



Programme PRIMEQUAL 2 – PREDIT

Simulation de scénarios de réduction d'émissions

Rapport de synthèse

Auteurs du rapport : Isabelle Coll, Fanny Lasry et Sylvain Fayet

Chercheurs et organismes impliqués :



Isabelle Coll, Fanny Lasry

Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, CMC,
Université Paris12 - 61 av. du G^{al} de Gaulle - 94010 Créteil Cedex



Sylvain Fayet

AIRMARAIX, 67-69 avenue du Prado
13286 Marseille Cedex 06



Jean-Luc Ponche, Mehrez Samaali

Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère
Centre de Géochimie de la surface - 1, rue Blessig - 67084 Strasbourg



Sylvie Cautenet, Joaquim Arteta

Laboratoire de Météorologie Physique – Université Blaise Pascal
CNRS – 24, avenue des Landais – 63177 Aubières



Robert Vautard

Laboratoire des sciences du climat et de l'Environnement –
F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Simulation de scénarios de réduction d'émissions

Rapport de synthèse

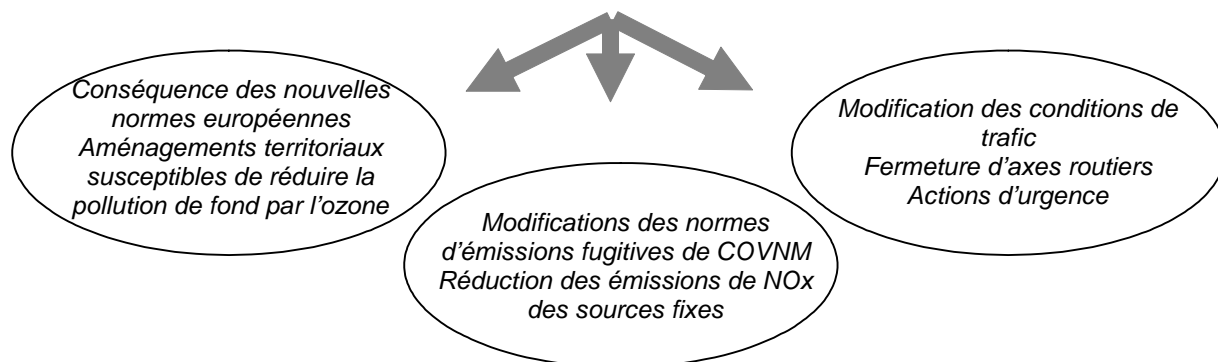
1. Introduction

Le projet « Simulation de scénarios de réduction d'émissions », coordonné par le LISA, a été conçu dans le prolongement des actions scientifiques du programme ESCOMPTE et afin de répondre aux besoins, affichés dans l'appel à propositions PRIMEQUAL 2 – PREDIT, de définir les actions et combinaisons d'actions à mettre en œuvre pour respecter les normes actuelles et futures de qualité de l'air. Le chapitre « Scénarios d'émissions » de cet appel à propositions est en effet centré sur les deux questions suivantes :

Pour une pointe de pollution par l'ozone, quelles auraient été les actions les plus efficaces dans les jours précédents pour l'éviter ?

Quelles modifications réalistes des émissions peut-on proposer afin de réduire les niveaux de fond?

Un grand nombre de pistes à explorer étaient précisément listées dans l'appel à proposition.



Les partenaires du projet ont été amenés à faire des choix parmi ces pistes, au regard des contraintes techniques (faisabilité) et théoriques (réalisme, cohérence avec les politiques engagées). Sous-tendues à ces préoccupations politiques se trouvent un certain nombre de questions scientifiques auxquelles le projet a également souhaité apporter des réponses. Les travaux se sont donc articulés autour de

- † la caractérisation et quantification de la relation existant entre l'ozone et ses précurseurs, par l'identification et la quantification des facteurs chimiques jouant sur le développement des épisodes de pollution photo-oxydante
- † la génération d'une cartographie de l'impact des réductions d'émissions, décrivant l'échelle spatiale (en termes de distance à la source) à laquelle les réductions d'émission influent sur l'ozone
- † et bien sûr la quantification de ces impacts sur plusieurs échelles de temps afin d'aborder les différents aspects de la surveillance de la qualité de l'air (pointes de pollution, exposition sur 8 heures, pollution de fond)

2. Mise en œuvre d'un groupe de pilotage, choix et définition des scénarios

Comme requis dans l'appel à proposition, la mise en œuvre de ce projet s'est réalisée au travers de la constitution d'un groupe de pilotage réunissant la coordination du projet, les équipes compétentes pour proposer des scénarios réalistes ainsi que des représentants des équipes impliquées dans le projet : MEDD, ADEME, membres du Groupe d'Action Scientifique ESCOMPTE, AIRMARAIX, LISA, LPCA.

Ce groupe a eu pour objet la définition des scénarios réalistes pertinents à prendre en considération. Le rôle d'AIMARAIX a été d'orienter le choix et la définition des scénarios à mettre en œuvre (objectifs, stratégie) ainsi que de mettre à disposition les données nécessaires (données locales, hypothèses de calculs, contexte réglementaire...) aux équipes partenaires, en particulier au LPCA, chargé de la mise en œuvre des calculs d'émissions.

Le choix et la définition des scénarios se sont appuyés sur une analyse préalable des objectifs et des questionnements des pouvoirs publics :

au niveau européen et national (directives européennes et arrêtés d'applications – en particulier directive NEC¹). Ces scénarios de type « réglementaire » ont été construits sur des références nationales telles que le scénario réaliste national calculé par le CITEPA, la directive NEC sur les « plafonds nationaux d'émissions », la directive « solvants » (réductions d'émissions de COVNM par les sources diffuses et fugitives et ses déclinaisons, en particulier pour les raffineries et industries chimiques) ...

au niveau régional (arrêtés préfectoraux (mesures d'urgence), plan d'aménagements et d'actions – en particulier les PPA²). Ces scénarios de type « aménagement » ont été construits en s'appuyant notamment sur les groupes existants en PACA (SPPI O₃, PPA/CODEP, PDU...). Les principales déclinaisons régionales identifiées sont les Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) des départements concernés, les « plans d'actions locaux » (arrêtés préfectoraux) issus des directives (principalement NEC), et les arrêtés préfectoraux pour les mesures d'urgence

Les réflexions engagées ont ainsi permis de définir une année cible (l'année 2010) correspondant à l'application des principales directives européennes. Il a également convenu que les différents scénarios devraient distinguer les émissions en situation normale et les mesures d'urgence. Enfin les différents scénarios étudiés ont été définis au regard de la stratégie d'utilisation :

Scénarios de référence 2001³ et 2003⁴ pour la validation et la comparaison avec les différents scénarios de réduction des émissions,

Scénarios 2010⁵ pour étudier l'impact (seuils réglementaires, objectifs de qualité) à long terme des réglementations en cours et prévues,

Scénarios de mesures d'urgences (effectives ou prospectives) pour en évaluer l'effet sur les épisodes de pollution photochimique.

Une dizaine de scénarios ont ainsi été élaborés, reposant sur l'inventaire ESCOMPTE 1999, et intégrant des hypothèses de modulation des émissions basées sur les réglementations (seuils d'émissions industrielles...), les

¹ National Emission Ceilings – NEC, directive 2001/81/CE

² Plan de Protection de l'Atmosphère

³ Périodes d'Observation Intensives ESCOMPTE en juin-juillet 2001

⁴ Importants épisodes de pollution photochimique en août 2003

⁵ 2010 est une échéance cible de certains textes réglementaires, en particulier de la directive NEC sur les plafonds nationaux d'émissions

évolutions techniques (moteurs moins polluants, renouvellement du parc automobile...), les évolutions socio-économiques (scénarios énergétiques, démographie, accroissement des transports...), et les aménagements régionaux (plans d'actions industrielles, plans d'aménagements, plans de protection de l'atmosphère, plans de déplacements...).

