



Programme PRIMEQUAL 2 – PREDIT

Simulation de scénarios de réduction d'émissions



Rapport final

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*

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
2. METHODOLOGIE ET PRINCIPALES ETAPES DU PROJET.....	3
3. MISE EN ŒUVRE D'UN GROUPE DE PILOTAGE, CHOIX ET DEFINITION DES SCENARIOS....	4
4. REALISATION DES SCENARIOS D'EMISSIONS.....	6
5. ANALYSE DES EMISSIONS SUR LES DIFFERENTS SCENARIOS	7
6. MISE EN ŒUVRE DES SIMULATIONS	8
7. RESULTATS DES SIMULATIONS DE SCENARIOS D'EMISSION	11
7.1 LA REPOSE DU SYSTEME AUX MODULATIONS THEORIQUES DES EMISSIONS.....	11
7.2 QUEL POIDS POUR LES GRANDS EMETTEURS ?.....	12
7.3 VERS QUELLE SITUATION PROBABLE 2010 ?.....	15
7.4 REDUCTION DES EMISSIONS A PLUS GRANDE ECHELLE.....	16
7.5 MESURES D'URGENCES	18
8. CONCLUSIONS	21
9. BIBLIOGRAPHIE ASSOCIEE AU PROJET	23
10. PRESENTATIONS ORALES	24

Simulation de scénarios de réduction d'émissions

Rapport final

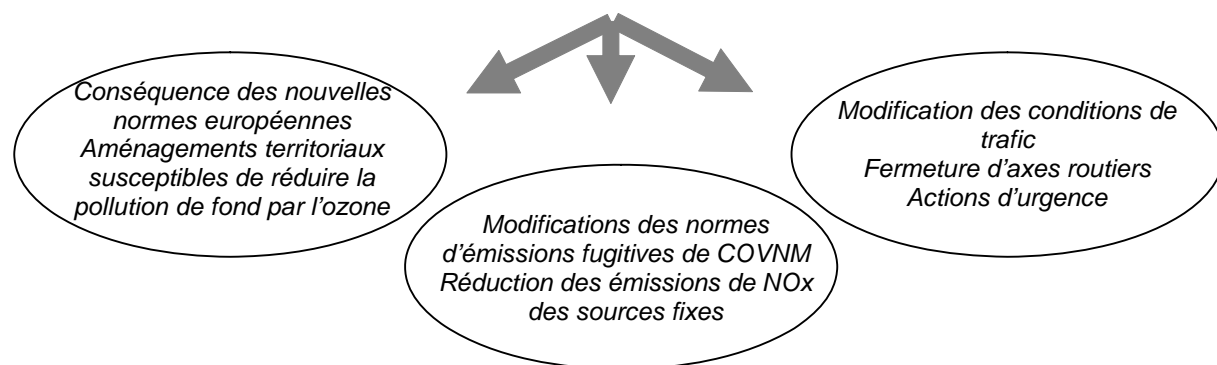
1. Introduction

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 était 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). Les axes de travail ont en revanche été élargis à des études plus techniques de sensibilité de la production d'ozone aux émissions, afin d'apporter des réponses aux questions scientifiques sous-tendues par les questionnements décrits précédemment. Les travaux se sont ainsi 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)*

Le projet s'est entièrement appuyé sur la campagne ESCOMPTE qui s'est déroulée en juin et juillet 2001 sur la région de Berre-Marseille. L'outil choisi est la modélisation eulérienne à l'échelle régionale.

2. Méthodologie et principales étapes du projet

Pour mener à bien ce projet, des cadastres d'émission modifiés correspondant à l'application de normes, prescriptions, ou modulations réalistes des principaux émetteurs (trafic, industrie...) ont été réalisés. Le choix des hypothèses de construction des scénarios et la collecte des données ont été effectués à AIRMARAIX, la mise en forme des scénarios d'émission sous forme de cadastres étant ensuite réalisée au LPCA. Le projet a défini 10 scénarios lors de concertations pluridisciplinaires. Les scénarios ont été conçus afin de couvrir les principales modifications des conditions de trafic, de normes d'émissions industrielles, ainsi que l'évolution de l'infrastructure urbaine et industrielle sur la région ESCOMPTE.

Une étude de l'impact des réductions d'émissions sur la production d'ozone à l'échelle du domaine a en parallèle été conduite via la simulation d'épisodes photochimiques préalablement sélectionnés, sans puis avec scénarios d'émissions.

La simulation des scénarios a été réalisée au LISA à l'aide du modèle CHIMERE (<http://euler.lmd.polytechnique.fr/chimere>) et selon une double approche. D'une part, un jeu de simulations conduites avec des émissions modulées selon des critères scientifiques de réactivité des précurseurs et d'intensité de leurs émissions (modulations « théoriques » des émissions directement réalisées par les modélisateurs) a été constitué. L'objectif était d'aboutir à une évaluation quantitative - et à une meilleure compréhension - de la sensibilité de l'ozone régional aux émissions de ses précurseurs. L'aspect « réduction simultanée ou séparée des émissions de COV et de NOx » mentionné dans l'appel à propositions a été traité via ce premier type de scénarios. Dans cette optique, une caractérisation des sensibilités de l'ozone à chacune des grandes catégories de COV a été mise en œuvre, et une analyse de l'influence spatiale de ces polluants primaires a pu être réalisée au travers de la représentation en 2D de l'impact des réductions de leurs émissions. D'autre part, les simulations avec scénarios d'émissions réalistes tels que mentionnés ci-dessus ont été réalisées et analysées. La comparaison des résultats de ces simulations avec les simulations de référence a permis de mieux évaluer la pertinence des scénarios prospectifs du point de vue de leur impact sur la qualité de l'air en région PACA. Le LaMP a également participé à la simulation des scénarios théoriques avec le modèle RAMS.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ont permis des avancées significatives sur les points suivants :

- † *Quantification de l'influence des réductions d'émissions sur la pollution de fond*
- † *Evaluation des mesures réglementaires engagées et proposition de mesures efficaces de réduction des émissions*
- † *Obtention d'un outil validé d'aide à la décision environnementale*
- † *Acquisition d'une expertise pointue sur le site tant du point de vue descriptif (extension spatio-temporelle des panaches) que du point de vue chimique (sensibilité de la production d'ozone).*

3. 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, s'appuyant sur le réseau de partenaires locaux (DRIRE PACA, ADEME, SPPPI / PPA), 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.

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

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 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 final de scénarios en situation normale comprend :

- † un scénario dit « tendanciel » 2010 (« au fil de l'eau ») noté **SCI**, 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'en 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...)

4. Réalisation des scénarios d'émissions

La réalisation d'inventaires correspondant aux scénarios d'émission comprenait 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 rapports 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 PACA), 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 particulières : analyse des données de vitesses du trafic routier (données SIREDO), étude de l'impact des réductions de vitesse sur les émissions à différentes échéance (MVA consultancy), et analyse de la mise en œuvre des mesures d'urgence dans les Bouches-du-Rhône en 2004 (DRIRE PACA).

La génération des cadastres d'émission a été réalisée au LPCA par mise en œuvre de l'outil POSTICE⁶ (Figure 1). Les principales étapes de mise en œuvre de l'outil sont les suivantes :

- ┆ *La première étape consiste en un regroupement sectoriel des émissions*
- ┆ *Il faut ensuite 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*
- ┆ *La troisième étape est celle de la convolution qui 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 une désagrégation temporelle permettant le passage d'un cadastre annuel en un cadastre horaire par application de clés mensuelles, journalière et horaires*

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.

