

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

MOKILI
Conseil
en Environnement

CAIRN
DÉVELOPPEMENT
expert en qualité de l'air

Forum
Teratec

2005
DIX
ANS
2015

www.cea.fr

LE GRAND CHALLENGE EMERGENCIS

HIGH RESOLUTION EMERGENCY
SIMULATION FOR THE CITY OF PARIS

Patrick ARMAND

Laboratoire Impact Radiologique et Chimique
Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives

Olivier OLDRINI

MOKILI

Sylvie PERDRIEL

CAIRN Développement

Forum Teratec | Ecole Polytechnique | 24 juin 2015

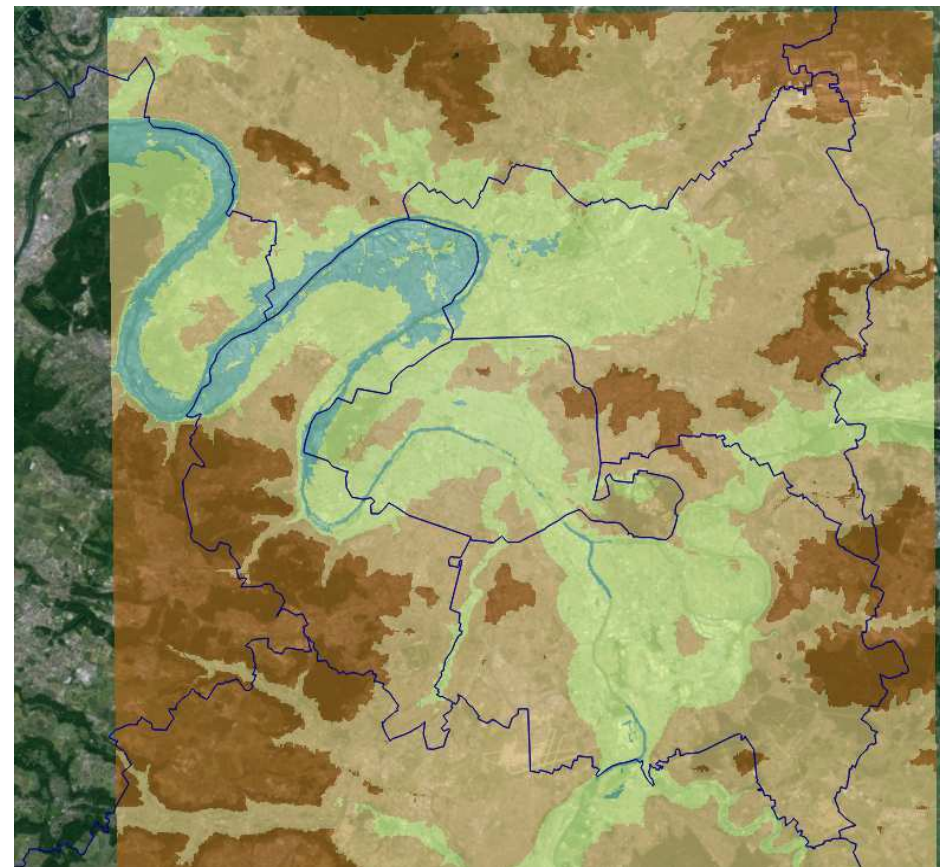
EMERGENCIS – Un système de modélisation et d'aide à la décision unique au monde

- EMERGENCIS a été conçu dans le cadre du **développement par le CEA de systèmes de modélisation pour les situations d'urgence** (Sécurité civile, BSPP...) en cas de rejets atmosphériques toxiques « NRBC » possiblement engendrés par une explosion
- EMERGENCIS vise à prospecter la mise en œuvre de ces systèmes en faisant appel aux **moyens de calculs du CCRT du CEA DAM Île-de-France** (Grand challenge)
- Les simulations ont été menées sur un **domaine urbain géant qui recouvre la zone de « Petite Couronne »** i.e. Paris (75) et les trois départements limitrophes (92-93-94)
 - Réalisation des calculs d'écoulement et de dispersion sur le très grand domaine
 - Couplage des calculs à l'extérieur et à l'intérieur de bâtiments spécifiques (ERP)
 - Travail de visualisation des résultats pour en optimiser l'exploitation et la diffusion
 - Prise en compte de la contrainte de temps et du futur caractère opérationnel
- Projet en **collaboration entre le CEA et les start-up MOKILI et CAIRN Développement** avec le soutien des équipes techniques du CCRT que l'on remercie !

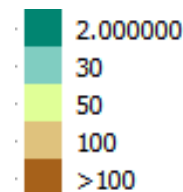
- Domaine de **simulation couvrant les départements 75 et 92-93-94** de forme pratiquement carrée, de dimensions 38,4 km d'est en ouest et 40,8 km du nord au sud
- Domaine **maillé horizontalement au de 3 m** et verticalement jusqu'à 1 000 m (39 points)
- Domaine découpé en **tuiles de 401 x 401 points horizontaux** ($32 \times 34 = 1\,088$ tuiles)



- **Topo** : données IGN à la résol. de 25 m (3 Go)
- **Occupation des sols** : données *Corine Land*
Cover à la résolution de 25 m
- **Bâti** : 1,15 millions de bâtiments issus de
BD Topo® de l'IGN (1 Go)
- **Projection utilisée** : système Lambert 93
- Interpolation (et changement du système de
projection) au moyen de la bibliothèque GDAL
- Lecture des données « par bandes »



Donnée de relief

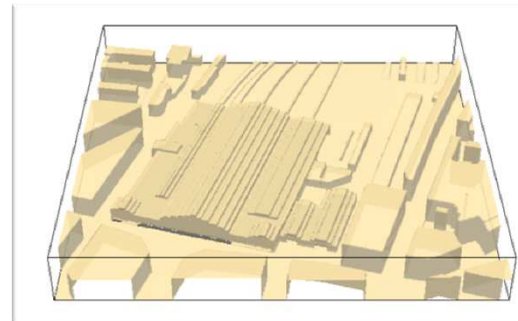


- Domaines imbriqués et centrés autour de bâtiments d'intérêt particulier maillés à 1 m afin de mener des calculs d'infiltration ou d'exfiltration au sein d'ERP
- Maillage des ERP (description interne et externe) à partir d'observations ou de plans non-détaillés pour éviter une description 3D trop précise (qui pourrait être affinée)

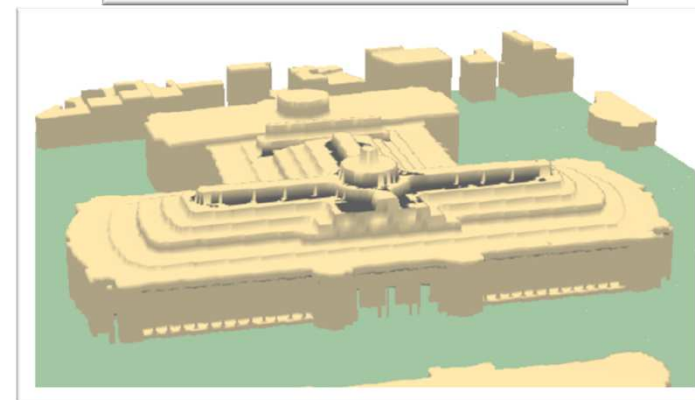
Caractéristiques des domaines imbriqués

	Grand Palais	Gare du Nord	Préfecture de Police
Dimensions du domaine	390 m x 350 m x 100 m	385 m x 290 m x 100 m	230 m x 170 m x 100 m
Résolution horizontale	1 m	1 m	1 m
Grille verticale	42 niveaux	43 niveaux	43 niveaux
Nombre total de cellules	5,6 millions	4,6 millions	2,6 millions
Liens aérauliques indoor-outdoor	4 grandes portes et 2 fenêtres ouvertes	2 grandes ouvertures au nord et au sud	Nombreuses fenêtres ouvertes sur les rues et la cour intérieure
Volumes intérieurs	2 grands volumes	1 grand volume	5 étages reliés par une cage d'escalier

