type de modèles pour la chimie de l'atmosphère. MOCAGE vient ainsi enrichir le paysage de la qualité de l'air en Europe et en France. Il reste à savoir si une information environnementale plus étoffée saura trouver un écho dans le comportement de chaque citoyen.

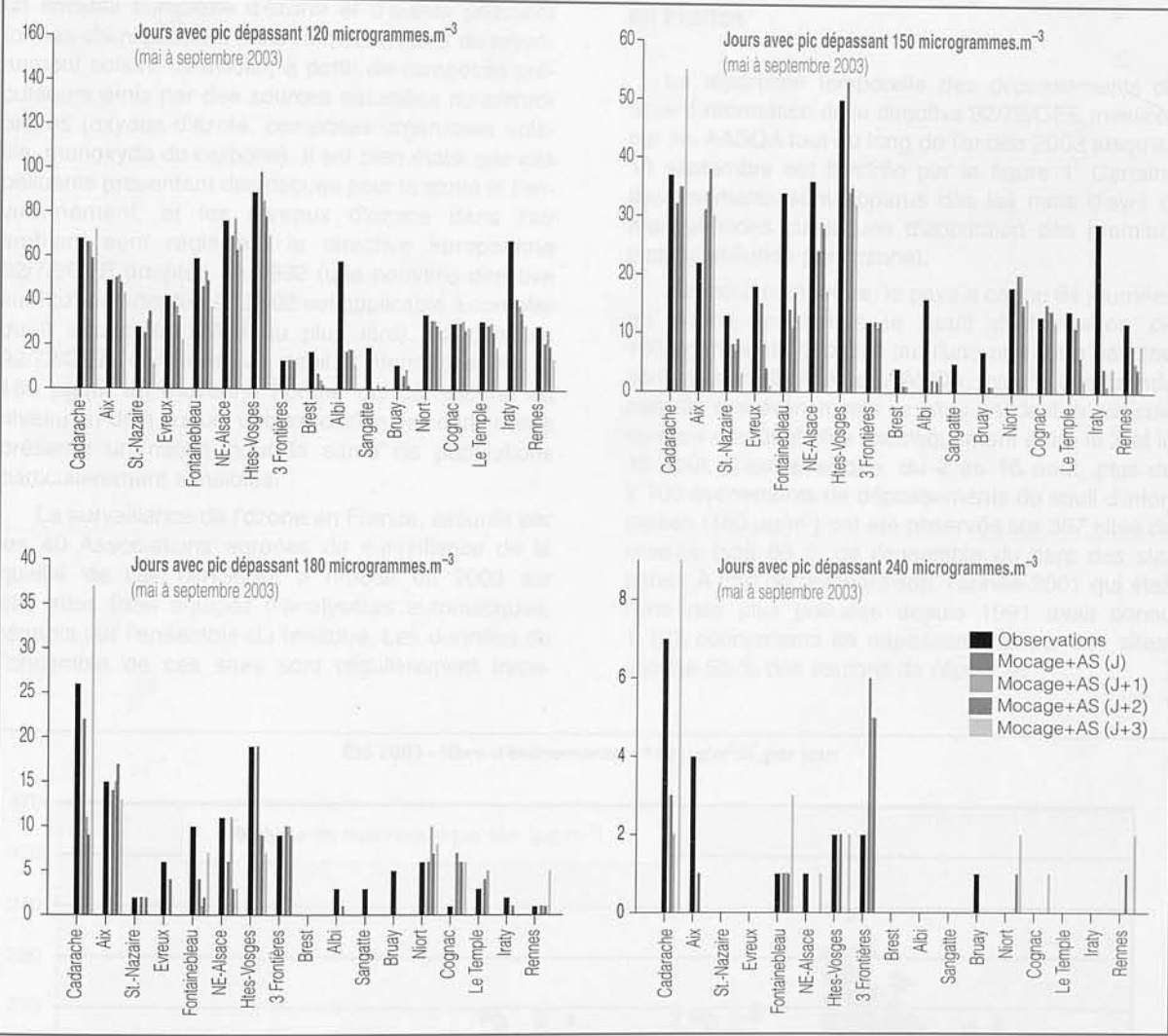


Figure 8.
Nombre de jours de dépassement des seuils 120, 150, 180 et 240 $\mu\text{g.m}^{-3}$ dans 17 stations réparties en France métropolitaine pour les observations et pour les prévisions MOCAGE aux échéances J (pour le jour même), J + 1 (le lendemain), J + 2 (le surlendemain) et J + 3.
(Sources : BDQA, ADEME – Météo-France)

Conclusion

La région de la Gironde est une zone d'habitat très importante. Elle est caractérisée par une forte densité de population, une forte activité économique et une forte présence de l'industrie. La région de la Gironde est une zone d'habitat très importante. Elle est caractérisée par une forte densité de population, une forte activité économique et une forte présence de l'industrie. La région de la Gironde est une zone d'habitat très importante. Elle est caractérisée par une forte densité de population, une forte activité économique et une forte présence de l'industrie.

La région de la Gironde est une zone d'habitat très importante. Elle est caractérisée par une forte densité de population, une forte activité économique et une forte présence de l'industrie. La région de la Gironde est une zone d'habitat très importante. Elle est caractérisée par une forte densité de population, une forte activité économique et une forte présence de l'industrie. La région de la Gironde est une zone d'habitat très importante. Elle est caractérisée par une forte densité de population, une forte activité économique et une forte présence de l'industrie.



Figure 1: Évolution du nombre d'emplois dans les différents secteurs de la région de la Gironde (1970-1990). Les données sont exprimées en milliers d'emplois. Les secteurs sont : 1. Industrie et construction, 2. Commerce et services, 3. Agriculture, sylviculture et pêche, 4. Services.

Source : Direction régionale de la Gironde, Direction des études et des statistiques, 1991. Les données sont exprimées en milliers d'emplois. Les secteurs sont : 1. Industrie et construction, 2. Commerce et services, 3. Agriculture, sylviculture et pêche, 4. Services.