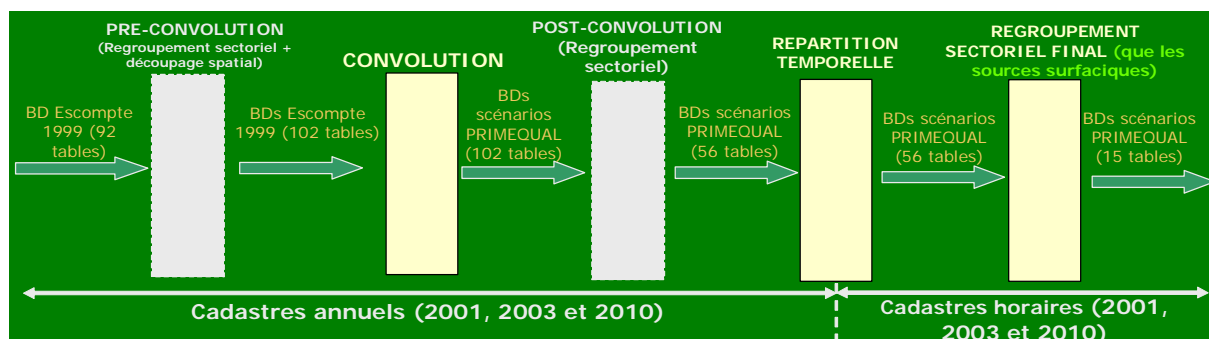


Figure 1. Schéma des travaux mis en œuvre dans l'outil POSTICE

La validation de la chaîne de calculs a été effectuée par les différents partenaires impliqués dans la production des scénarios et des cadastres. Les documents techniques relatifs à l'élaboration et à la validation des cadastres sont référencés dans la bibliographie de ce rapport.

5. 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 2010 SC1 (évolution des activités en cours sans réglementation) 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.

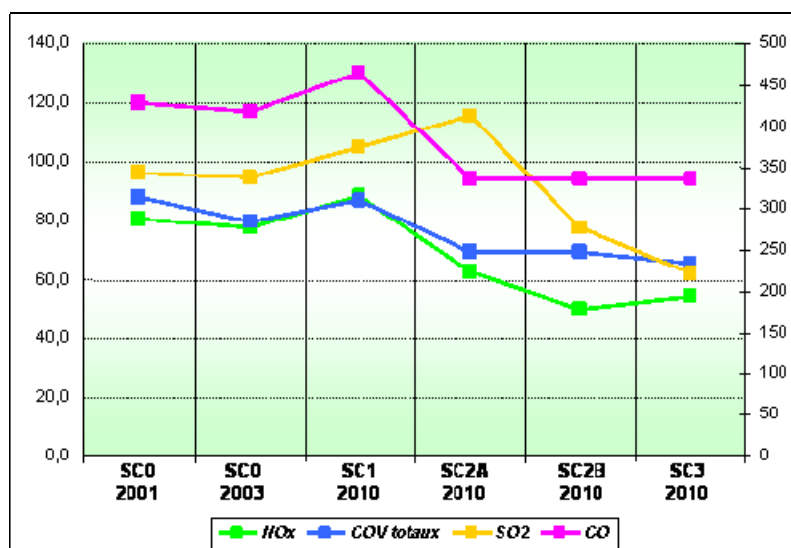


Figure 2. Evolution des émissions dans les différents scénarios

Comparativement à au scénario 2010 tendanciel Sc1, le scénario 2010 national réaliste SC2A (réglementation engagée ou prévue) induit des diminutions marquées des émissions 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 2010 national NEC (SC2B – respect directive NEC) requiert par rapport au scénario 2010 national réaliste (SC2A – réglementation engagée) 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 2010 régional réaliste (SC3) doit simuler la situation 2010 la plus probable pour la zone d'étude. 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 au scénario 2010 national réaliste 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. Le scénario 2010 régional réaliste 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).

6. Mise en œuvre des simulations

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 dynamiques 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 Lasry (voir bibliographie). 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. La Figure 3 ci-dessous présente l'évaluation des biais du modèle en ozone sur un découpage de 6 zones de comportement photochimique similaire. On constate

- ⊥ que les biais sont très faibles dans les deux domaines situés autour de Berre, zones où les maxima d'ozone sont le plus souvent observés
- ⊥ que les biais sont acceptables mais révèlent tout de même une légère sous-estimation des concentrations d'ozone au Nord du domaine (souvent lié toutefois à un décalage dans la localisation du panache oxydant)
- ⊥ une surestimation de l'ozone en ville, phénomène peu préoccupant en raison des faibles concentrations qui y sont mesurées, et principalement causé par la classique différence de représentativité entre mesure et modèle eulérien en zone urbaine

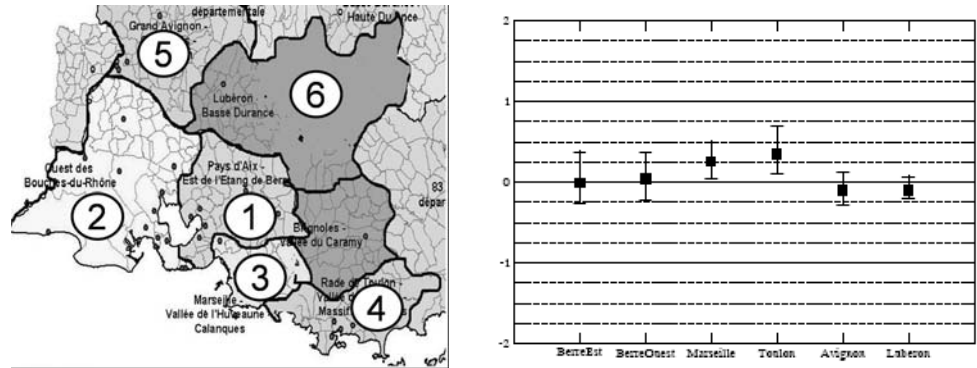


Figure 3. Illustration des calculs de biais utilisés pour l'évaluation et la validation des sorties de CHIMERE. A gauche le découpage du domaine en zones (1) Berre Est (2) Berre Ouest (3) Marseille (4) Toulon (5) Avignon (6) Lubéron. A droite les biais moyens sur le maximum diurne d'ozone calculés sur ces zones pour la POI2.

Des séries temporelles d'ozone, CO et NO_x issues de la campagne et des simulations CHIMERE (Figure 4 à Figure 6) sont également présentées pour illustrer l'accord entre mesures et sorties de modèle. L'ensemble de cette étude de validation est détaillé dans la thèse de F. Lasry.

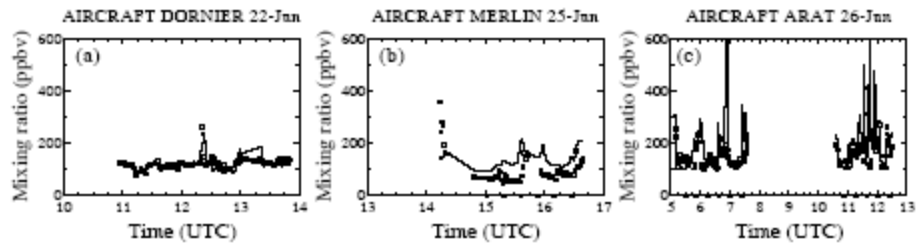


Figure 4. Séries temporelles de CO mesurées (carrés) et modélisées (trait continu)

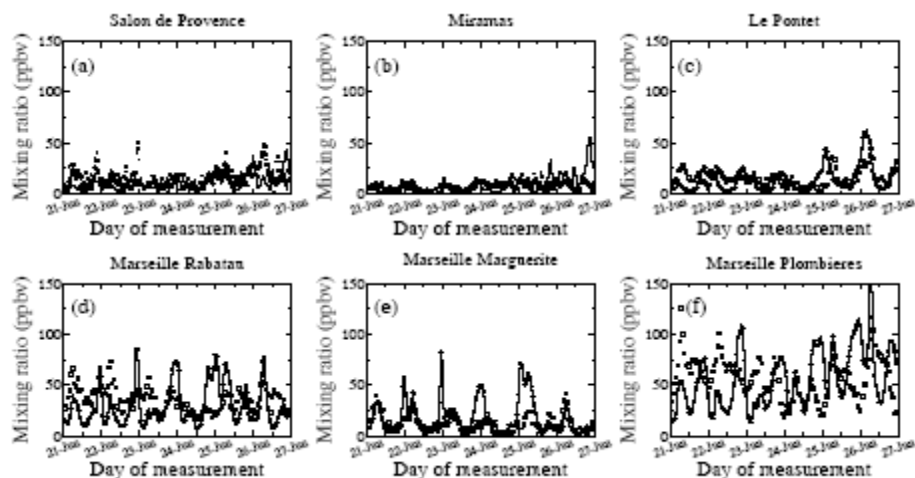


Figure 5. Séries temporelles de NO_2 mesurées (carrés) et modélisées (trait continu)