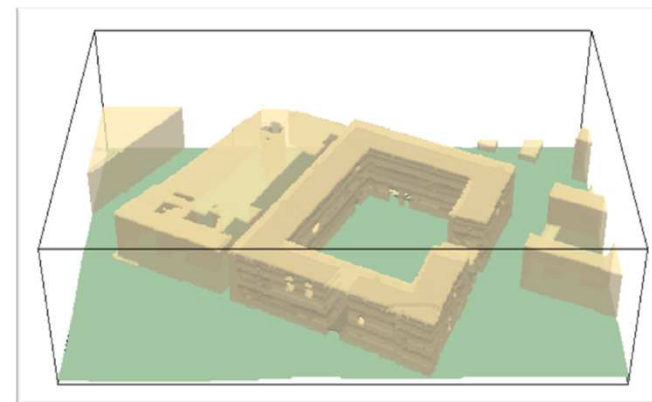
Gare du Nord



Grand Palais



**Préfecture
de Police**



- **Simulation météorologique** : effectuée à cadence horaire sur une journée complète à partir de prévisions du modèle à méso-échelle *Weather Research Forecasting* (WRF) opéré en routine par le CEA sur la France (5 km) et l'Île-de-France (1,6 km)
- **Simulation de dispersion** : scénarios accidentels ou malveillants d'émission de particules ou de gaz (ces rejets hypothétiques sont forfaitaires et considérés à titre d'exemples)

Caractéristiques des scénarios de rejets

	Journée du 2 août 2014			Journée du 23 octobre 2014		
Météorologie	Vent fort de direction peu variable			Vent moyen de direction variable		
Type de sources	Ponctuelles			Ponctuelles		
Rejet	Particules fines (2,5 µm)			Particules fines (2,5 µm)		
Durée	10 mn			10 mn		
Quantités	3 x 1 kg			3 x 1 kg		
Localisations	Près du Grand Palais	Dans la Gare du Nord	Près de la Préfecture	Dans le Grand Palais	Devant la Gare du Nord	Dans la cour de la Préfecture
Début des rejets	18h00 au Grand Palais	18h20 à la Gare du Nord	18h40 à la Préfecture	10h00 au Grand Palais	12h00 à la Gare du Nord	11h00 à la Préfecture
Période de calcul	De 18h00 à 23h00			De 10h00 à 17h00		

N.B. Une échéance météorologique pour les 1 088 tuiles représente un volume de stockage de 375 Go et 1 Go pour les zooms sur les ERP.

■ PMSS (Parallel-Micro-SWIFT-SPRAY) dans l'environnement atmosphérique

- Co-développé par ARIA Technologies, MOKILI et le CEA
- Simule les flux d'air et la dispersion d'espèces à échelle locale dans des domaines bâtis
- P-SWIFT : modèle diagnostic à conservation de masse (interpolateur de données) ; parallélisation des calculs en espace (tuiles assimilables par des cœurs) et en temps
- P-SPRAY : modèle de dispersion lagrangien à particules numériques qui gère la charge des particules sur les tuiles dynamiquement en fonction de l'évolution du panache
- Exploitation sur des machines multi-cœurs ou des clusters de centaines de cœurs

■ Code_SATURNE pour les zooms autour et à l'intérieur des ERP

- Développé par EdF R&D en *open source*
- Outil de CFD très complet mais très coûteux en temps de calcul
- Simule des écoulements sur des domaines restreints en taille mais qui présentent des configurations très spécifiques comme, par exemple, l'intérieur d'édifices
- Parallélisme en répartissant le maillage entre différents cœurs de calcul

Résultats et performances – 1/ Simulations P-SWIFT sur le domaine géant

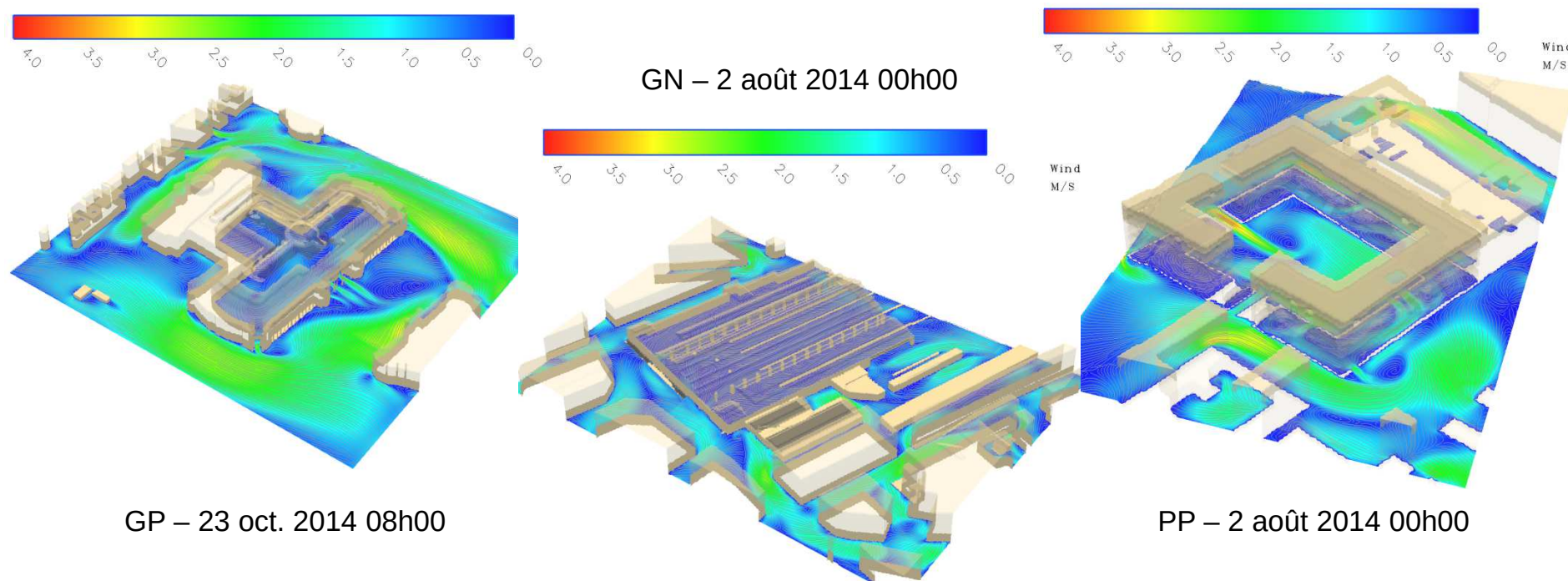
- Calculs pour chaque échéance d'interpolation, d'ajustement et de turbulence
- Tests de la parallélisation en échéance pour une journée (faisabilité et scalabilité)
 - *Speed-up* maximal de 2 → Fraction parallélisable de 50% par la relation d'Amdahl
 - Fraction séquentielle : chargement des fichiers et calcul des distances aux bâtiments
- Tests de la parallélisation en espace – Calculs sur des tuiles de 701 *versus* 401 points
 - Moins rapides sur 401 points car plus de cœurs mais aussi plus de communications