Outre les scénarios de référence 2001 et 2003, l'ensemble de scénarios en situation normale comprend :

- † un scénario dit « tendanciel » 2010 (« au fil de l'eau ») noté **SC1**, sans mise en œuvre de réglementations, ne prenant en compte que les évolutions socio-économiques engagées et/ou connues. Il s'agit du scénario de référence sur la base duquel les impacts des mesures (réglementaires et d'urgence, nationales et régionales) pourront être évalués par comparaison.
- † un scénario **SC2A** « National Réaliste » 2010 (avec mesures existantes nationales) correspondant aux projections calculées par le CITEPA, incluant les évolutions nationales issues des réglementations engagées et prévues. Il s'agit du scénario permettant d'évaluer l'impact sur la photochimie dans la zone ESCOMPTE des mesures globales « engagées » sans prendre en compte les particularités régionales (directives européennes cadres).
- † un scénario NEC 2010, nommé **SC2B**, correspondant au respect strict de la directive NEC.
- † un scénario **SC3** « Régional Réaliste » 2010 (avec mesures existantes nationales et régionales) incluant les évolutions nationales et régionales issues des réglementations engagées et prévues. Il s'agit du scénario 2010 permettant d'évaluer l'impact sur la photochimie dans la zone ESCOMPTE des mesures locales « engagées ». En effet, il est apparu que le scénario du CITEPA puisse servir de trame mais non de stricte contrainte et qu'un exercice similaire doit être réalisé en prenant en considération toutes les particularités régionales. Ce scénario sera également testé sur le long terme (année correspondant aux conditions dynamiques 2003).

L'ensemble de scénarios s'attachant aux Mesures d'Urgences (MU) en vue d'évaluer l'impact comprend quant à lui :

- † les « mesures d'urgence courantes » prenant en considération (sur la base du scénario 2010 Régional Réaliste) les mesures d'urgence en vigueur (arrêtés préfectoraux de juin 2004) selon les différents seuils d'alerte, en distinguant notamment :
 - les mesures de réduction de vitesses des transports routiers,
 - les mesures de réduction des émissions industrielles (stabilisation ou réduction d'activités...),
 - les mesures de restrictions d'activités émettrices (peintures, solvants...)
 - les mesures de restriction de circulation...
- † l'évaluation de mesures d'urgence volontaristes prenant en considération des mesures plus importantes que celles prévues par la réglementation (Circulation alternée à l'échelle du département par exemple...)

3. Réalisation des scénarios d'émissions

La réalisation d'inventaires correspondant aux scénarios d'émission comprend la collecte de données pour l'inventaire d'émission, la mise en œuvre des modèles d'émission ainsi que l'analyse pour validation des scénarios d'émission.

AIRMARAIX a eu la charge de la collecte et de la mise à disposition de données nécessaires à l'élaboration des scénarios d'émissions.

Une analyse documentaire relative aux réglementations en vigueur a été effectuée et mise à disposition du groupe de travail. Elle inclut les Directives Européennes (directive 1999-13-CE solvants, directive 2001-81-CE plafonds nationaux émissions, directive 2002-3-CE ozone, directive 99-32-CE réduction teneurs soufre...), les Arrêtés Préfectoraux (arrêtés ozone de juin 2004), ainsi que les Plans de protection de l'Atmosphère (PPA) et mesures associées.

Les données nationales de référence ont été collectées, en particulier auprès du CITEPA. Ce sont les rapport et données numériques « OPTINEC 2010 » (CITEPA 2001), « Projections d'émissions 2010-2020 » (CITEPA 2004), et le scénario énergétique de la DGEMP (2004).

Les données régionales ont été collectées et mises à disposition du groupe de travail. Elles regroupent les données relatives aux émissions industrielles (données déclaratives issues d'enquêtes DRIRE), celles de trafic routier (données horaires issues du réseau SIREDO, DDE/CETE méditerranée), les données de l'Observatoire Régional de l'Energie (ORT) relatives aux statistiques de transports, les données de la DGAC relatives aux trafics aériens... Les données de trafics routiers ont été analysées dans le but de vérifier la cohérence avec les hypothèses nationales d'évolution des transports (+3% par an) et d'élaborer des clés d'allocation temporelle pour les calculs horaires d'émissions.

Les hypothèses relatives aux mesures d'urgence ont fait l'objet d'études : analyse des données de vitesses du trafic routier, étude de l'impact des réductions de vitesse sur les émissions à différentes échéance, et analyse de la mise en œuvre des mesures d'urgence dans les Bouches-du-Rhône en 2004.

La génération des cadastres d'émission a été réalisée au LPCA par mise en œuvre de l'outil POSTICE (figure 1) dont les principales étapes consistent (1) à effectuer un regroupement sectoriel des émissions, (2) à réaliser un découpage spatial du cadastre, ce qui permet également la répartition temporelle de certaines activités comme le trafic routier, dont les clés de distribution temporelle sont propres à chaque département.

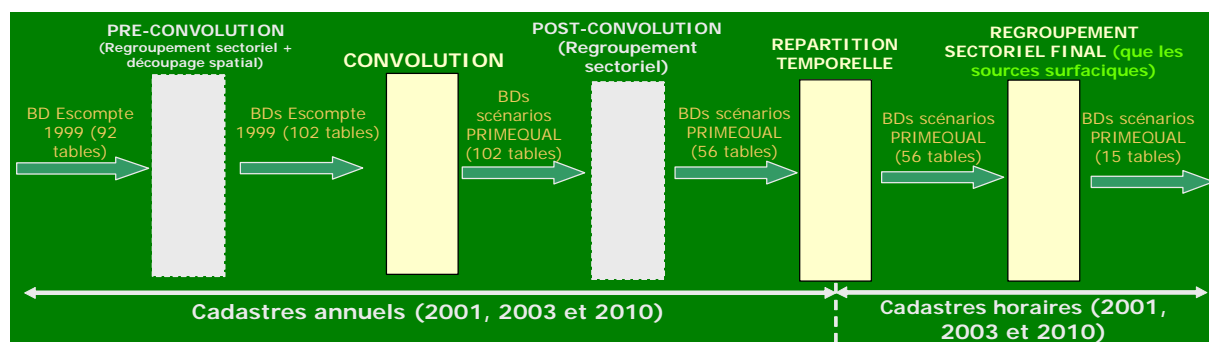


Figure 1. Schéma des travaux mis en œuvre dans l'outil POSTICE⁶

⁶ FRANCOIS Stéphane – Méthodologie d'établissement de cadastres d'émissions à l'échelle régionale : application au cadastre ESCOMPTE et à son extension à la région PACA - Thèse de doctorat. Chimie-Physique : Université Louis Pasteur - Strasbourg 1, 2004 - 216 p + annexes.

En (3), l'étape de convolution consiste en l'application de coefficients d'évolution temporelle des émissions sur les secteurs d'activité concernés, au prorata de la durée écoulée entre le scénario de référence et le scénario prospectif. Enfin, outre une étape de regroupement sectoriel permettant la réduction de la dimension des tables traitées, l'outil effectue (4) une désagrégation temporelle permettant le passage d'un cadastre annuel en un cadastre horaire par application de clés mensuelles, journalière et horaires.

La validation de la chaîne de calculs a été effectuée par les différents partenaires impliqués dans la production des scénarios et des cadastres.

4. Analyse des émissions sur les différents scénarios

Les émissions de polluants calculées après application de ces hypothèses sont représentées par scénario sur la figure 2. Le scénario tendanciel SC1 révèle une hausse des émissions totales entre 2003 et 2010 de 14% pour les NO_x et d'environ 10% pour les autres composés, ce qui provient principalement de l'évolution du secteur des transports routiers. Pour le CO, une part non négligeable est due à la hausse de la consommation énergétique (combustion et trafic routier). Quant à l'augmentation des émissions de SO₂, elle provient de la hausse des transports non routiers (notamment maritime) ainsi que des combustions et des procédés industriels.