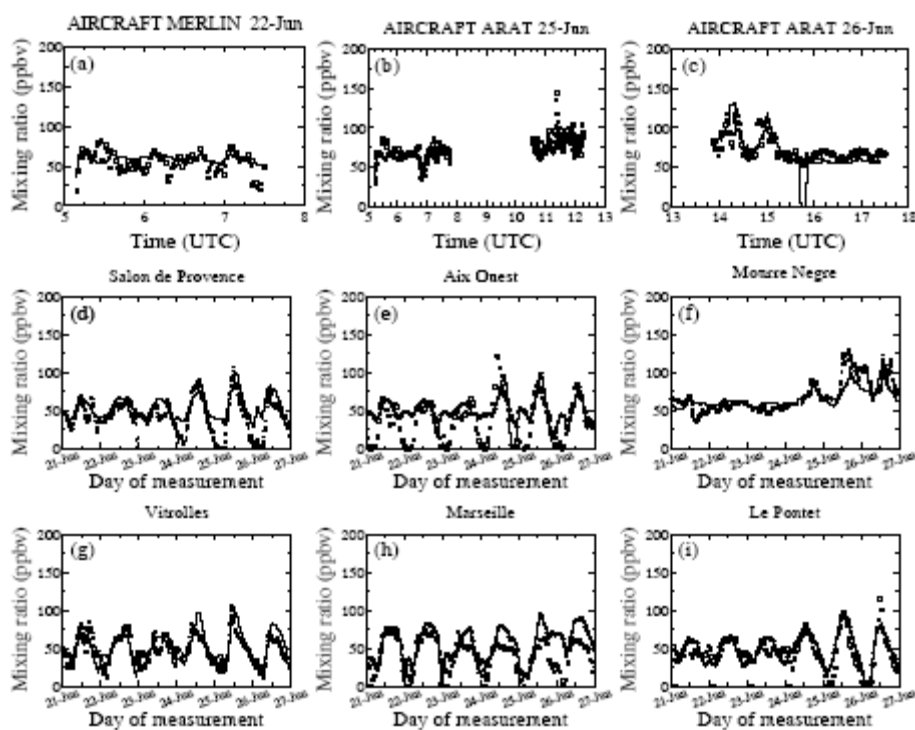


Figure 6. Séries temporelles d' O_3 mesurées (carrés) et modélisées (trait continu)

Au-delà des journées d'étude fournies par la campagne, de nouveaux épisodes photochimiques ont été retenus pour la simulation, afin de pouvoir obtenir un ensemble de cas représentatifs des influences auxquelles le site est soumis. Nous avons ainsi rajouté les quinze premières journées du mois d'août 2003, choisies pour l'intensité des pointes d'ozone observées sur la région, ce qui, avec les Périodes d'Observation Intensive de la campagne, constitue un jeu de 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.

7. Résultats des simulations de scénarios d'émission

Ce travail s'est attaché à analyser les résultats de modélisation en termes d'impact des émissions 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.

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 », représentant la différence entre les maxima diurnes d'ozone du scénario d'émission et ceux de la simulation de référence. Ce type de carte traduit 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 résultats seront également présentés sous forme de cartes de dépassements de seuils calculés sur les 24 journées par le modèle dans chaque scénario.

7.1 La réponse du système aux modulations théoriques des émissions

Dans un premier temps, la sensibilité du système atmosphérique régional aux émissions a été analysée. 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% (soit un ordre de grandeur proche des efforts requis 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 7).

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 - majoritaires quand les NOx sont présents en forte concentration - sont prépondérantes dans le bilan de l'ozone.*
- † *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 de 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 s'étalent sur une zone d'une cinquantaine de kilomètres de rayon 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**.

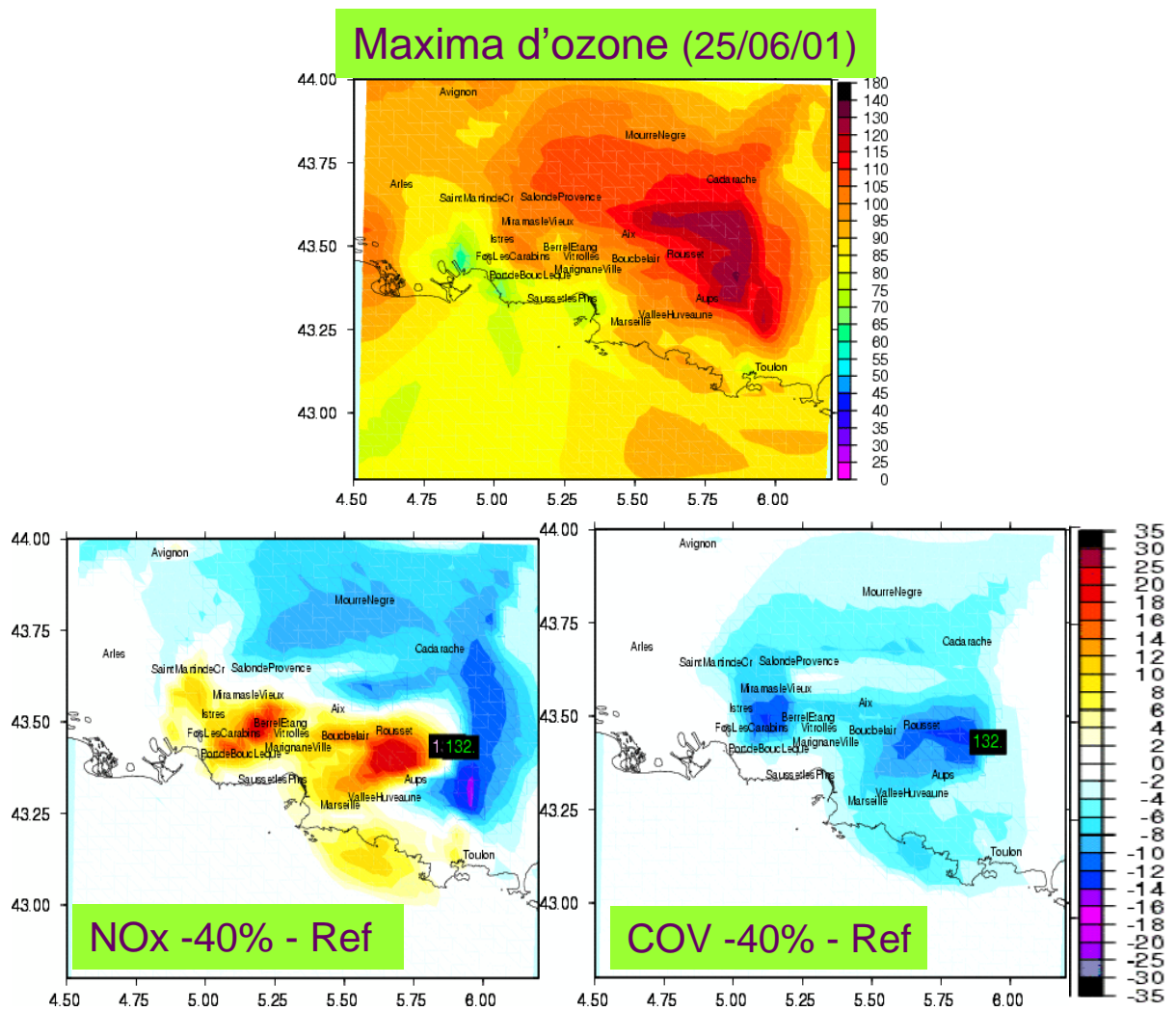


Figure 7. Cartes de maximum d'ozone et d'impact pic pour les sensibilités aux NOx et aux COV sur une journée représentative

7.2 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 a eu pour but l'évaluation et la classification de 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%.