Performances de P-SWIFT

Nombre d'échéances en parallèle	Nombre de cœurs	Durée effective du calcul (en mn)	Temps CPU par cœur (en mn)	<i>Speed-up</i>
1	1 089	161	159	1
2	2 177	90	88	1,79
4	4 353	92	78	1,75
8	8 705	82	67	1,96
12	13 057	86	70	1,87
24	26 113	88	68	1,82

Résultats et performances – 2/ Simulations Code_SATURNE dans les ERP

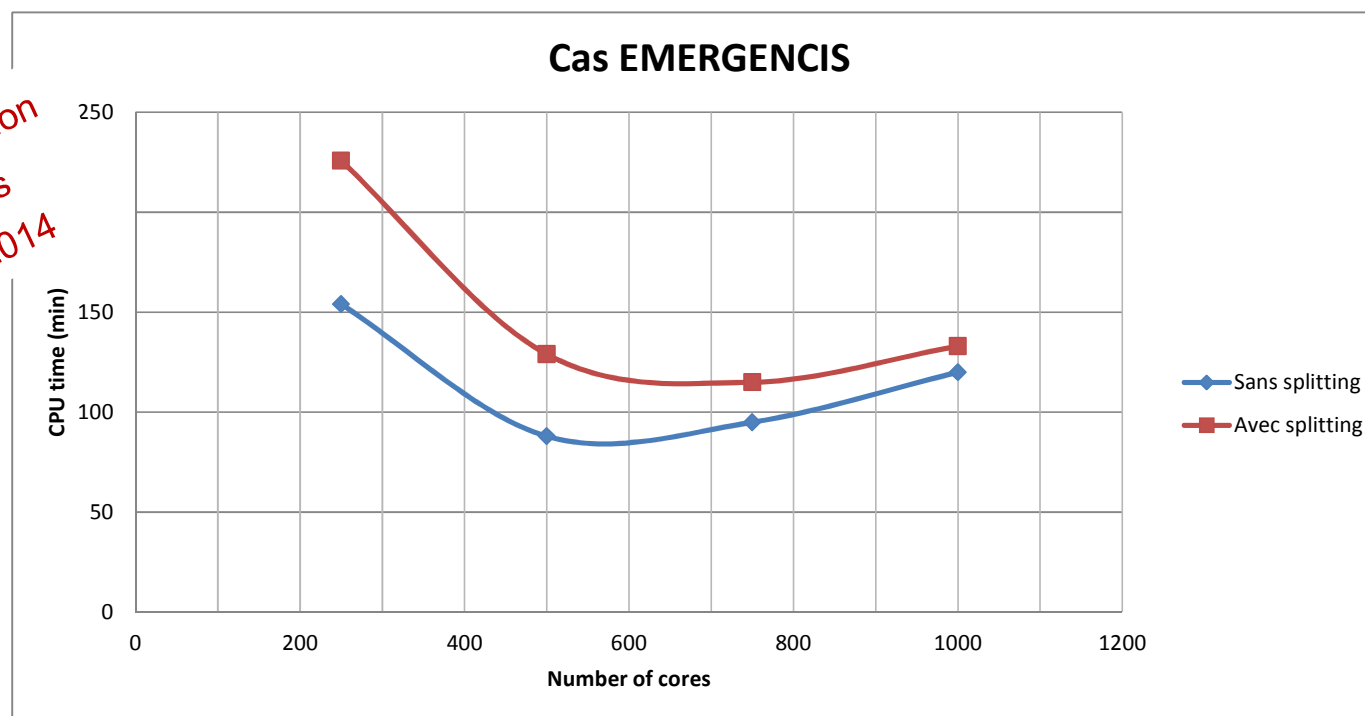
- Calculs de 24 échéances avec 200 cœurs par échéance et site, soient 14 400 cœurs
- Temps de calcul de 64 mn (Préf. de Police), 69 mn (G. du Nord) et 100 mn (Grand Palais)
- Prétraitement, partitionnement et résolution (seule étape bénéficiant de la parallélisation)
- Le challenge réside dans le nombre des calculs plus que dans la taille des maillages



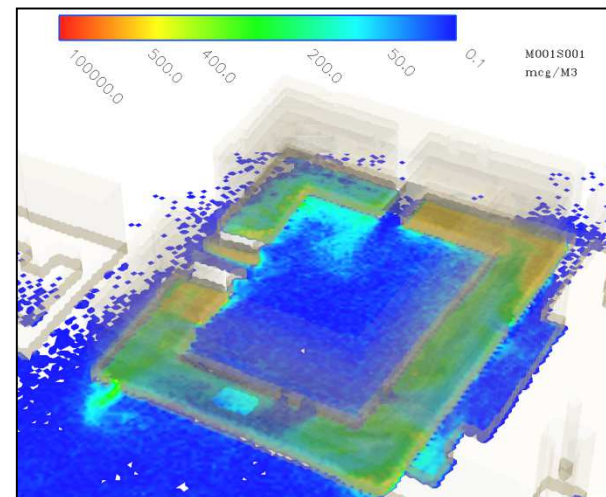
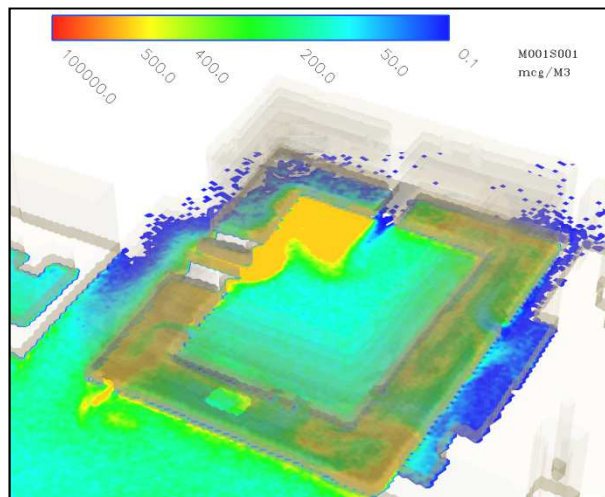
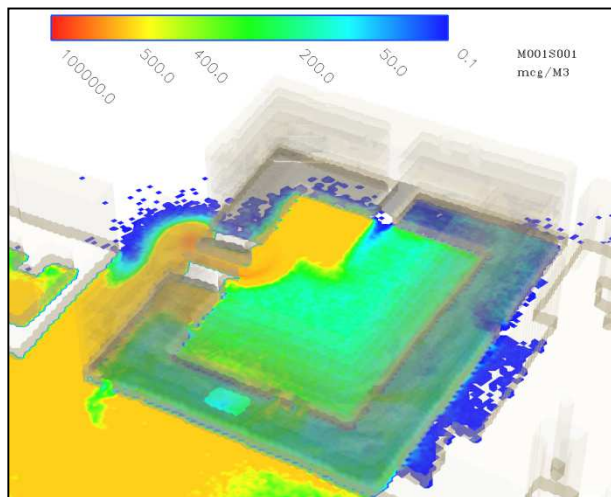
Lignes de courant et intensité du vent à 4 m du sol