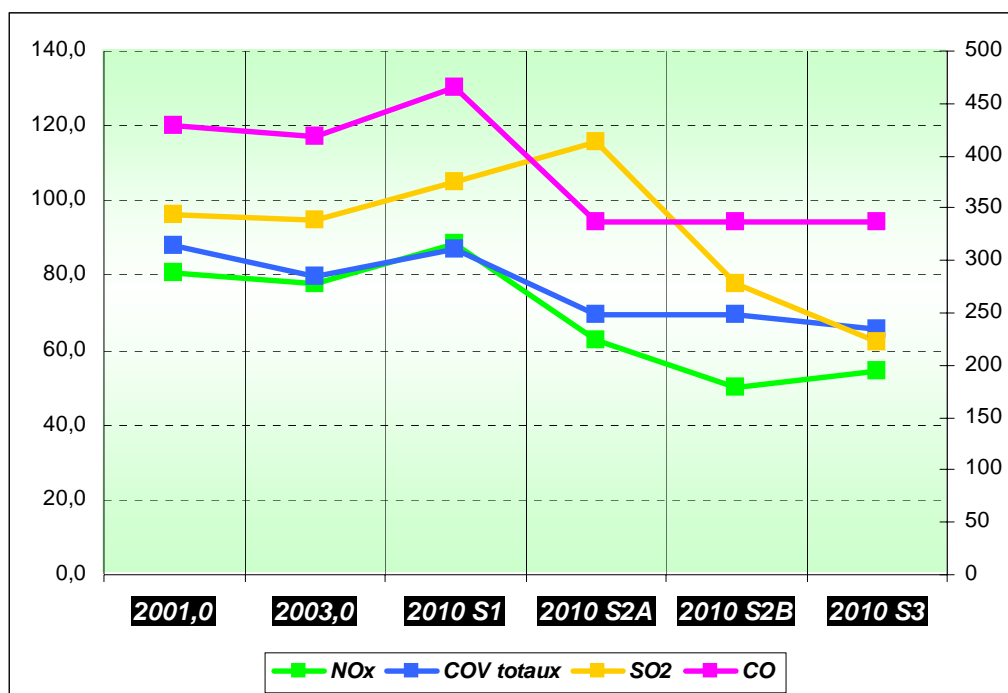


Figure 2. Evolution des émissions dans les différents scénarios

Comparativement à SC1, le scénario national réaliste SC2A induit des diminutions d'émissions marquantes notamment pour les NO_x et le CO (29 et 26% respectivement) liées à la mise en oeuvre des directives relatives aux émissions des échappements des véhicules et à la pénétration de nouvelles technologies "moteur propres" dans le parc roulant. La prise en compte des textes réglementaires sur l'utilisation des solvants et les Grandes Installations de Combustion dans le secteur industriel se traduit aussi par une baisse significative des émissions de COV, SO₂ et CO liées aux combustions. Seul le SO₂ voit ses émissions totales augmenter dans ce scénario par rapport aux autres inventaires, composé pour lequel une projection linéaire a été réalisée entre 2003 et 2010. Ceci s'explique par une vision plutôt pessimiste des évolutions nationales par le CITEPA.

Le Scénario national NEC (SC2B) requiert par rapport au SC2A une réduction des émissions de NO_x de 17% et de 26% pour le SO₂. Les efforts portent principalement sur les secteurs des procédés et des combustions industriels. Ces valeurs diffèrent légèrement des résultats du calcul présenté sur la figure 2, les faibles écarts devant être attribués aux particularités régionales (poids de chaque activité dans les émissions totales régionales) lesquelles ne sont pas, bien entendu, représentatives du contexte national.

Le scénario régional réaliste (SC3) doit simuler la situation 2010 la plus probable. Les Plans de Protection de l'Atmosphère des Bouches du Rhône visent à faire respecter les valeurs limites dans leur zone de couverture pour certains polluants primaires et secondaires. Ils impliquent donc des réductions d'émissions supplémentaires par rapport à SC2A pour le secteur industriel. Pour réduire les concentrations de NO₂ et SO₂ dans l'atmosphère, ils prévoient une réduction de 40% de leurs émissions entre 2001 et 2010 pour une liste d'industries ciblées, réduction beaucoup plus sévère qu'à l'échelle nationale. Néanmoins, sur recommandation de la DRIRE, les réductions d'émissions prévues par les PPA ont été appliquées dans les inventaires à toutes les Grandes Sources Ponctuelles (GSP) de la zone d'étude. De plus, les PPA imposent des réductions spécifiques d'émissions très sévères de l'ordre de -80 à -90% de benzène sur certains sites, ainsi qu'une réduction des émissions de COV de 40% entre 2001 et 2010 sur l'ensemble des GSP. Par contre, aucune réglementation spécifique au monoxyde de carbone n'est exprimée dans les PPA. SC3 ne traduit donc pas d'évolution des émissions de ce polluant. Ce scénario permet d'obtenir sur l'ensemble des activités une diminution très importante des émissions totales de SO₂, et des émissions de NO_x et de COV qui sont également affectées mais dans une moindre mesure (10% supplémentaires).

5. Résultats de la simulation des scénarios d'émissions

Les scénarios ont été simulés au LISA à l'aide de l'outil de modélisation CHIMERE développé par le consortium IPSL/INERIS/LISA (<http://euler.lmd.polytechnique.fr/chimere>). Les simulations ont été réalisées sur un domaine de 140km de côté comprenant en son centre la zone de Fos-Berre, avec une résolution horizontale de 4km et 15 niveaux verticaux entre 0 et 3000m. Cette configuration inclut l'utilisation du modèle de calcul dynamique MM5 (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5>) pour la production de champs de paramètres physiques et le module chimique SAPRC99 (<http://pah.cert.ucr.edu/~carter/SAPRC99.htm>) pour restituer la dégradation photochimique des polluants sur le site. Les simulations sont forcées chimiquement aux bornes du domaine par CHIMERE fonctionnant sur un domaine européen. Cette configuration a été mise en place puis longuement et finement évaluée et validée dans le cadre de la thèse de Fanny Lasry⁷. Cette validation s'est faite par confrontation entre les sorties de modèle et les mesures au sol et en altitude et de composés primaires et secondaires, effectuées sur le terrain durant l'ensemble des POIs. Cette étape ainsi que l'identification des incertitudes du modèle sont longuement discutées dans le manuscrit de thèse.

Dans le cadre de ce projet il a été choisi de retenir un grand nombre d'épisodes photochimiques pour la simulation, afin de pouvoir obtenir un ensemble de cas représentatifs des influences auxquelles le site est soumis. La réflexion nous a menés à choisir l'ensemble des POIs de la campagne ESCOMPTE, auxquelles nous avons rajouté les quinze premières journées du mois d'août 2003, pour l'intensité des pointes d'ozone observées sur la région, soit en tout 24 journées d'épisode photochimique. Le choix et la représentativité des épisodes retenus pour la simulation sont discutés de façon détaillée dans le manuscrit de thèse référencé ci-dessus.

La méthodologie définie dans le cadre de ce travail a permis d'aborder les aspects suivants : impact sur les valeurs maximales, moyennes, sur les dépassements de seuils, et sur les valeurs cumulées d'ozone. La grille de lecture a également été étendue à d'autres polluants que l'ozone (monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, formaldéhyde, acide nitrique, dioxyde d'azote, PAN et benzène). Les principaux résultats sont présentés ci-dessous pour l'ozone.

⁷ Lasry Fanny, Analyse par modélisation tridimensionnelle des processus physico-chimiques déterminant la production d'ozone. Evaluation de l'impact de scénarios d'émission prospectifs. Application au site ESCOMPTE. Thèse de Doctorat en Sciences, Spécialité Chimie de la Pollution Atmosphérique et Physique de l'Environnement, Université Paris 12, 2006, 294 p.

Les résultats de chaque scénario ou test de sensibilité seront présentés pour des jours représentatifs de la tendance moyenne, sous forme de carte dite « d'Impact Pic », traduisant l'effet de la modulation des émissions sur le maximum d'ozone simulé en chaque maille du domaine d'étude, quelle que soit l'heure à laquelle ce maximum a été calculé. Les cartes sont réalisées par différence des maxima avec le scénario de référence. Ils seront également présentés sous forme de cartes de dépassements de seuils calculés sur les 24 épisodes par le modèle dans chaque scénario.

5.1 La réponse du système aux émissions

Dans un premier temps, la sensibilité du système atmosphérique régional aux modulations des émissions a été testée. Ces études ont constitué une première approche de l'ozone sur le site, afin d'analyser sa formation et d'orienter les actions de réductions d'émissions vers l'un ou l'autre des précurseurs. L'exercice consistait en une modulation des émissions de l'ordre de 40% (proche des valeurs attendues pour 2010) pour l'ensemble des COV et/ou pour les oxydes d'azote, de manière homogène sur le domaine, sans distinction d'activités (figure 3).