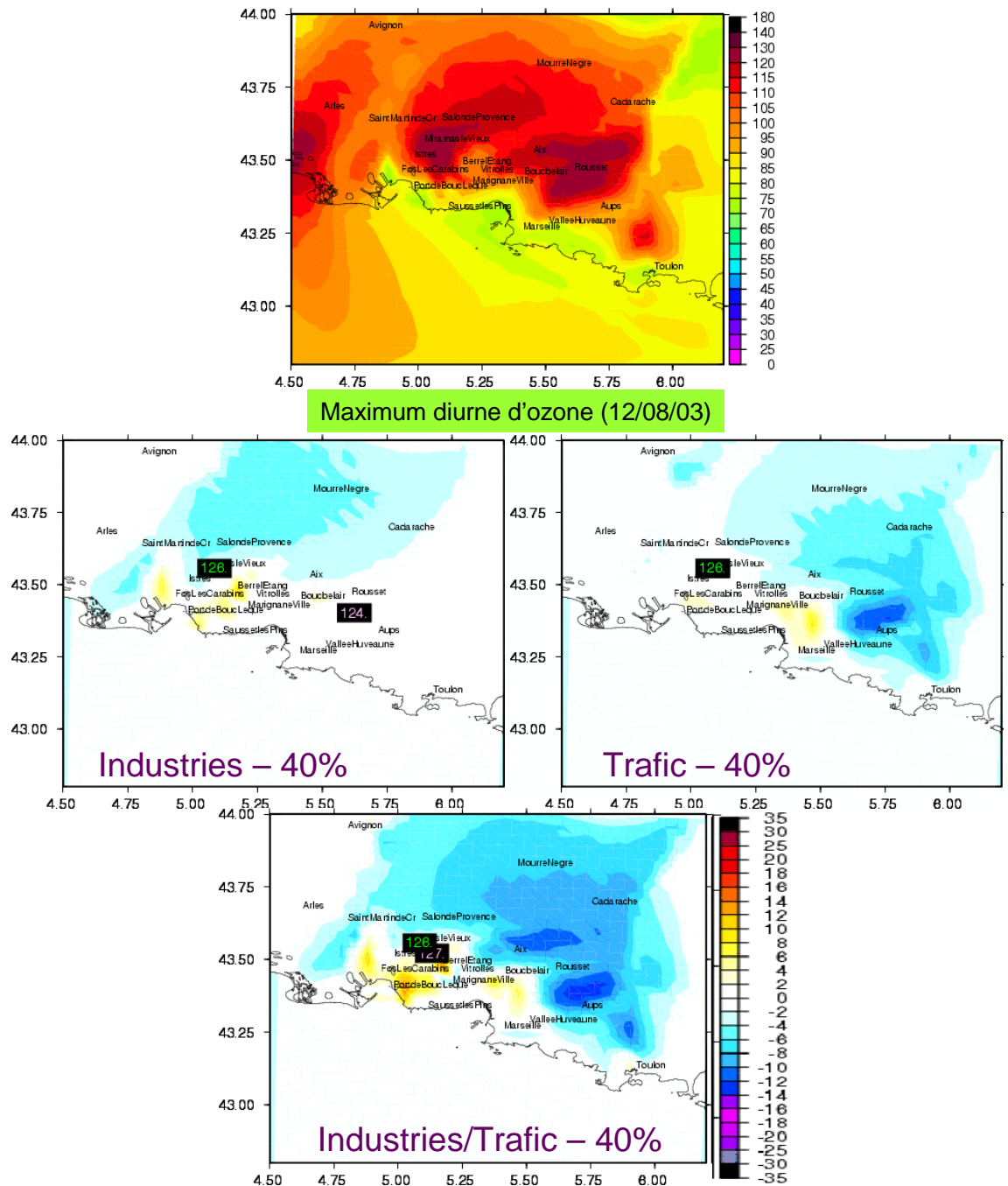


Figure 8. Cartes de maximum d'ozone et d'impact pic pour les sensibilités aux secteurs d'activité le 12 août 2003

Les cartes d'Impacts Pics pour l'ensemble de ces scénarios sont représentées en Figure 8. Cartes de maximum d'ozone et d'impact pic pour les sensibilités aux secteurs d'activité le 12 août 2003 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**, aucun secteur ne pouvant être considéré comme gérant à lui seul la génération des pointes d'ozone sur le domaine.

L'efficacité des scénarios de trafic et GSP sur les dépassements du seuil d'alerte est présentée en Figure 9. 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.

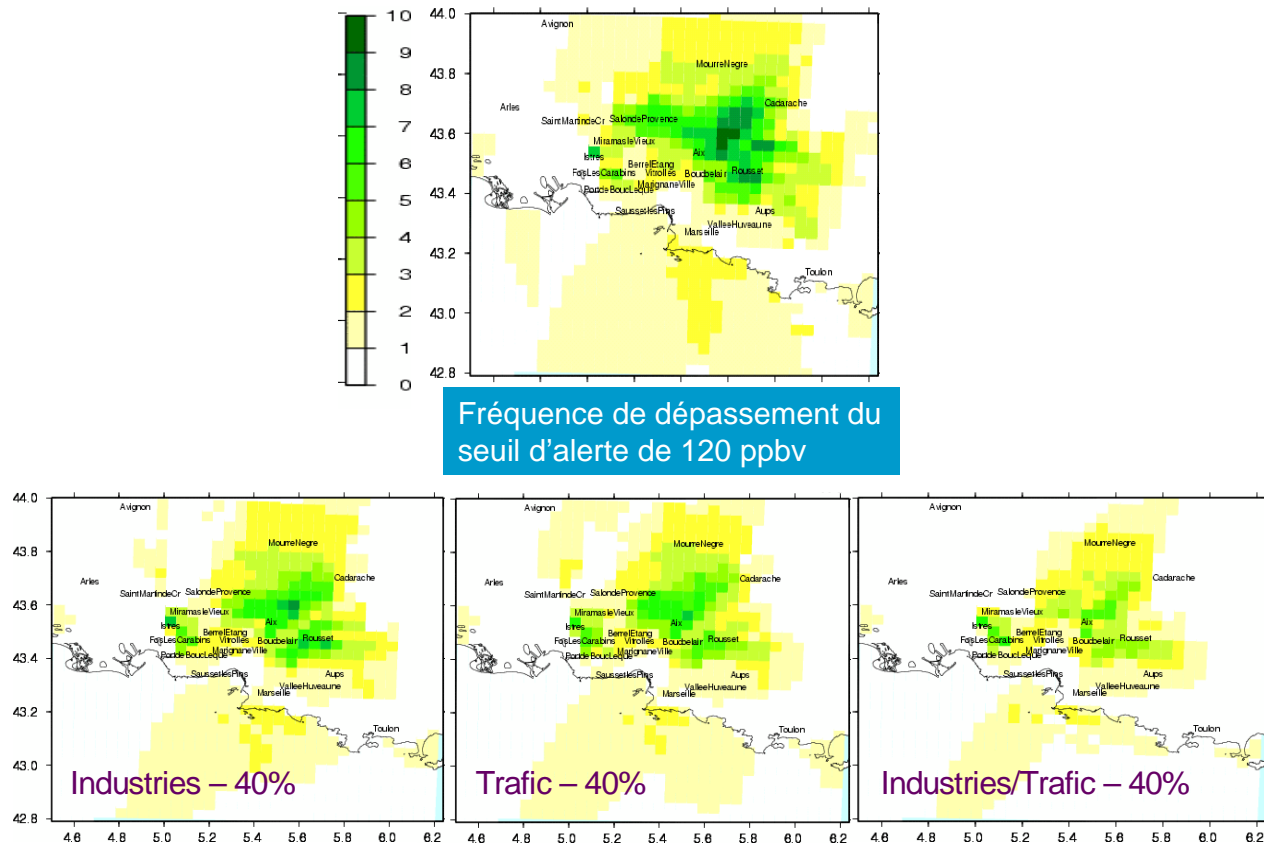


Figure 9. Cartes cumulées de dépassements du seuil de 120 ppbv pour les tests de sensibilité aux secteurs d'activité

7.3 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 10 pour une journée représentative des tendances observées, sous forme de carte d'impact pic.