- Modèle utilisé en activant l'imbrication (champs de vent P-SWIFT et Code_SATURNE)
- Emission de 40 000 particules toutes les 5 s soient 14,4 millions pour 3 rejets de 10 mn
- Performance : 5 heures de temps physiques calculés en 100 minutes
- Parallélisation en particules très efficace mais une part du temps de calcul incompressible (chargement des tuiles météorologiques et *balancing* croissent avec le nombre de cœurs)

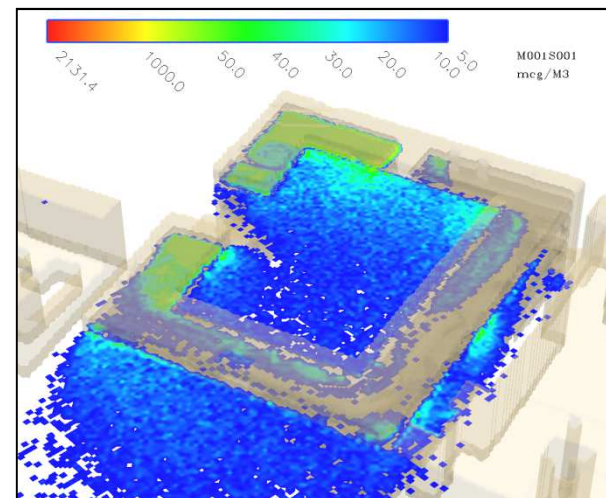
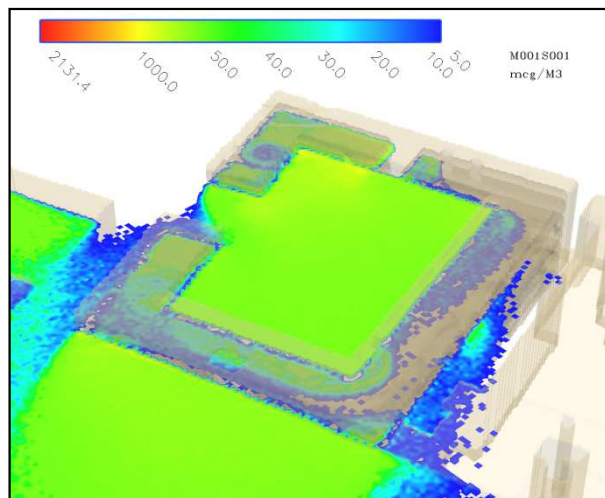
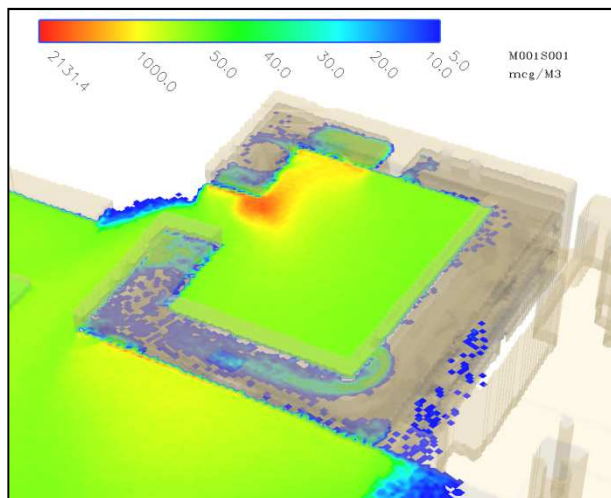
Temps de calcul en fonction
du nombre de cœurs
Journée du 2 août 2014



Résultats et performances – 4/ Répartition à l'ext. et l'int. de la Préf. de Police



Conc. (en $\mu\text{g.m}^{-3}$) près du sol et au rez-de-chaussée – 2 août 2014 – 10, 20 et 30 mn après le début du rejet



Conc. (en $\mu\text{g.m}^{-3}$) à 20 m du sol et au 4^e étage – 2 août 2014 – 10, 20 et 30 mn après le début du rejet