La réduction des émissions totales de NOx révèle une sensibilité différente des maxima d'ozone sur 2 zones :

- ┆ *une zone proche des sources (Etang de Berre, Marseille et Toulon) dans laquelle les concentrations maximales d'ozone augmentent de 8 à 25 ppbv (observé le 25/06/01). Cette zone est dite saturée en NOx, car les réactions de titration de l'ozone par NO et des radicaux OH par NO2 sont majoritaires.*
- ┆ *une zone en retrait des sources (se situant entre cinq et une cinquantaine de kilomètres des grandes zones sources selon l'épisode) dans laquelle les maxima d'ozone sont réduits de 10 ppbv sur une large partie du panache et atteignant -16 ppbv localement. Cette zone correspond aux régions dites limitées par les NOx car leur faible disponibilité freine les réactions de production d'ozone.*

Les résultats du scénario COV-40% montrent systématiquement une diminution des maxima d'ozone dans la zone proche des sources (couleurs bleues). Dans ces zones déjà saturées en oxydes d'azote, la diminution des composés alimentant le cycle de production de l'ozone induit une diminution des concentrations d'ozone par rapport au cas de référence. Contrairement au scénario précédent, les impacts favorables sont alors centrés sur les deux principaux sites émetteurs, les industries du pourtour de l'Etang de Berre et l'agglomération marseillaise, et diffusent sur un rayon d'une cinquantaine de kilomètres au maximum. Ils atteignent 8 à 14 ppbv localement.

Les résultats du test croisé NOx_et_COV-40% (non montré ici) sont une combinaison des résultats précédents: ils mettent en évidence des zones d'augmentation et de diminution des maxima d'ozone délimitées de façon identique au scénario de réduction des NOx, mais la hausse des concentrations d'ozone à proximité des sources émettrices y est nettement moins forte (+10 ppbv contre +25 ppbv pour le 25/06/01) pour une diminution semblable des pointes d'ozone. Ce test indique la **nécessité de combiner les actions sur ces deux familles de précurseurs.**

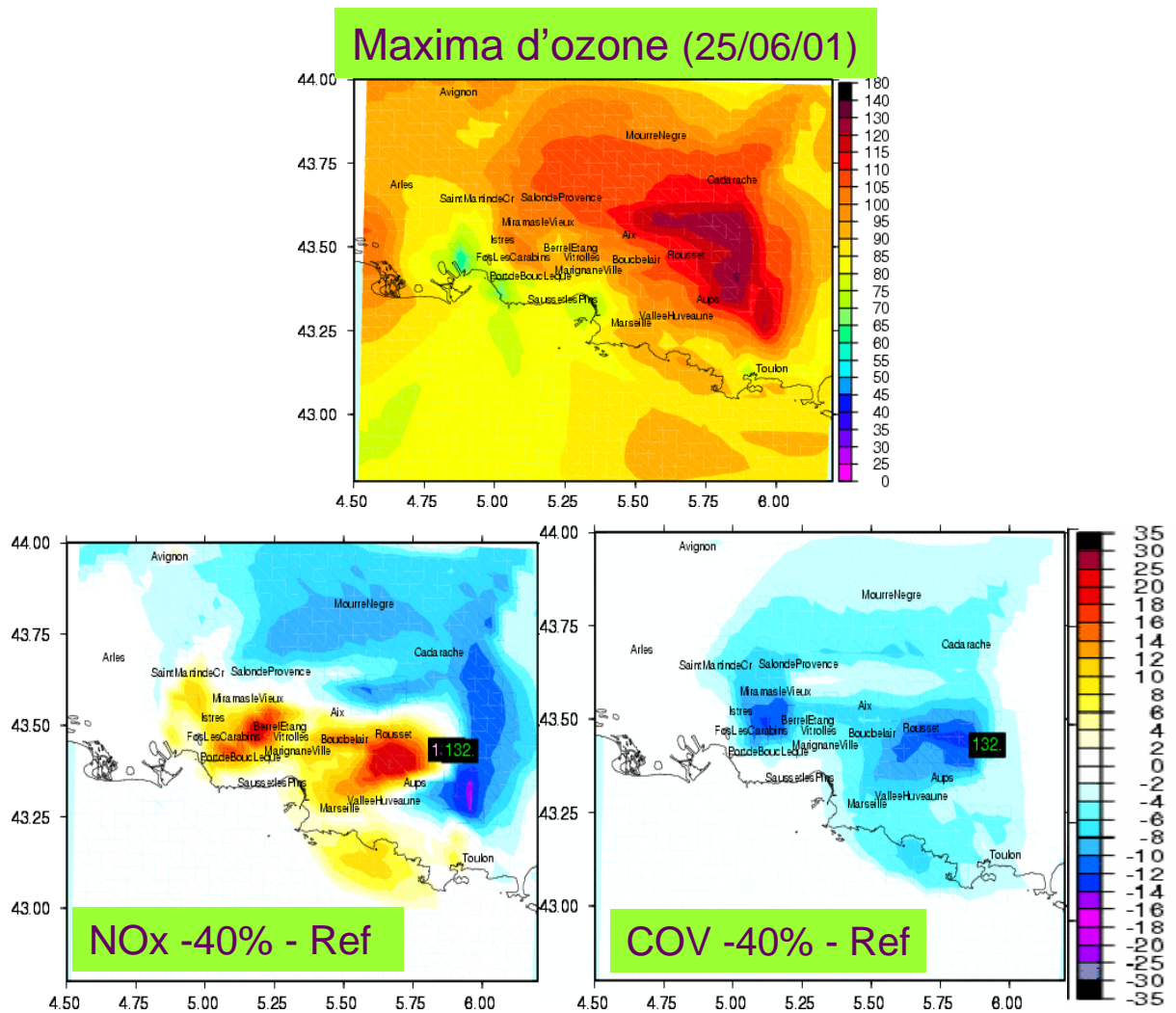


Figure 3. Cartes de maximum d'ozone et d'impact pic pour les sensibilités aux NO_x et aux COV sur une journée représentative

5.2 Quel poids pour les grands émetteurs ?

L'étape suivante des tests de modélisation constitue une aide à la décision sur le terrain en effectuant un pas vers des réductions d'émissions réalistes. Cette étude avait pour but de permettre d'évaluer et de classer la part de chaque grande catégorie d'émetteur dans la formation de l'ozone sur le site, en répondant au questionnement suivant :

- ┌ où agissent les différents émetteurs : leur zone d'impact est-elle superposée ou découplée?
- ┌ quel émetteur faut-il cibler afin de diminuer le plus efficacement les dépassements de seuil d'ozone? Quelle est la part de chaque secteur d'activité dans la production totale d'ozone?

Notre stratégie d'étude a consisté en l'application de réductions d'émissions par secteur d'activité. La description du choix des réductions appliquées est également longuement décrite dans le travail de thèse de Fanny Lasry. Divers scénarios ont été définis, nous décrivons ici seulement l'impact d'une réduction des émissions du secteur des transports routiers (Véhicules Particuliers, Utilitaires, Poids Lourd, 2 Roues et catégorie Evaporation) et d'une réduction des émissions des GSP de 40%.