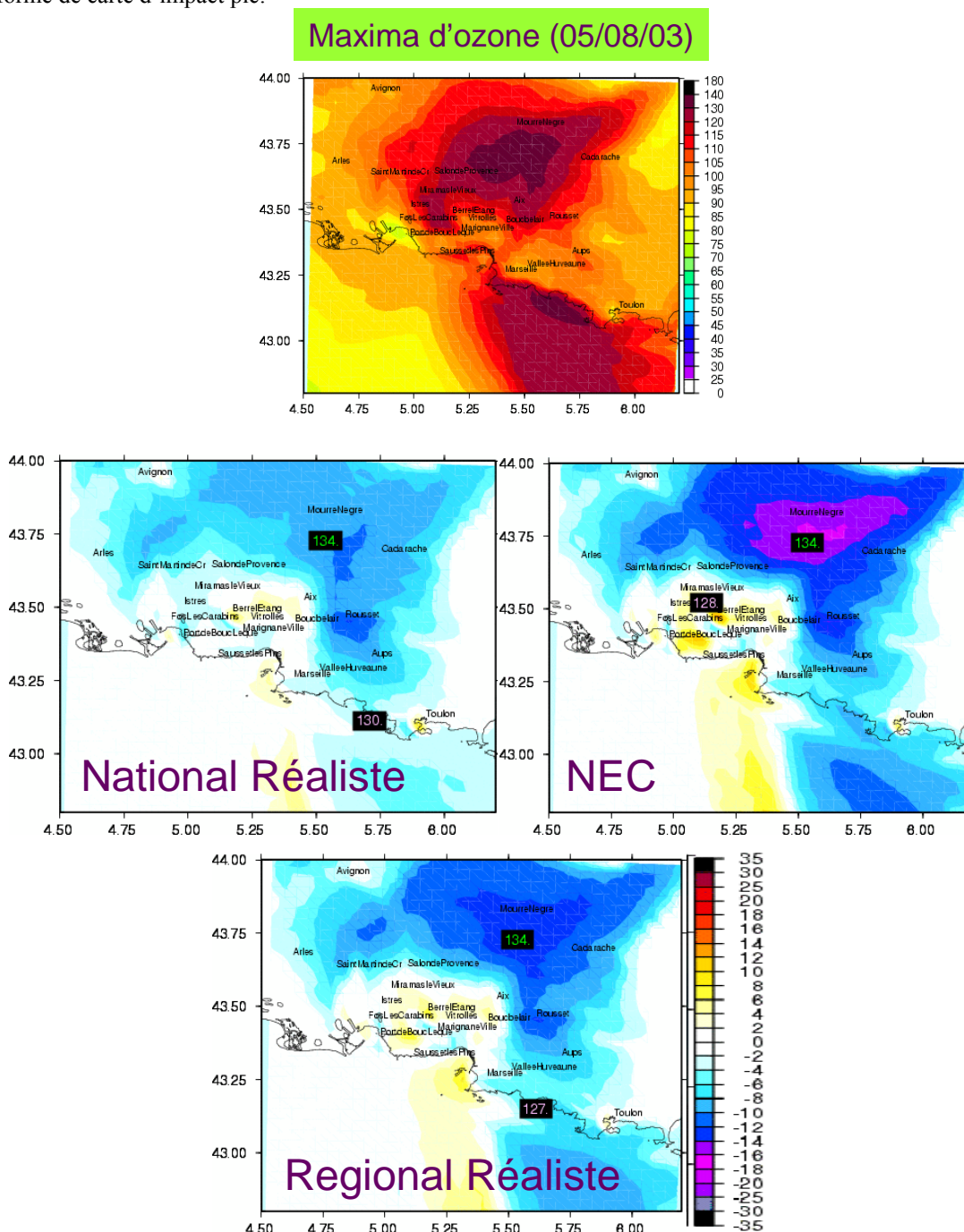


Figure 10. Cartes d'impact pic sur les différents scénarios prospectifs pour une journée représentative, le 5 août 2003

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 11) 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.

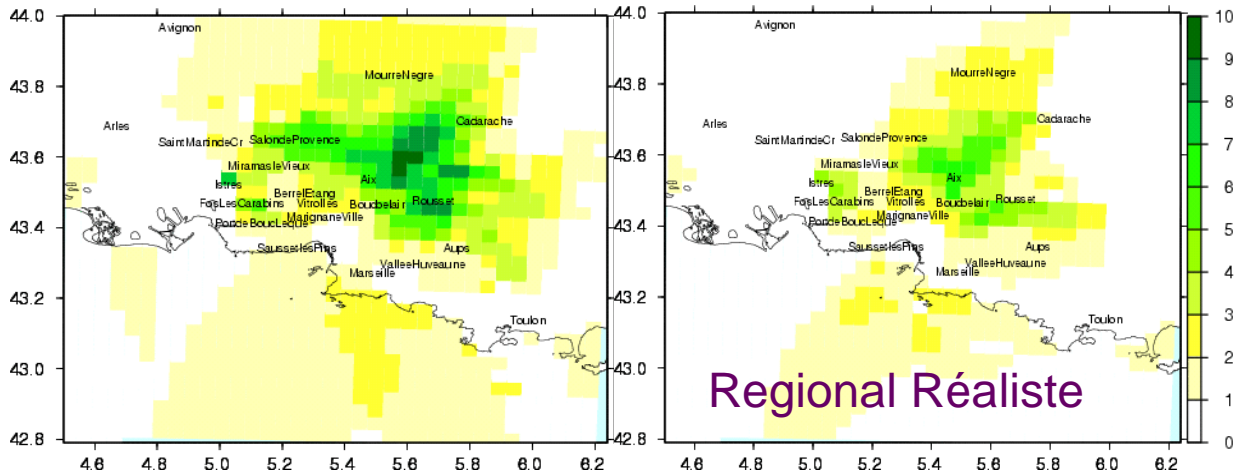


Figure 11. Cartes cumulées de dépassement du seuil d'alerte (120ppbv) pour le cas de référence et le scénario SC3 pour une journée représentative : le 5 août 2003

7.4 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 calculées avec la version continentale de CHIMERE, 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 (illustration en Figure 12. Impact sur le maximum diurne en ozone d'une application régionale de la législation 2010 (schéma de gauche) et d'une application continentale de la législation 2010 (schéma de droite) sur une journée type) 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

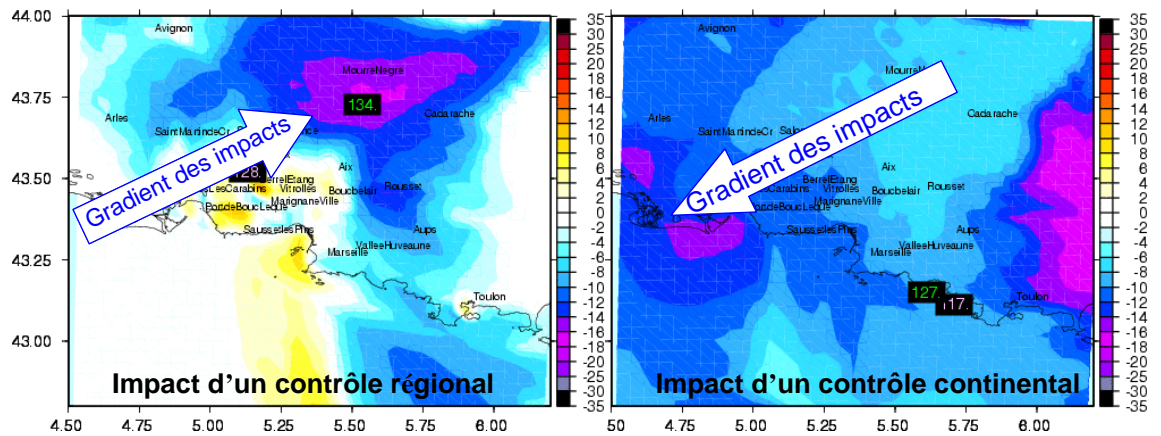


Figure 12. Impact sur le maximum diurne en ozone d'une application régionale de la législation 2010 (schéma de gauche) et d'une application continentale de la législation 2010 (schéma de droite)

Ces résultats indiquent que le contrôle des émissions extérieures au domaine est fortement bénéfique pour les sites périphériques au panache tels que Arles ou Avignon, donc plus sensibles à l'intensité de l'apport en ozone à longue distance. Il joue ainsi un rôle significatif sur les valeurs d'ozone cumulées telles qu'exprimées dans les indices de type AOT60. Le cœur du panache régional, au centre du domaine, est également affecté par un contrôle des émissions à grande échelle. L'impact y est toutefois modéré, et c'est la diminution des émissions locales qui permet de réduire le plus fortement les pointes d'ozone à l'intérieur du panache. On peut ainsi penser que la perturbation de la masse d'air induite par les émissions locales prend le pas sur la composition chimique initiale des masses d'air et gère majoritairement l'évolution chimique de tout le panache.