Résultats et performances – 5/ Répartition dans les ERP et à leur proximité

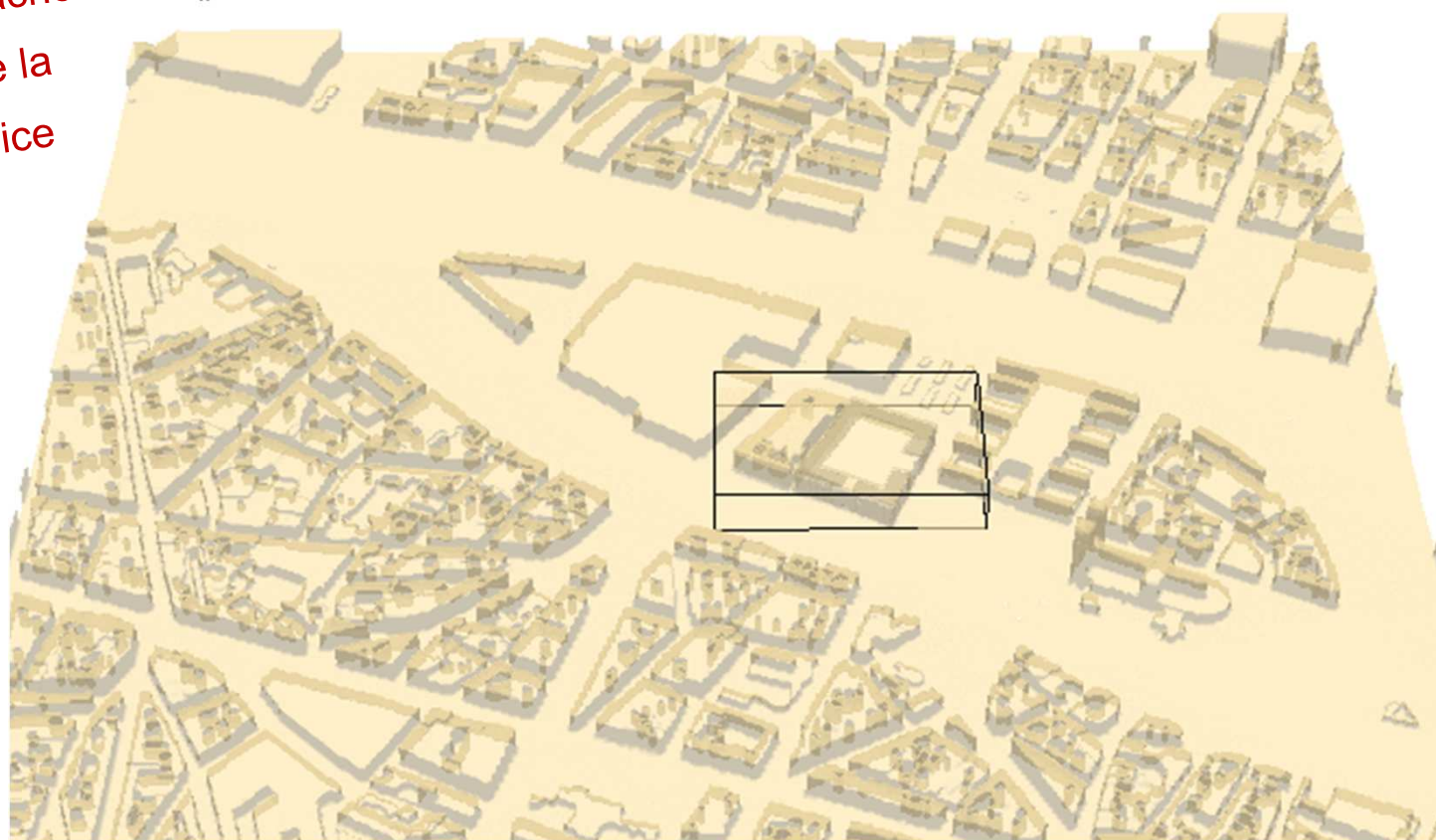


1.000E+004 500.0 200.0 50.00 10.00 1.000

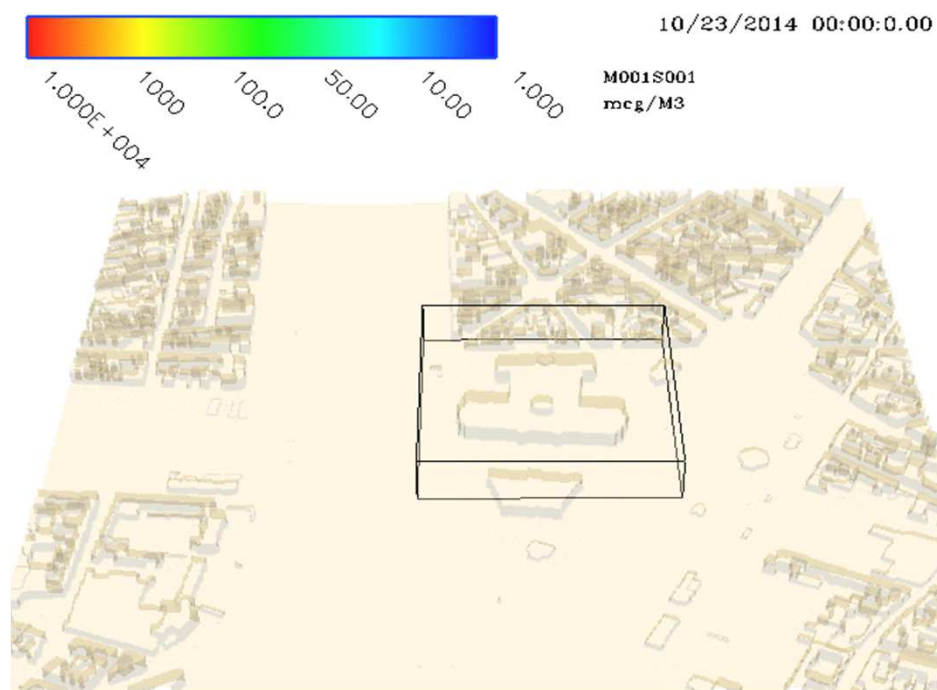
10/23/2014 11:00:0.00

M001S001
mcg/M3

Progression du panache
dans le quartier de la
Préfecture de Police
23 oct. 2014

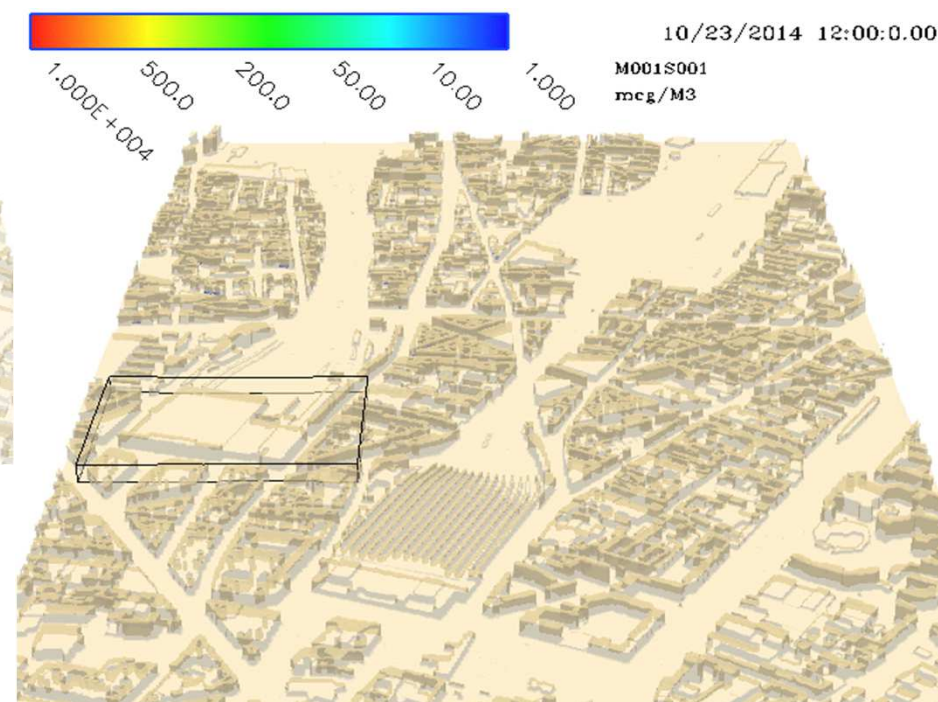


Résultats et performances – 6/ Répartition dans les ERP et à leur proximité



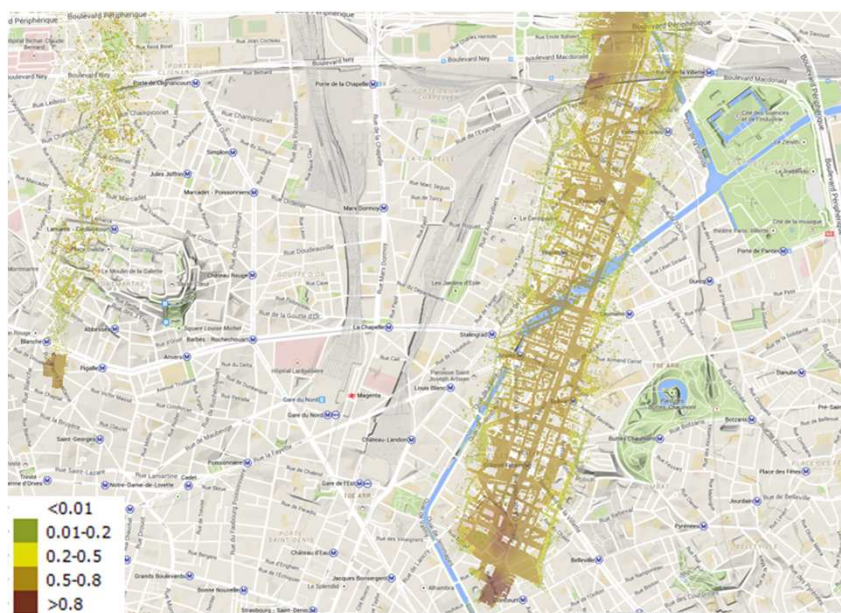
Progression du panache dans le quartier
du Grand Palais
23 oct. 2014