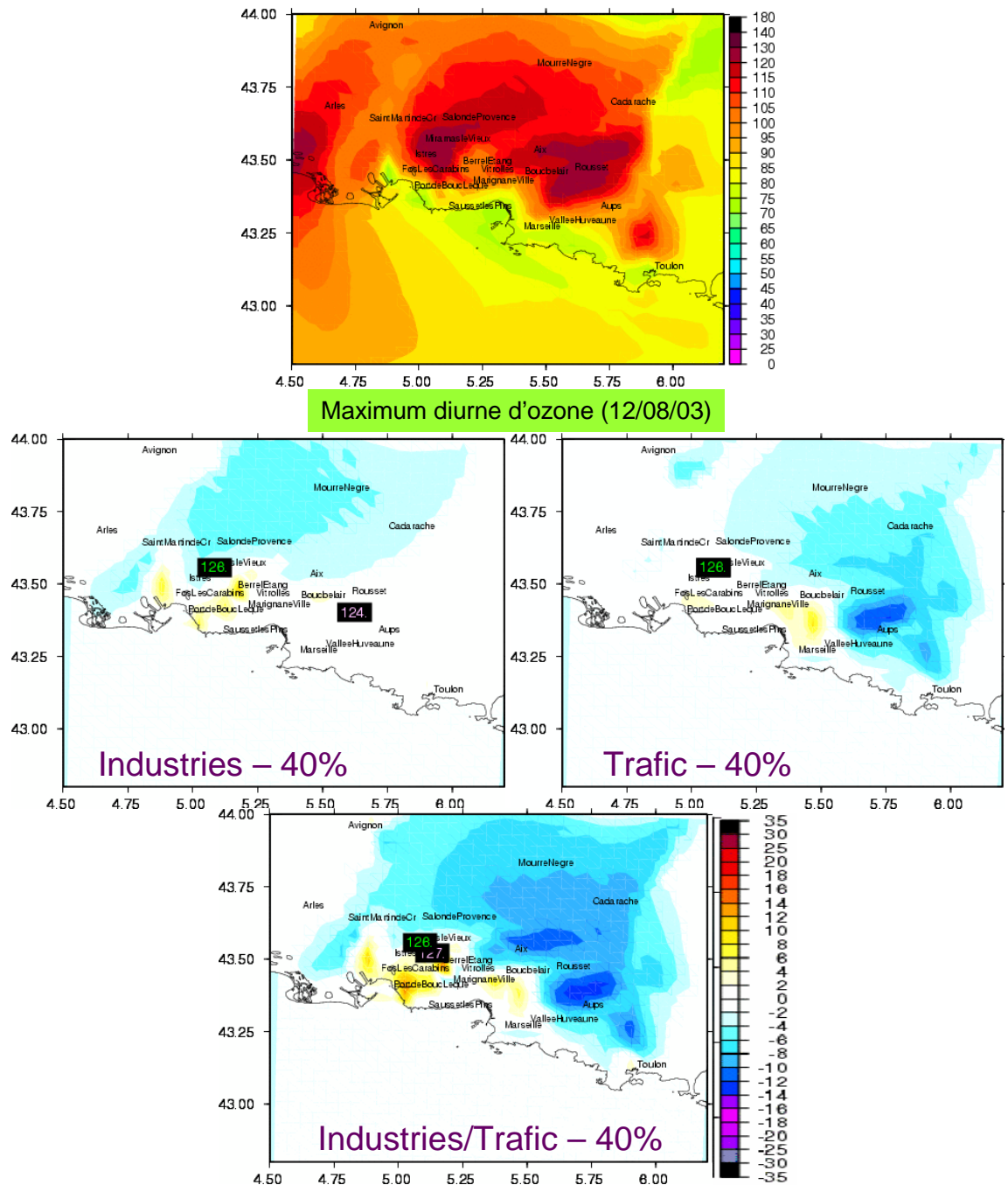


Figure 4. Cartes de maximum d'ozone et d'impact pic pour les sensibilités aux secteurs d'activité le 12 août 2003

Les cartes d'Impacts Pics pour l'ensemble de ces scénarios sont représentées en figure 4 pour la journée du 12/08/03, journée représentative de l'ensemble des épisodes de brise de mer simulées. La figure montre des différences dans la localisation des impacts mais aussi dans leur amplitude, selon le secteur auquel on applique des réductions d'émissions. Pour les scénarios Trafic-40% et GSP-40%, on observe logiquement une augmentation des maxima d'ozone dans les zones d'émissions et une diminution dans les zones plus en retrait des émissions (à partir d'Aix-en-Provence), signes caractéristiques d'une réduction des émissions de NO_x . Toutefois, nous observons un découplage dans les zones d'impact. Pour le scénario de Trafic, la zone la plus touchée est localisée à l'Est du domaine entre Cadarache et Toulon, sous le vent de l'agglomération Marseillaise, zone

d'intense trafic routier. Pour le scénario GSP-40%, les concentrations d'ozone sont plus fortement réduites au Nord du domaine sous le vent de la zone industrielle. L'amplitude des impacts diffère également selon les scénarios. Elle est environ deux fois plus importante pour le scénario de trafic que pour le scénario GSP, avec 12 et 6 ppbv de réduction localement respectivement, ce qui est largement significatif dans chaque cas. Les résultats du scénario groupant les réductions d'émission sur les deux secteurs d'activité montrent un effet quasi-additif des impacts. En effet, la diminution des maxima d'ozone est observable sur une large partie du domaine, les zones sous le vent de l'agglomération marseillaise ainsi que sous le vent des principales sources industrielles étant touchées (jusqu'à 14 et 10 ppbv de réduction respectivement).

Ces résultats apportent une piste sur l'influence complémentaire des efforts à mettre en oeuvre pour améliorer la qualité de l'air sur la région. Afin de réduire les concentrations d'ozone sur l'ensemble du domaine, **il apparaît en effet nécessaire d'agir en synergie sur un ensemble de secteurs d'activité**.

L'efficacité des scénarios de trafic et GSP sur les dépassements du seuil d'alerte est présentée en figure 5. La figure montre la fréquence des dépassements du seuil d'alerte simulés pour les 24 épisodes dans le cas de référence et pour le scénario combiné. Comme pressenti au vu des résultats des cartes précédentes, c'est en effet la combinaison des deux scénarios qui permet de diminuer le plus efficacement les dépassements, en divisant de moitié leur fréquence sur l'ensemble du domaine. Le modèle simule ainsi 5 dépassements au maximum sur Aix-en-Provence ainsi que dans la région industrielle, contre 9 dans la simulation de référence.

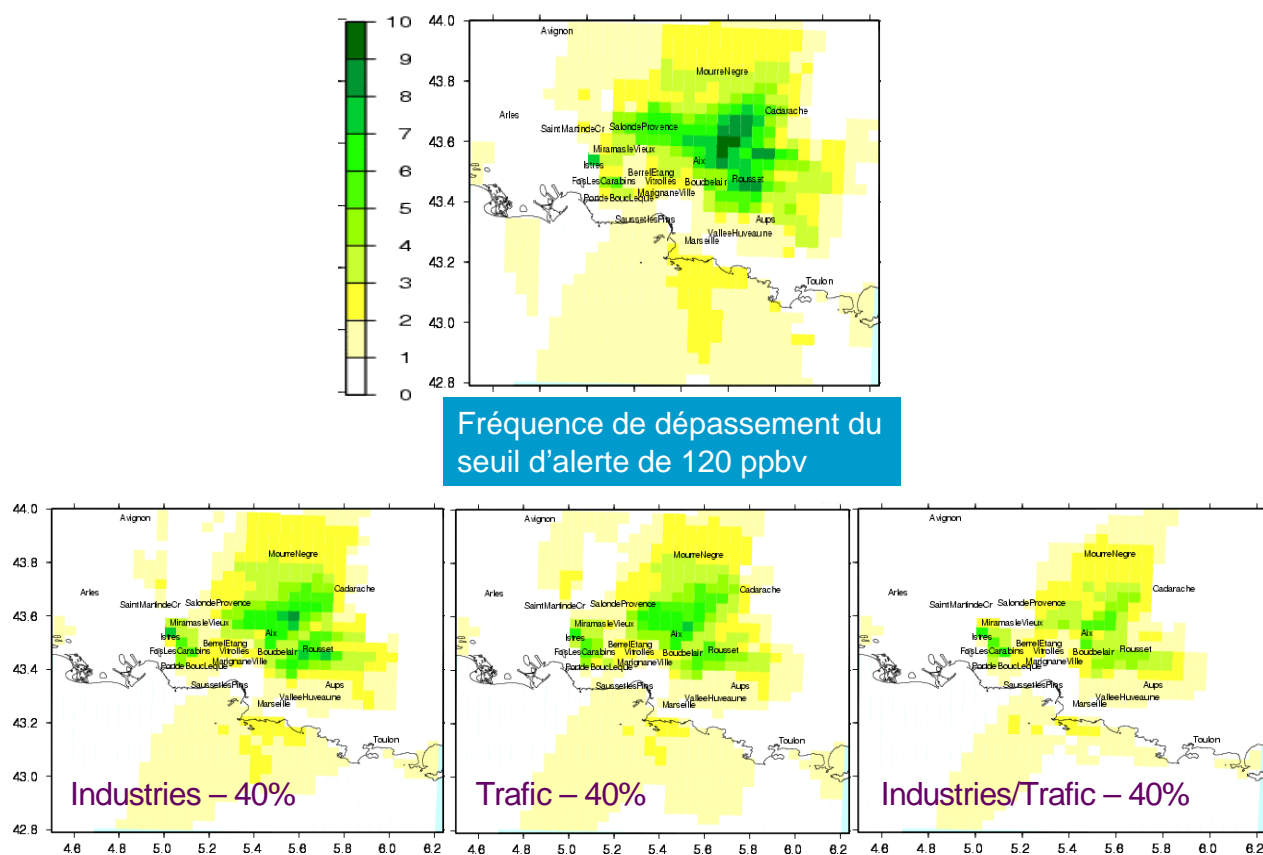


Figure 5. Cartes cumulées de dépassements du seuil de 120 ppbv pour les tests de sensibilité aux secteurs d'activité

5.3 Vers quelle situation probable 2010 ?

La simulation des 24 épisodes a été effectuée en remplaçant l'inventaire de référence par les différents inventaires 2010 projetés. Dans un premier temps, seul le cadastre sur le domaine de simulation régional est remplacé. Le domaine est forcé par les mêmes conditions aux limites que pour les épisodes 2001-2003, afin d'évaluer l'ampleur de l'action possible sur l'ozone par le seul contrôle des émissions à l'échelle régionale. Les résultats de chaque scénario sont présentés en figure 6 pour une journée représentative des tendances observées, sous forme de carte d'impact pic.