Ceci met en relief la **nécessité de mener une double action, au niveau régional et au niveau continental**. Néanmoins, les résultats des tests indiquent que même la combinaison de ces actions **ne pourra probablement pas permettre d'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.

7.5 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. Il est donc légitime de se poser les questions suivantes :

- † *Quelle est la marge d'action sur les pointes d'ozone que l'on peut espérer avoir en réduisant de manière ponctuelle les émissions ?*
- † *Les mesures actuellement engagées exploitent-elles suffisamment cette possibilité d'action sur l'ozone ?*

L'évaluation de mesures d'urgence visant à réduire la pollution à l'ozone est un exercice difficile en raison de la complexité des modifications à imposer au cadastre d'émissions pour obtenir une situation réaliste. De plus, les retours d'expérience, lorsqu'ils existent, sont très incomplets. Pourtant, l'enjeu en matière de politique environnementale est primordial car ces mesures sont parfois coûteuses et leur mise en oeuvre est souvent liée à des situations critiques de pollution. L'application de telles mesures a donc été très peu évaluée jusqu'à présent. Les études remontent aux années 90, concernent essentiellement l'Allemagne et les Pays-Bas, et se focalisent sur des zones fortement influencées par le transport à grande distance de panaches primaires et secondaires. Les résultats de ces études montrent l'inefficacité et la lourdeur de la mise en oeuvre des principales mesures sur le trafic routier (réduction des vitesses principalement), mais indiquent que cette inefficacité provient en grande partie de la faible production photochimique locale. Notre rôle dans cette étude a été d'apporter une expertise scientifique sur une zone où la production locale d'oxydants est prépondérante, et où les actions locales ont donc un réel potentiel. L'objectif est de fournir un retour scientifique aux décideurs politiques sur l'impact des mesures d'urgence actuelles et envisageables 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'activité s'appliquant aux secteurs routier et industriel ainsi qu'aux particuliers (telles que des interdictions de travaux de peinture par exemple). 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 du dépassement ou de sa persistance, ce qui permet de déclencher les mesures dès la veille au soir. Ainsi pour le secteur industriel, les restrictions d'activité sont applicables immédiatement après information par les autorités (informations délivrées la veille vers 17h00 locales) et délai de mise en oeuvre. Concernant les autres secteurs, elles sont "applicables le lendemain de 6h à 21h" locales (arrêté inter préfectoral de juin 2004).

Nous avons dans un premier temps sélectionné les mesures à tester, en ne restituant pas celles qui concernaient des secteurs d'activité faiblement émetteurs, surtout lorsque ces mesures s'avéraient difficilement transposables en termes de facteurs d'émission. Nous avons ainsi décidé d'élaborer des scénarios sur la base des restrictions de niveau 1, 1 renforcé et 3, pour tout ce qui touchait aux transports routiers et au secteur industriel. La discussion sur les choix de valeurs de réduction des émissions n'est pas présentée ici mais elle est détaillée dans la thèse de Fanny Lasry précédemment mentionnée ainsi que dans toutes les notices de travail listées en référence. Les réductions appliquées sont rappelées dans l'image ci-dessous.

Niveaux d'alerte	Mesures obligatoires en PACA pour les :	
	Véhicules et particuliers	Industries
Niveau 1 240 µg/m ³ pendant 3 heures consécutives (risque de dépassement)	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de vitesse de 30 km/h sur routes, avec un minimum de 70 km/h 	Pour les gros émetteurs : <ul style="list-style-type: none"> Stabilité des procédés Report des activités émettrices de COV Arrêt des torches Report des opérations de maintenances
Niveau 1 renforcé 240 µg/m ³ pendant 3 heures consécutives (constat de dépassement)	 <ul style="list-style-type: none"> Interdiction de chargement des COV sauf stations services et avions Interdiction de certains travaux de peinture Interdiction de certains moteurs extérieurs 	
Niveau 2 300 µg/m ³ pendant 3 heures consécutives (risque ou constat)	 <ul style="list-style-type: none"> Interdiction du transit poids lourd hors axe de transit Interdiction des compétitions de sports mécaniques Interdiction de tous travaux de peinture Interdiction de tous moteurs extérieurs 	<ul style="list-style-type: none"> No ins
Niveau 3 360 µg/m ³ sur 1 heure (risque ou constat)	Actions plus contraignantes, comme : <ul style="list-style-type: none"> Circulation alternée Gratuité des transports en commun 	<ul style="list-style-type: none"> Arrêt progressif des installations (ou actions équivalentes)

Les mesures en vigueur sur le trafic routier sont de deux types : réduction des vitesses et circulation alternée. La première mesure de réduction de 30km/h des vitesses, simulée spécifiquement pour cette étude à l'aide de modèles d'émissions (cf. rapport F. Buffard, MVA), montre un effet sur les émissions de polluants primaires relativement faible (quelques pourcents). Majorées à 5% pour les activités concernées, ces réductions d'émission n'induisent aucune diminution discernable des pointes d'ozone dans le modèle. De même, le trafic alterné tel qu'il est défini dans les textes n'a qu'un impact très faible sur les émissions totales de polluants, en raison de son application sur une zone géographique très restreinte (quelques axes par agglomération). Le modèle prévoit logiquement un impact négligeable sur les concentrations d'ozone (voir Figure 13).

Les mesures d'urgence pour le secteur industriel sont basées sur un principe plus ou moins volontariste, et ne s'appliquent qu'à un nombre limité de sites. Compte tenu de l'absence de bilans précis concernant les réductions attendues, nous avons appliqué dans le modèle une diminution cible des émissions (optimiste au vu de l'unique retour d'expérience dans ce domaine au moment des travaux) de 10% et 20% respectivement pour les niveaux 1R et 3, pour l'ensemble des sites concernés par les arrêtés préfectoraux. Le modèle indique que l'influence sur la production d'ozone est très limitée: les pointes d'ozone sont au mieux réduites de 1 à 2 ppbv (Figure 13).

Ces résultats constituent un des points majeurs de ce travail. Ils indiquent que la réglementation actuelle, trop segmentée, trop graduelle et encore trop peu contraignante, n'est pas en mesure d'apporter une réponse satisfaisante aux problèmes de pollution photo oxydante extrême. Nous avons donc ouvert notre étude à l'impact de mesures d'urgence complémentaires, élaborées en concertation avec les partenaires locaux (DRIRE PACA, AIRMARAIX) dans la lignée des mesures existantes, afin d'avancer dans l'évaluation de possibles politiques environnementales. Les résultats sont présentés en Figure 14 pour l'épisode du 25/06/01, pour une circulation alternée étendue à différentes échelles géographiques. Un impact d'intensité graduelle, compris entre -1 ppbv et -2,5 ppbv selon la sévérité du trafic alterné (d'échelle communale à départementale), est simulé par le modèle. Malgré l'ampleur de la restriction imposée, les impacts sur les pointes d'ozone restent faibles, mais cet effort devient significatif lorsqu'il est couplé à des mesures plus sévères sur les activités industrielles. En effet, le scénario complémentaire industriel montre un effet plus important sur l'ozone puisque le modèle simule des réductions des maxima atteignant 4 ppbv au Nord du domaine. Les sorties de modèle confirment le fait que **la combinaison de mesures sévères sur ces deux secteurs permet d'agir sur l'ensemble du panache, et d'obtenir des diminutions des pointes d'ozone d'environ 5 ppbv sur l'ensemble du domaine, ce qui est significatif dans le modèle.**