Progression du panache dans le quartier
de la Gare du Nord
23 oct. 2014



Développements en visualisation – 1/ Exploitation dans des SIG et en mode *web*

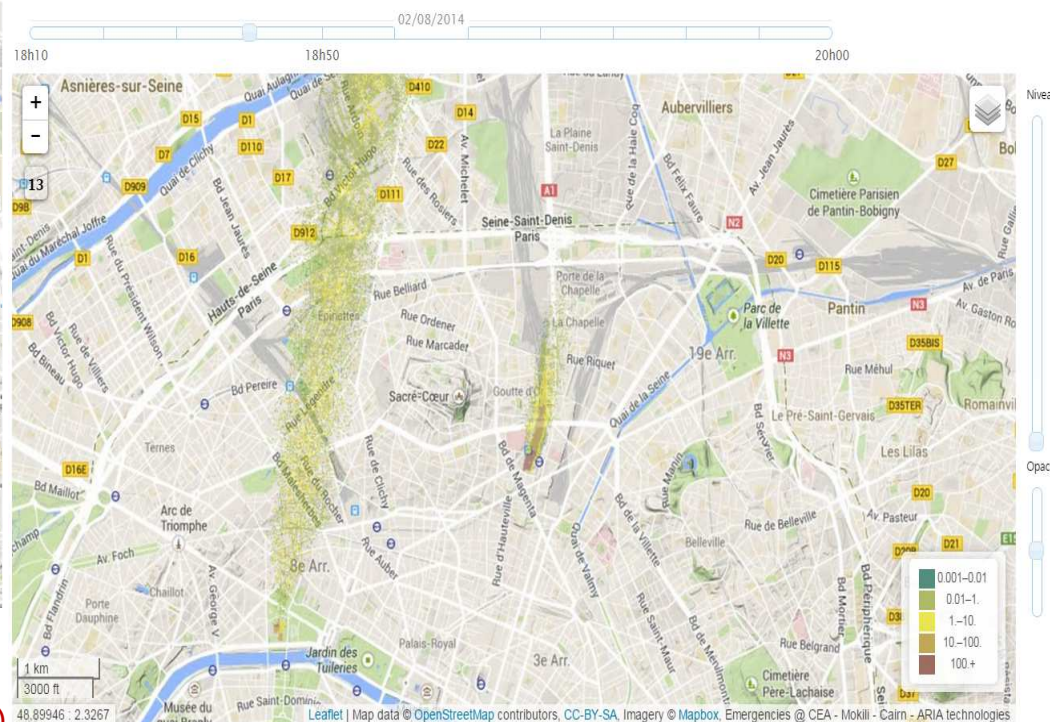
- Dans un contexte opérationnel, résultats à mettre à disposition en un temps réduit
- Génération d'une mosaïque d'images raster à différents niveaux de zooms (n°10 à n°16)
- Bin2Tile – Création d'images géoréférencées GEOTIFF rassemblées par un fichier VRT
- Fonctionnement parallèle pour la lecture des tuiles et la production de la mosaïque
- Chargement des fichiers VRT dans des SIG comme QuantumGIS ou ArcGIS
- Création d'un site *web* basé sur la bibliothèque *open source* Leaflet...



Zoom sur la Gare du Nord le 2 août 2014 à 19h00

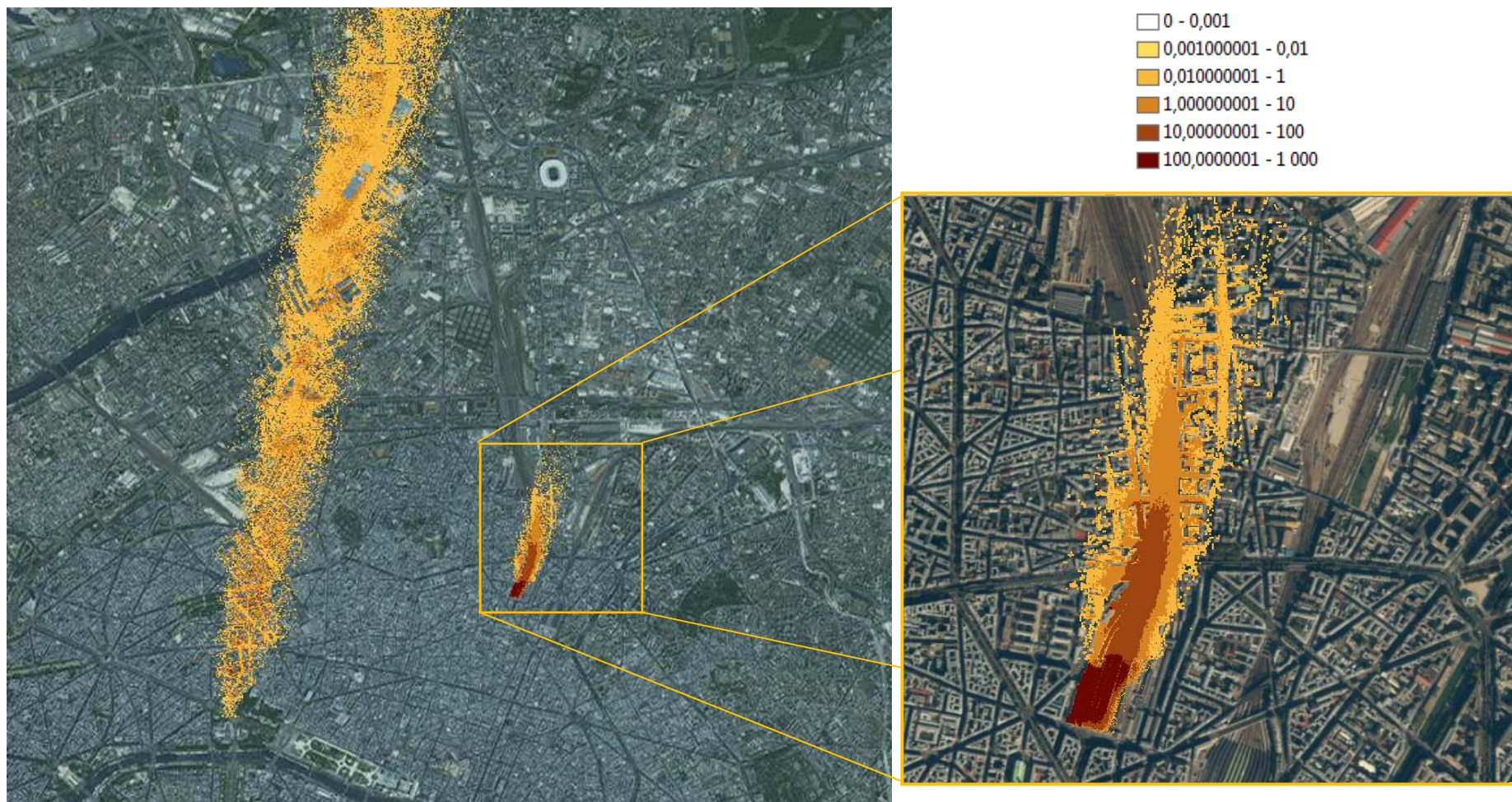
Visualisation dans QGIS (en haut)