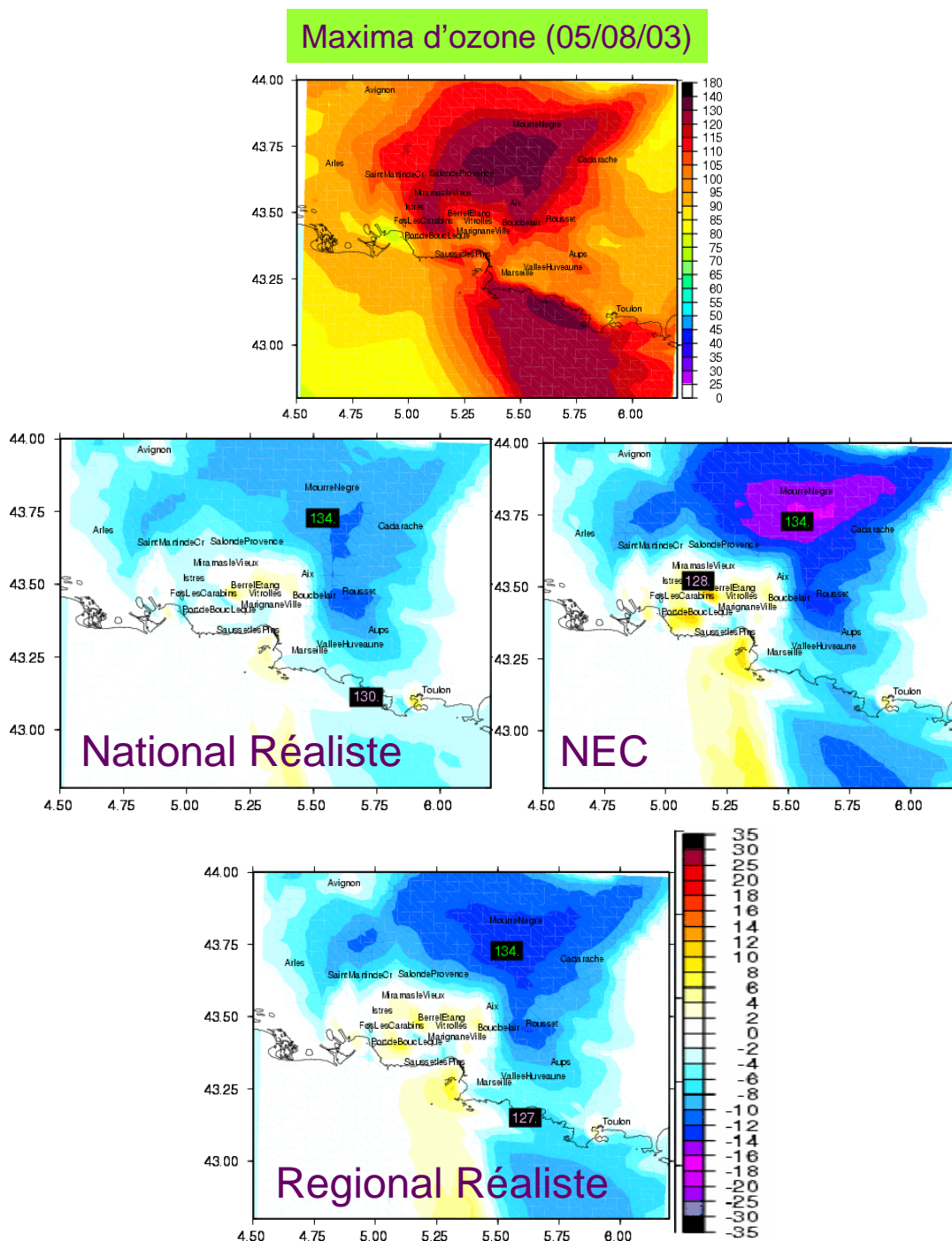


Figure 6. Cartes d'impact pic sur les différents scénarios prospectifs pour une journée représentative, le 5 août 2003

Le scénario tendanciel diffère peu du scénario de référence. Les concentrations d'ozone augmentent de 2 à 4 ppbv dans le panache, et diminuent logiquement sur les zones d'émissions en raison d'une titration plus intense par les NO_x puisque leurs émissions augmentent.

Si l'on prend en compte les réglementations nationales (Scénario National Réaliste SC2A), les concentrations d'ozone baissent significativement : les baisses atteignent 10 à 12 ppbv localement sur le panache en terre, principalement sur Rousset, zone sous le vent de l'agglomération marseillaise. Ce point traduit l'impact du contrôle des émissions automobiles. Les maxima, localisés sous le vent des sources industrielles, sont significativement diminués, d'environ 8 ppbv. Cette légère différence est liée au fait que les GSP sont moins émettrices de NO_x que les agglomérations, et jouent donc un peu moins efficacement sur l'ozone. En mer, l'impact sur le panache lié à la recirculation des émissions industrielles et urbaines nocturnes est faible (4 à 6 ppbv de diminution des maxima d'ozone) mais reste toutefois significatif. Nous pouvons également observer des zones restreintes de faible augmentation des maxima d'ozone sur Berre ainsi qu'en mer en amont du maximum.

Le scénario SC2B, traduisant le respect de la directive NEC, a un impact beaucoup plus marqué sur l'ozone que le scénario précédent, tant dans les zones de diminution que d'augmentation des maxima d'ozone. Ceci est dû à la seule modulation des émissions de NO_x dans ce scénario (par rapport à SC2A les COV ne sont pas touchés). Les concentrations d'ozone sont fortement diminuées (de 16 à 18 ppbv) entre Salon-de-Provence et Mourre Nègre, stations situées pour cet épisode sous le vent des émissions industrielles. Ce scénario traduisant en majorité un contrôle supplémentaire des émissions liées aux industries, les résultats (localisation et intensité des impacts sur les maxima d'ozone) sont assez proches de ceux obtenus avec le cadastre SC3.

Les scénarios 2010 les plus probables ont des **impacts significatifs sur les maxima d'ozone**. En termes de qualité de l'air, l'application des différentes réglementations, nationales et régionales, permet de réduire progressivement la fréquence des pointes d'ozone supérieures à 120 ppbv. La prise en compte des réglementations à l'échelle nationale (SC2A - non montré) est l'étape la plus efficace en divisant par 2, sur l'ensemble du domaine, le nombre de fois où le seuil d'alerte est atteint. SC3 (figure 7) apporte peu d'amélioration par rapport à SC2A - à part sur la région d'Avignon, mais le contrôle supplémentaire des émissions industrielles dans SC3 induit tout de même des réductions des pointes d'ozone en mer, et permet ainsi de limiter l'exportation d'ozone et la hausse du bruit de fond en ozone dans le bassin méditerranéen.