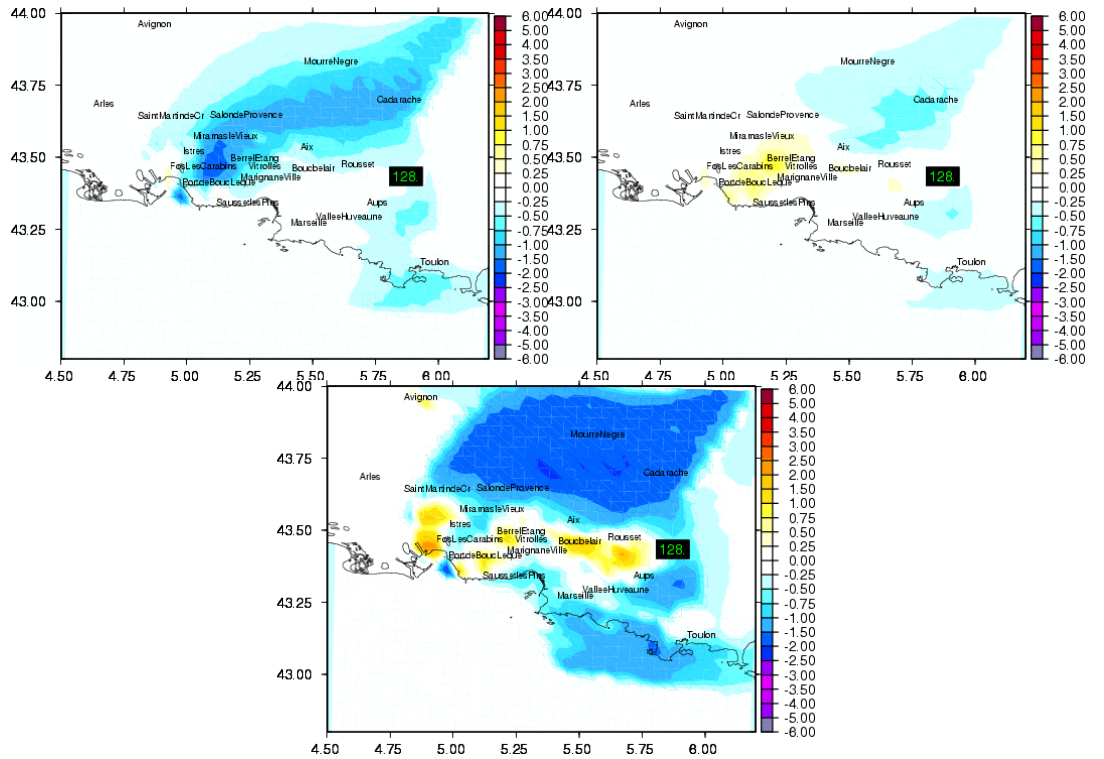


Figure 13. Cartes d'impact pic pour les mesures d'urgence de niveau 3, pour une journée représentative : le 26 juin 2001. En haut la simulation des mesures individuellement prises sur le trafic (gauche) et sur les industries (droite), en bas l'action combinée sur les deux secteurs.

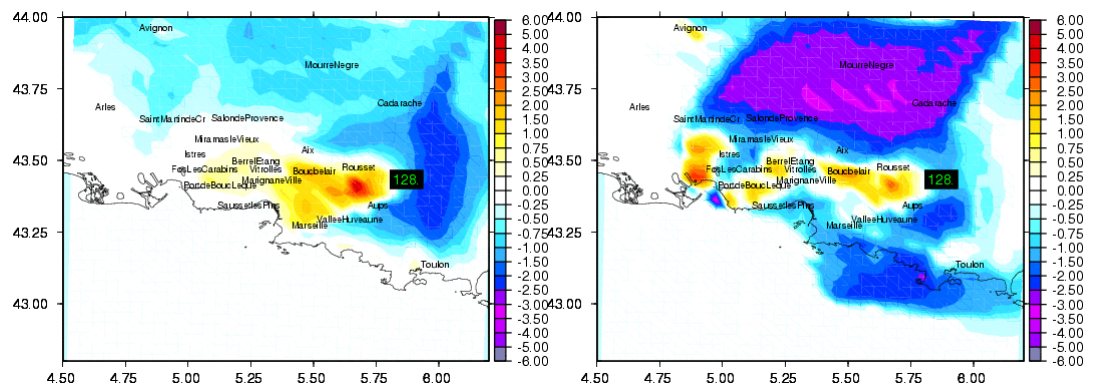


Figure 14. Cartes d'impact pic pour les mesures d'urgence complémentaires les plus strictes, pour une journée représentative : le 26 juin 2001. A gauche la simulation des mesures individuellement prises sur le trafic et à droite la combinaison avec l'effort sur les industries.

Une étude couplant faisabilité et coût de la mise en œuvre des mesures est bien évidemment nécessaire à une évaluation globale de toute proposition d'action. Néanmoins cette première étape d'évaluation des mesures d'urgence apporte deux informations essentielles : (i) il est possible d'agir localement et ponctuellement sur les pointes d'ozone, dans la limite de 5 ppbv environ pour un site tel que celui étudié, ce qui reste très modéré mais permet tout de même pour un grand nombre d'épisodes de repasser au-dessous du seuil d'alerte de 120 ppbv (cf. thèse F. Lasry), (ii) un impact fort sur l'ozone ne peut être obtenu que par la mise en œuvre d'actions sévères dont la faisabilité reste à étudier et devant être soutenues par une action sur le long terme, afin d'agir efficacement sur la formation d'ozone à l'échelle régionale.

Enfin, nous avons également testé 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 revanche, une mise en œuvre anticipée (sur prévision) de ces mesures (la veille pour les émissions industrielles) apparaît bénéfique pour les zones côtières en raison des recirculations de panaches dans les brises de terre et de mer sur la région. Le détail de cette étude est exposé dans les travaux de M. Havre et repris dans la thèse de F. Lasry.

En guise de conclusions, en vue de réduire le nombre de dépassements des seuils réglementaires pour l'ozone, il apparaît **indispensable de durcir la réglementation actuelle**, et de **changer les conditions de déclenchement** des mesures d'urgence afin de pouvoir mieux anticiper les situations critiques. La sensibilisation des partenaires locaux, sur le besoin d'une action plus volontariste de réduction des émissions, semble également un point important de la réussite de ces politiques environnementales. Enfin, les effets des mesures complémentaires sur l'ozone étant significatifs mais pas encore suffisants au regard de la réglementation existante, il est indispensable de ne pas découpler cet effort d'un effort encore plus soutenu sur le long terme, en particulier au vu de l'augmentation du bruit de fond européen en ozone lié aux transports intercontinentaux.

8. Conclusions

De nombreux scénarios d'émission prospectifs et théoriques ont été conduits sur la région ESCOMPTE à l'aide du modèle CHIMERE. Chacune des versions de l'inventaire a été appliquée aux 24 journées sélectionnées parmi les épisodes photochimiques observés sur le site. Après évaluation du modèle sur des journées richement documentées par la mesure, les résultats obtenus sur l'ensemble de ces simulations nous permettent de décrire et de quantifier la réponse de l'ozone aux réductions d'émissions de polluants primaires dans un système Méditerranéen fortement producteur d'ozone.

Les résultats obtenus sur les scénarios d'émissions 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 de formation locale 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 œuvre les mesures les plus efficaces que pour des épisodes exceptionnels dépassant le seuil de 180 ppbv. La mise en œuvre 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. 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 œuvre 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 (et présentées en Figure 15 sur le parc AIRMARAIX), 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?