Visualisation web sur fond de carte Google Terrain (à droite)



Développements en visualisation – 2/ Exemples de visualisation en mode SIG

Coupe 2D du panache dans le DOMAINE COMPLET – Concentrations (en $\mu\text{g.m}^{-3}$) près du sol le 2 août 2014
40 mn après le rejet près du Grand Palais et 20 mn après le rejet à la gare du Nord



Développements en visualisation – 3/ Exemples de visualisation en mode SIG

ZOOM CENTRE DE PARIS



Conc. (en $\mu\text{g.m}^{-3}$) près du sol – 23 oct. 2014 – 10, 20 et 40 mn après le début du rejet près du Grand Palais

ZOOM NORD DE PARIS



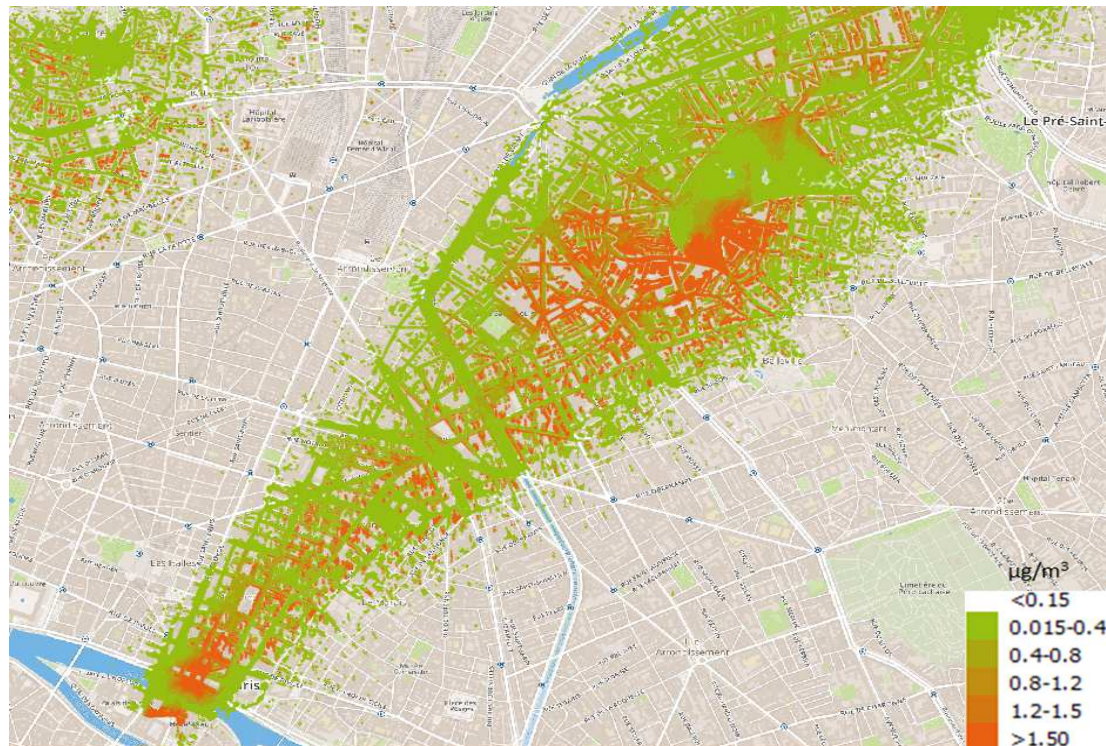
Conc. (en $\mu\text{g.m}^{-3}$) près du sol – 23 oct. 2014 – 40, 70 et 100 mn après le début du rejet à la Préf. de Police

Développements en visualisation – 4/ Extraction de contours sous forme vectorielle

- Exploitation approfondie dans un SIG (e.g. croisement avec les données de population)
- Création de contours de plages de concentrations (ou de doses) en deux étapes :
 - Lissage des résultats conservant la masse et l'influence des bâtiments (gradients)
 - Calcul des plages colorées et des polygones stockés au format ESRI Shapefile
- Gain de performance de l'extraction avec filtrage et aspect « non-bruité » des résultats
- Transmission aisée de fichiers de taille modéré ~20 Mo produits assez rapidement ~1 mn

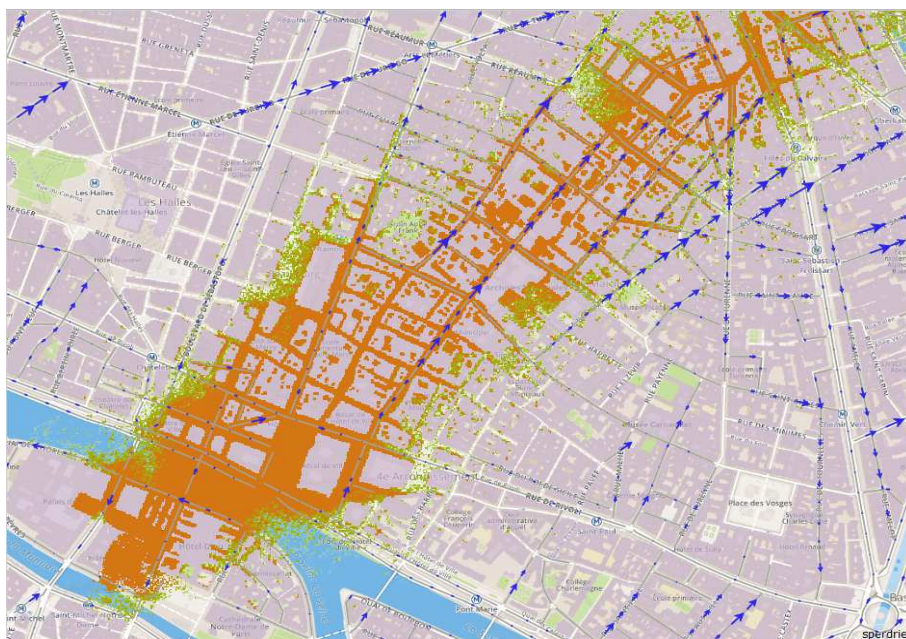
Vue sous SIG de plages colorées
sous forme de polygones

Champ de concentration près du sol
le 23 oct. 2014 à 12h00

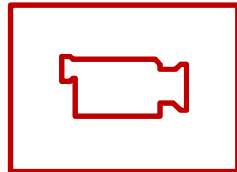


Développements en visualisation – 5/ Représentation du vent dans l'axe des rues

- Visualisation claire du sens du vent le long des rues (définition de parcours d'évacuation)
- Il faut sous forme vectorielle les coordonnées géographiques des polygones représentant les axes des rues, les échantillonner et calculer la projection du vent dans les rues
- Obtention du réseau de rues par extraction du réseau *Open Street Map* (libre de droits)
- Extraction pilotée par l'échelle à laquelle on veut visualiser les flèches de vent :
 - Application de la méthodologie à une échelle de $\sim 1 / 10\,000^e$
 - Représentation utilisant l'approche par tuiles et niveaux de zooms à envisager