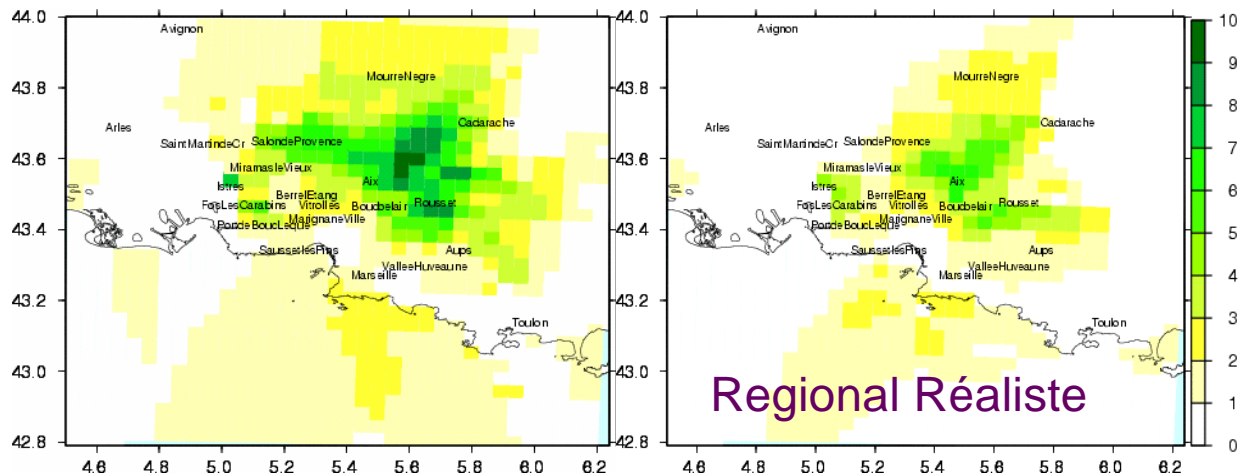


Figure 7. Cartes cumulées de dépassement du seuil d'alerte (120ppbv) pour le cas de référence et le scénario SC3 pour une journée représentative : le 5 août 2003

5.4 Réduction des émissions à plus grande échelle

Les simulations des épisodes avec inventaires régionaux 2010 ont mis en évidence l'impact significatif de la réglementation nationale sur les pointes d'ozone, les adaptations régionales permettant de renforcer leur action au

nord du domaine dans les zones affectées par les émissions des GSP. Ces efforts supplémentaires aboutissent selon les calculs du modèle à des impacts très proches de ceux qui pourraient être induits par le scénario traduisant le respect de la directive NEC.

Si les résultats du scénario régional considéré comme le plus réaliste (SC3) sont encourageants, l'impact sur les différents seuils est insuffisant. Ainsi, pour ces épisodes dont les pointes d'ozone sont bien souvent au dessus de 120 ppbv, les réductions d'émissions permettent de réduire le nombre de dépassements du seuil d'alerte, mais pas ceux du seuil d'information. Les études menées montrent que dans ces cas, le domaine est aussi fortement influencé par des conditions aux limites élevées en raison d'épisodes européens généralisés, liés à des masses d'air stagnantes (principalement pour les épisodes de 2003).

Nous avons alors effectué une simulation régionale avec l'inventaire SC3, alimentée par des conditions aux limites calculée avec un inventaire 2010 disponible dans le cas du projet CITY DELTA (<http://rea.ei.jrc.it/netshare/thunis/citydelta/>). Les cartes d'Impact Pic (non présenté ici) montrent que :

- ┆ Aux limites du domaine, le scénario engendre de fortes diminutions des maxima diurnes (-20 ppbv)
- ┆ Dans le panache, l'impact est diminué de moitié (-6 à -10 ppbv) mais reste tout de même significatif

Ces résultats indiquent que le contrôle des émissions extérieures au domaine est fortement bénéfique pour les sites localisés sous l'influence directe des masses d'air importées (tels que Arles ou Avignon situés à proximité des bords du domaine). Ce type d'action permet également d'affecter le panache régional au centre du domaine. Toutefois, c'est la diminution des émissions de la région qui permet de réduire le plus fortement les concentrations maximales d'ozone. Ceci met en relief la **nécessité de mener une double action, au niveau régional et au niveau continental**. Nos tests indiquent que cette même avec cette action européenne **on ne pourra probablement pas éradiquer les dépassements des seuils de qualité de l'air en ozone**. Une action ponctuelle sur les émissions (mise en œuvre de mesures d'urgence) dans le cas d'un probable épisode sévère reste donc à considérer.

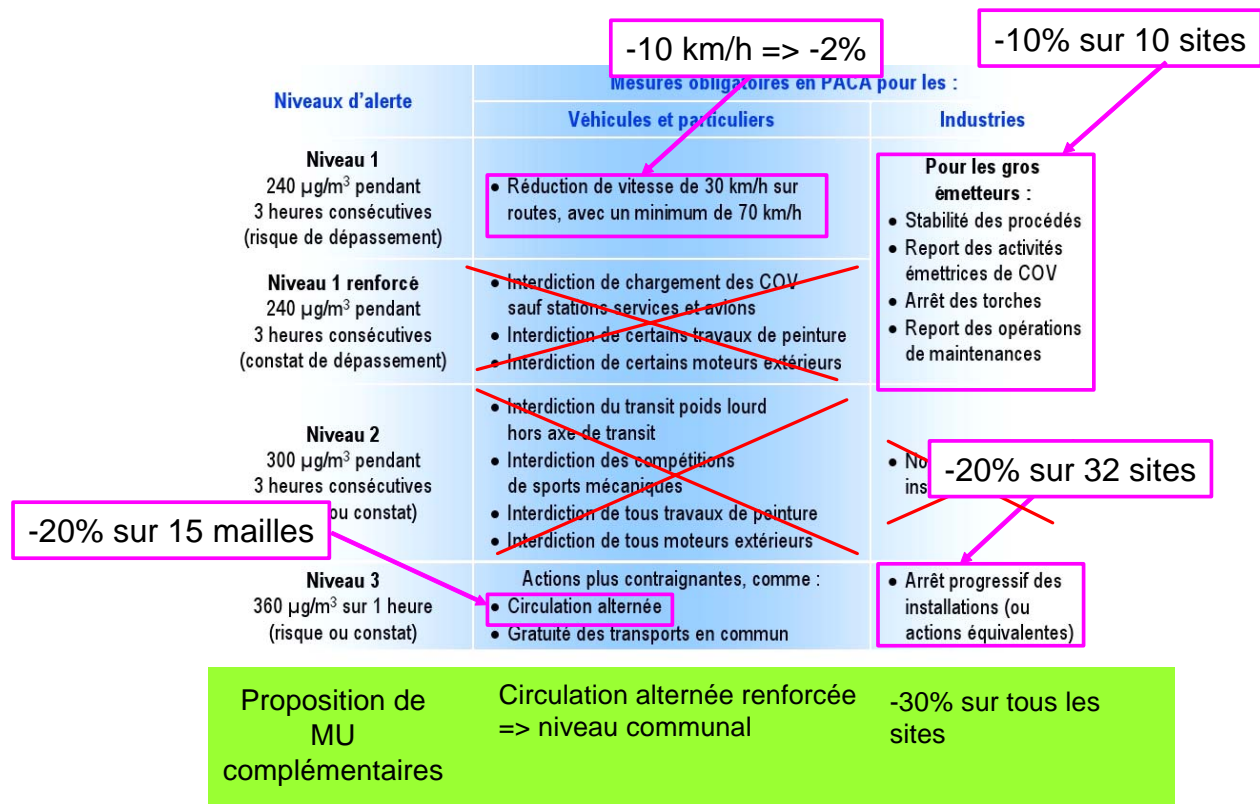
5.5 Mesures d'urgences

Pour diminuer plus fortement les pointes d'ozone dans la troposphère, il est nécessaire de renforcer les mesures d'action sur le long terme en mettant en place des mesures restrictives visant spécifiquement ce polluant. Les textes actuels prévoient la mise en oeuvre d'une telle action lors d'épisodes de pollution photochimique intenses. Quelle est alors la marge d'action sur les pointes d'ozone que l'on peut espérer avoir avec ces mesures ponctuelles?

L'évaluation de mesures d'urgence visant à réduire la pollution à l'ozone n'a encore fait l'objet d'aucune publication. Leur impact sur les émissions est effectivement difficile à estimer car elles sont, en Europe, peu mises en oeuvre. De plus, les retours d'expérience, lorsqu'ils existent, sont très incomplets. Pourtant, l'enjeu en matière de politique environnemental est important car ces mesures sont coûteuses. Notre rôle dans cette étude a été d'apporter une expertise scientifique afin de fournir un retour aux décideurs politiques sur l'impact des mesures d'urgence sur les pointes d'ozone.

Les restrictions d'activité en situation de pic de pollution à l'ozone, sont stipulées dans les arrêtés préfectoraux portant sur la mise en oeuvre des mesures d'urgence. Le dispositif défini est complexe. Il vise des restrictions d'activités s'appliquant aux secteurs routier et industriel ainsi qu'aux particuliers, telles que des interdictions de travaux de peinture. Ces mesures sont graduées selon 4 niveaux de sévérité proportionnelle à celle de l'épisode. Le dispositif prévoit une mise en oeuvre des mesures sur observation d'un dépassement de seuil, mais aussi, et ce pour la première fois, sur prévision par modélisation, ce qui permet de déclencher les dès la veille au soir. Ainsi pour le secteur industriel, les restrictions d'activité sont applicables immédiatement après information par les autorités (information délivrée la veille vers 17h00) et délai de mise en oeuvre. Concernant les autres secteurs, elles sont "applicables le lendemain de 6h à 21h" (arrêté inter préfectoral de juin 2004).