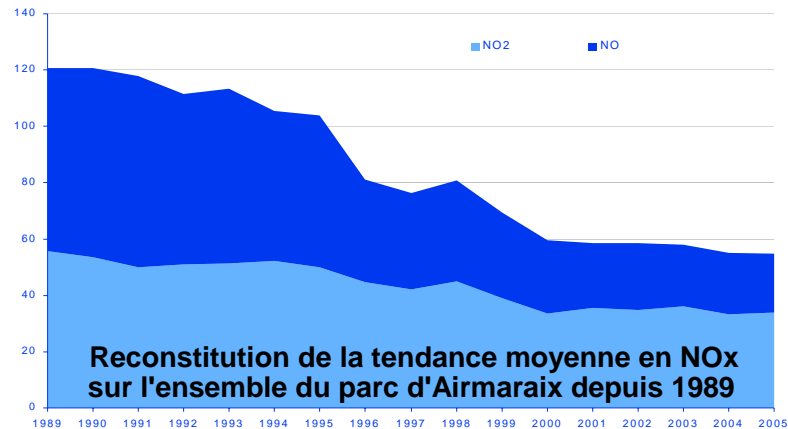


Figure 15. Concentrations moyennes annuelles (en µg/m³) en NO et NO₂ relevées sur l'ensemble du parc AIRMARAIX entre 1989 et 2005

9. Bibliographie associée au projet

- Coll I., F. Lasry, S. Fayet, A. Armengaud, R. Vautard, **Simulation and evaluation of 2010 emission control scenarios in a Mediterranean area**, *Atm. Env.*, Vol 43, Issue 27, pp 4194-4204, 2009
- Lasry F., I. Coll, S. Fayet, M. Havre and R. Vautard, **Short-term measures for the control of ozone peaks: expertise from CTM simulations**, *Journal of Atmospheric Chemistry*, Vol57 n°2, 2007.
- 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.*
- Lasry F., I. Coll, S. Fayet, M. Samaali, G. Causera, C. Lesponne, S. François, and J.L. Ponche, **Ozone sensitivity study – evaluation of the efficiency of the legislations for the year 2010**, *Air Pollution XIV, Ed. JWS Longhurst and C.A. Brebbia, WIT press, pp493-501, 2006.*
- Havre M., **Evaluation et optimisation de la mise en oeuvre de mesures d'urgence de réduction des émissions en région PACA à l'aide du modèle eulérien CHIMERE**, *Rapport de Stage de Maîtrise de Chimie, Juin 2005.*
- François S., E. Grondin, S. Fayet, J.-L. Ponche, **The establishment of the atmospheric emission inventories of the ESCOMPTE program - Atmospheric Research 74 (2005) 5– 35**
- Coll I., F. Lasry, S. Fayet, C. Lesponne, M. Samaali, J.L. Ponche, S. Cautenet, J. Arteta and R. Vautard, **Simulation of emission reduction scenarios**, *Proceedings of the 6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005.*
- Lasry F., I. Coll, S. Fayet, C. Lesponne, M. Samaali, A. Armengaud, J.L. Ponche, and S. François, **Ozone production and the simulation of emission reductions scenarios**, *Proceedings of the 6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005.*
- Fayet S., M. Samaali, C. Lesponne, J.L. Ponche, F. Lasry and I. Coll, **Strategy of definition of realistic emission reduction scenarios**, *Proceedings of the 6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005.*
- Samaali M., S. Fayet, C. Lesponne, S. François, J.L. Ponche and I. Coll, **The PRIMEQUAL2-PREDIT scenarios: Methodological and technical aspects**, *Proceedings of the 6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005.*
- Samaali M., S. Fayet, C. Lesponne, S. François, J.L. Ponche and I. Coll, **The PRIMEQUAL2-PREDIT scenarios: Comparison and analysis of emission inventories**, *Proceedings of the 6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005.*
- Arteta J., Sylvie Cautenet, Sylvain Fayet, Mehrez Samaali, Céline Lesponne, Stéphane François et Jean-Luc Ponche, **Sensibilité de la production d'ozone et dynamique d'un épisode de pollution**, *Proceedings of the 6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005.*
- François Buffard, **Scénarios PRIMEQUAL – Sensibilité des émissions aux vitesses de circulation**, Rapport FXB/C7252500, MVA, Mars 2005.
- Note de travail PRIMEQUAL (2005a) **Aide à la définition des scénarios d'émissions réalistes pour la prise en compte des mesures d'urgence**. *Rapport technique*, S. Fayet, G. Causera, AIRMARAIX.
- Note de travail PRIMEQUAL (2005b) **Aide à la définition des scénarios d'émissions réalistes pour les Grandes Sources Ponctuelles de la région PACA**. *Rapport technique*, S. Fayet, G. Causera, AIRMARAIX.
- Note de travail PRIMEQUAL (2005c) **Impact des mesures d'urgence sur les vitesses de circulation dans les Bouches du Rhône en 2004**. *Rapport technique*, G. Causera, S. Fayet, AIRMARAIX.
- Note PRIMEQUAL2/PREDIT – Scénarios d'émissions (2005a). **Note de description et de validation des principales étapes de production du SC0A 2001**. *Rapport technique*, M. Samaali, J.L. Ponche, I. Coll, S. Fayet, G. Causera, C. Lesponne, LPCA, LISA, AIRMARAIX.

Note PRIMEQUAL2/PREDIT – Scénarios d’émissions (2005b). **Note de description et de validation des principales étapes de production du SC0A 2003.** *Rapport technique*, M. Samaali, J.L. Ponche, I. Coll, S. Fayet, LPCA, LISA, AIRMARAIX.

Note PRIMEQUAL2/PREDIT – Scénarios d’émissions (2005c). **Note de validation des principales étapes de production du SC0A 2001.** *Rapport technique*, M. Samaali, J.L. Ponche, I. Coll, S. Fayet, G. Causera, C. Lesponne, LPCA, LISA, AIRMARAIX.

Note PRIMEQUAL2/PREDIT – Scénarios d’émissions (2005d). **Note de validation des principales étapes de production du SC2A – National Réaliste 2010.** *Rapport technique*, M. Samaali, J.L. Ponche, I. Coll, S. Fayet, LPCA, LISA, AIRMARAIX.

Note PRIMEQUAL2/PREDIT – Scénarios d’émissions (2005e). **Note de validation des principales étapes de production du SC2B – NEC 2010.** *Rapport technique*, M. Samaali, J.L. Ponche, LPCA.

Note PRIMEQUAL2/PREDIT – Scénarios d’émissions (2005f). **Note de validation des principales étapes de production du SC1 –2010 Tendanciel.** *Rapport technique*, G. Causera, S. Fayet, F. Lasry, I. Coll, AIRMARAIX, LISA.

Note PRIMEQUAL2/PREDIT – Scénarios d’émissions (2005f). **Note de validation des principales étapes de production du SC3 –2010 Régional Réaliste.** *Rapport technique*, G. Causera, S. Fayet, F. Lasry, I. Coll, AIRMARAIX, LISA.

Note PRIMEQUAL2/PREDIT – Scénarios d’émissions (2005f). **Note de validation des principales étapes de production du SC4B 2001-2003 Mesures d’Urgence Opérationnelles.** *Rapport technique*, G. Causera, S. Fayet, F. Lasry, I. Coll, AIRMARAIX, LISA.

10. Présentations orales

F. Lasry, I. Coll, S. Fayet, G. Causera, M. Samaali, C. Lesponne, S. Francois, and J.L. Ponche, **Impacts of emission reduction strategies conducted at regional and continental scales, on the long-term and punctually**, *European Geosciences Union - General Assembly 2006, Vienna, Austria, 2-7 April 2006, Oral Presentation.*

F. Lasry, I. Coll, S. Fayet, C. Lesponne, M. Samaali, J.L. Ponche, and S. François, **Ozone sensitivity study – Evaluation of the efficiency of the legislations for the year 2010**, *European Geosciences Union - General Assembly 2005, Vienna, Austria, 24 - 29 April 2005, Oral Presentation.*

F. Lasry , I. Coll , S. Fayet , M. Samaali , G. Causera , C. Lesponne , S. Francois and J.L. Ponche, **Ozone sensitivity study - Evaluation of the efficiency of the legislations for the year 2010**, *Air Pollution 2005, 16-18 may 2005, Cordoba, Oral Presentation.*

I. Coll, F. Lasry, S. Fayet, C. Lesponne, M. Samaali, J.L. Ponche, S. Cautenet, J. Arteta and R. Vautard, **Simulation of emission reduction scenarios**, *6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005. Communication orale.*

F. Lasry, I. Coll, S. Fayet, C. Lesponne, M. Samaali, A. Armengaud, J.L. Ponche, and S. François, **Ozone production and the simulation of emission reductions scenarios**, *6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005. Communication orale.*

S. Fayet, M. Samaali, C. Lesponne, J.L. Ponche, F. Lasry and I. Coll, **Strategy of definition of realistic emission reduction scenarios**, *6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005. Communication orale.*

M. Samaali, S. Fayet, C. Lesponne, S. François, and J.L. Ponche, **The PRIMEQUAL2-PREDIT scenarios: Comparison and analysis of emission inventories**, *6th ESCOMPTE workshop, Marseilles, 2-5 fevrier 2005. Communication orale.*