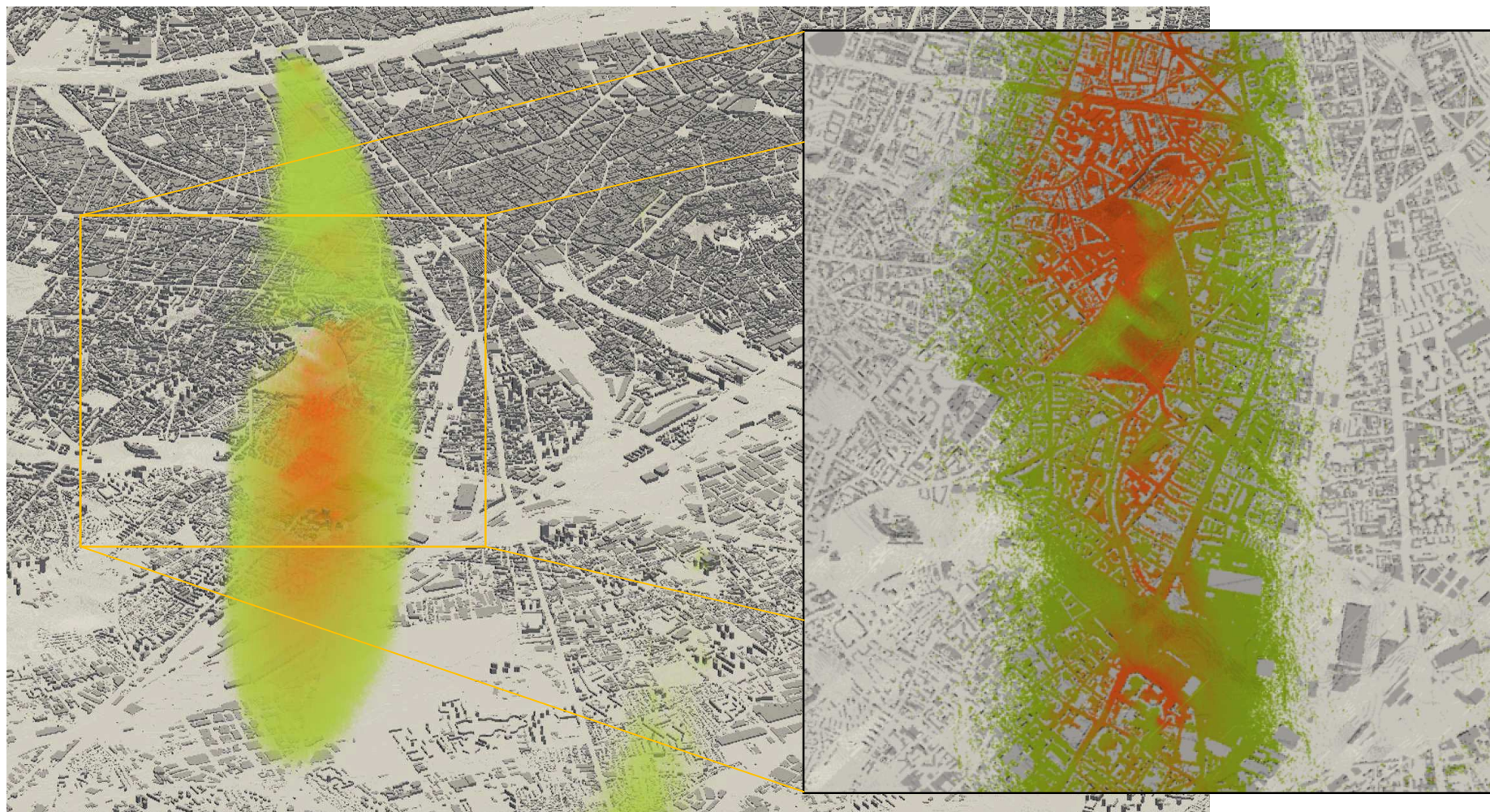


Vent dans l'axe des rues à 3 m dans le centre de Paris et près de la tour Eiffel le 23 oct. 2014 à 12h00

- Développement d'un lecteur parallèle des résultats EMERGENCIS permettant la visualisation en « full 3D » des calculs réalisés sur la machine « curie » du CCRT : coupes verticales, horizontales, arbitraires, iso-contours vol. ou « volume rendering »
- Utilisation de 1 088 serveurs de rendu affectés chacun à une tuile de calcul fonctionnant de concert pour visualiser l'ensemble du domaine en une fois 
- Exploitation 3D interactive sur station de travail de calculs // sur machine de bureau
- Cependant, visualisation interactive (non-batch) de calculs géants reste compliquée (rafraîchissement des fenêtres graphiques et non-compatibilité en temps du lecteur)
- Première mondiale dans un domaine de 40 km de côté maillé à 3 m (6,5 Gmaillles) !



Vue zoomé de la concentration près du sol le 23 oct. 2014 à 11h50



Vue zoomée depuis le NE du panache issu de la Préfecture de Police de Paris
(à gauche : visualisation volumique ; à droite : vue de dessus de la concentration près du sol)

- EMERGENCIS a permis de mener à bien des **simulations complètement novatrices** :
 - **Prévision météorologique** à résolution métrique sur le domaine 75-92-93-94
 - **Couplage des calculs** entre le domaine urbain et plusieurs infrastructures (ERP)
 - **Simulations de dispersions** (nocives) dans les ERP et dans le domaine urbain
 - **Visualisation des résultats** obtenus en mode opérationnel 2D ou scientifique 3D
- L'**imbrication des domaines** et la **parallélisation des calculs** ont permis de :
 - Traiter des sources à l'intérieur ou à l'extérieur des ERP
 - Suivre la propagation du panache sur un domaine de près de 40 km
- **Scénarios en aval de prévisions méso-météo WRF** menées en routine par le CEA :
 - **Prévision micro-météo à 24 heures** et échéance horaire du vent et de la turbulence
 - À haute résolution (3 m) sur la Petite Couronne (40 km x 40 km – 1 088 tuiles)
 - À très haute résolution (1 m) au niveau des ERP
 - **Simulation de la dispersion à la demande** dans les ERP et le grand domaine
 - **Représentation cartographique** des résultats (SIG et web) ainsi qu'avec Paraview

- Tests paramétriques sur 1 089 à 26 113 cœurs du CCRT – Plus de 10^6 heures x cœurs
- Identification de points d'amélioration dans la parallélisation des modèles physiques, la représentation des résultats et le caractère opérationnel de la chaîne de modélisation
- Temps de calcul compatibles avec une utilisation pratique du système de modélisation
 - Pré-calcul des échéances journalières micro-météo et dans les ERP en ~2 heures
 - Simulation de la dispersion trois fois plus rapide que la durée physique réelle
 - Production des cartes (de conséquences sanitaires) en quelques minutes
- Les simulations démontrent de façon prospective la faisabilité opérationnelle de calculs de très grande échelle, à très haute résolution (1 à 3 m), sur le domaine de compétence et de responsabilité réelles de la Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris



Questions?

Un grand merci aux équipes techniques du CCRT !

Corresponding author: Patrick ARMAND – patrick.armand@cea.fr

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Centre DAM Île-de-France – Bruyères-le-Châtel | DASE / SRCE

Laboratoire Impact Radiologique et Chimique

91297 Arpajon CEDEX

T. +33 (0)169 26 45 36 | F. +33 (0)1 69 26 70 65

E-mail: patrick.armand@cea.fr

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019