Nous avons dans un premier temps sélectionné les mesures à tester, en ne restituant pas celles qui touchaient des secteurs d'activité de faible intensité d'émission, et en outre difficilement transposables en termes de facteurs d'émission. Nous avons décidé d'élaborer des scénarios sur la base des restrictions de niveau 1, 1 renforcé et 3, liées aux secteurs des transports routiers et industriel. La discussion sur les choix de valeurs de réduction des émissions n'est pas présentée ici. Les réductions appliquées sont rappelées dans le schéma ci-dessous.



Les mesures en vigueur sur le trafic routier ne présentent aucun impact significatif sur les émissions, et a fortiori sur les concentrations d'ozone simulées. C'est un des résultats majeurs de ces tests sur les mesures d'urgence. Nous concentrerons néanmoins nos commentaires sur les impacts des mesures complémentaires sur l'ozone proposées par ce travail, afin d'avancer dans l'évaluation de politiques environnementales. Les résultats sont présentés en figure 8 pour l'épisode du 25/06/01. Pour les scénarios de trafic alterné, un impact d'intensité graduelle compris entre -1 ppbv et -2,5 ppbv selon la sévérité du trafic alterné (d'échelle communale à départementale). Malgré l'ampleur de la restriction imposée, les impacts sur les pointes d'ozone restent faibles.

Le scénario de restriction des activités industrielles montre, quant à lui, un effet plus important avec des réductions des maxima d'ozone atteignant des valeurs significatives (4 ppbv de réduction) au nord du domaine. Les sorties de modèle confirment le fait que **la combinaison des mesures sur ces deux secteurs permet d'agir sur l'ensemble du panache et d'obtenir des diminutions des maxima d'environ 5 ppbv sur tout le domaine, ce qui est significatif.**

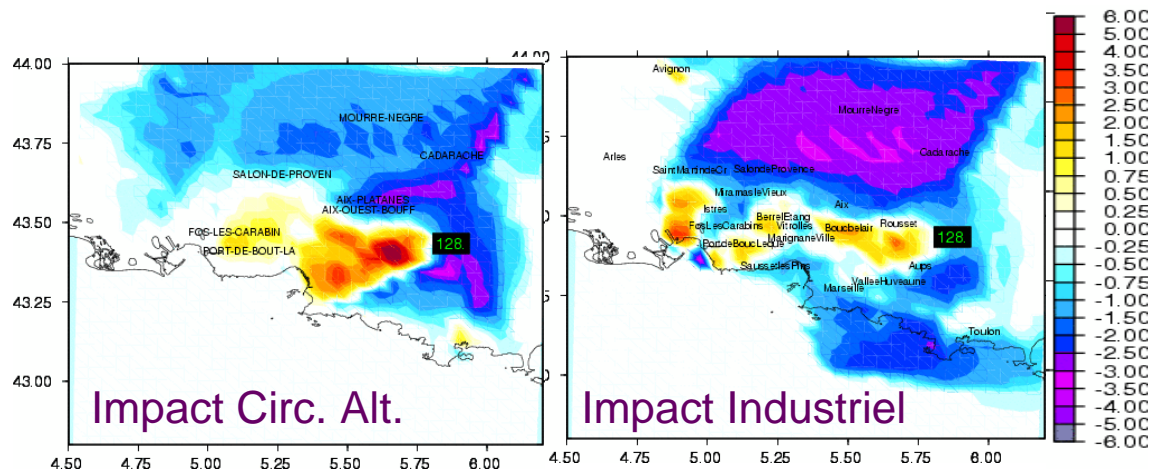


Figure 8. Cartes d'impact pic pour les mesures d'urgence complémentaires les plus strictes, pour une journée représentative : le 26 juin 2001

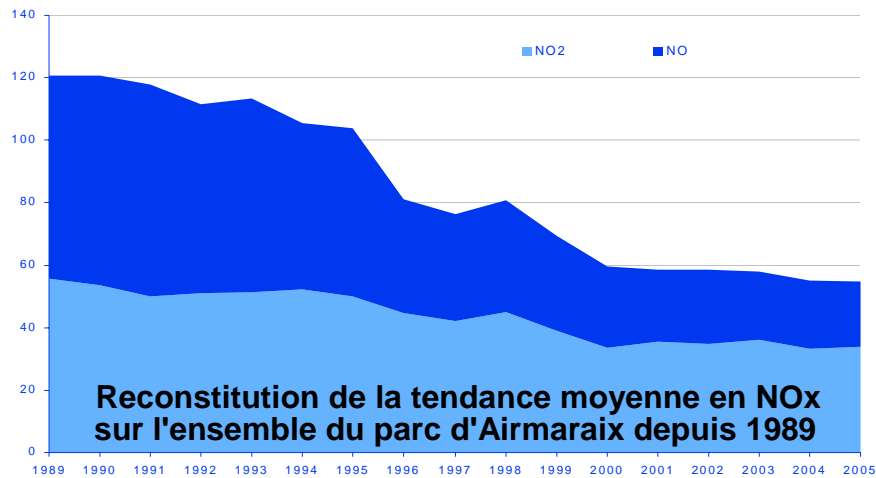
Notre étude a également consisté à tester l'application de réductions d'émissions sur différentes plages horaires afin d'en proposer une optimisation. Il apparaît que la levée des mesures d'urgence est possible en cours de journée sans perte d'efficacité (autour de 12h TU), les émissions postérieures à ce moment étant découplées de la formation d'ozone dans le panache.

En guise de conclusions, il apparaît **indispensable de durcir la réglementation actuelle**, de changer les seuils de déclenchement pour obtenir un effet significatif sur l'ozone, et de sensibiliser les partenaires locaux sur le besoin d'une action volontariste de réduction des émissions. Les effets des mesures complémentaires sont significatifs mais pas encore suffisants au regard de la réglementation sur l'ozone.

6. Conclusions

Les résultats obtenus sur les scénarios d'émission pérennes indiquent que les réglementations engagées sont efficaces en termes de réduction des pointes d'ozone, le modèle utilisé prévoyant des réductions des pointes dépassant 20 ppbv sur certaines journées et zones du domaine. En revanche, sur des régions fortement touchées comme la région PACA, cet effort ne permet pas de respecter toutes les normes de qualité de l'air et l'effort sur les émissions ne doit pas être relâché, que ce soit à l'échelle de la région ou à l'échelle continentale. Ainsi, malgré une nette amélioration par rapport à 2001-2003, les concentrations d'ozone aux limites du domaine simulées pour 2010 sont encore trop élevées et ne laissent qu'une faible marge à la formation d'ozone avant d'atteindre des seuils de concentration critiques. Il semble alors que l'effort doive se poursuivre et s'intensifier également au niveau européen.

L'ensemble des résultats sur les mesures d'urgence nous mène à conclure que l'action ponctuelle actuellement en vigueur a un impact négligeable sur les panaches d'ozone régionaux. De plus, leur système de déclenchement ne permet de mettre en oeuvre les mesures les plus efficaces que pour des épisodes exceptionnels dépassant le seuil de 180 ppbv. La mise en oeuvre de simulations des mesures complémentaires a montré que les maxima d'ozone pourraient être réduits d'environ 5 ppbv pour les mesures les plus strictes, ce qui permet de supprimer 1 à 2 dépassements de seuil sur 9. Nous avons de plus démontré qu'il n'était pas nécessaire de maintenir les restrictions sur l'ensemble de la journée. En revanche, la mise en oeuvre des mesures dès la veille est bénéfique pour le domaine dans le cas où les masses d'air recirculent, et pour les régions voisines lorsque le panache est évacué.



Enfin, les mesures les plus récentes de NO_x, effectuées dans différents réseaux de surveillance de la qualité de l'air (ici sur le parc AIRMARAIX) et sur plusieurs régions de France, semblent indiquer que les niveaux de concentration de NO_x ne baissent pas aussi rapidement que les scénarios le prévoient. Les hypothèses permettant d'expliquer cette tendance sont diverses : améliorations techniques qui ne compensent pas l'augmentation des volumes de trafic routier, cycles d'essai des véhicules non réalistes, modification des moteurs diesel par les utilisateurs, ... la question se pose donc : pourra-t-on respecter les objectifs « réalistes » 2010?