

ProSe, problématiques nouvelles et développements attendus

Michel Poulin^{1*}, Nicolas Flipo¹, Gilles Billen², Josette Garnier²

¹. UMR Sisyphe, Géosciences, Mines ParisTech

². UMR Sisyphe, CNRS/UPMC

* personne à contacter : michel.poulin@mines-paristech.fr

1 Avant-propos

Les modèles ProSe et SENEQUE sont utilisés, chacun dans leurs domaines respectifs d'application, par plusieurs partenaires du PIREN-Seine (plus particulièrement l'AESN et le SIAAP), en soutien à leurs actions de programmation. Les équipes du PIREN agissent en étroite liaison avec ces partenaires pour assurer la mise à jour des versions de ces modèles et améliorer leurs performances. L'évolution parallèle de ces outils au cours des dernières années a pu conduire à des améliorations de la représentation de certains processus dans l'un de ces modèles sans que l'autre n'en bénéficie. Un travail de remise en concordance des schémas conceptuels est donc devenu nécessaire. Par ailleurs certains problèmes sont apparus concernant la qualité des prévisions des modèles concernant quelques variables : phosphates, nitrites, chlorophylle et biomasses algales, bactéries indicatrices de contamination fécale. De plus l'évolution, au cours des dix dernières années, des moyens de collecte et de traitement des eaux usées de temps sec et de temps de pluie de l'agglomération parisienne a permis une amélioration sensible de la qualité des eaux de la Seine entre Paris et l'estuaire. Le fonctionnement écologique de la Seine ayant été modifié, les attentes en matière de modélisation opérationnelle ont également évolué.

En 2009, un atelier réunissant chercheurs et utilisateurs des résultats de la recherche menée dans le cadre du PIREN Seine a permis de faire le point sur les connaissances disponibles et de définir une stratégie d'action à court terme, à l'horizon 2010, tout en précisant les contours des projets à mener à plus long terme pour améliorer la validité et la précision des simulations.

La mise en œuvre du modèle ProSe sur l'ensemble des données disponibles sur la période 2003 à 2008 (Poulin et al., 2006, 2007, 2008, 2009) montre, pour l'aval de Paris, la diversité des situations relatives au devenir du phosphore, variables en fonction du régime hydrologique, de la durée et de la sévérité des étiages et enfin du niveau de traitement des eaux usées dans les usines de l'agglomération parisienne.

Une première mise à niveau de ProSe par rapport aux schémas conceptuels de SENEQUE a été réalisée en 2009. Elle concerne les cycles du phosphore (adsorption des ortho-phosphates sur les matières en suspension) et de l'azote (devenir des nitrites dans le milieu naturel).

2 Contexte de la modélisation avec ProSe

Des simulations opérationnelles avec ProSe sont menées de l'amont de Paris, depuis le barrage d'Ablon sur la Seine et depuis le barrage de Noisiel sur la Marne, à l'entrée de l'estuaire, au barrage de Poses (Figure 1). La mise en œuvre de ProSe sur l'ensemble de période 2003 à 2008 a été réalisée pour le SIAAP par le Centre de Géosciences de l'Ecole des mines de Paris (ARMINES - Mines ParisTech) dans le cadre d'un groupement avec les bureaux d'étude SAFEGE et SETUDE. Cette période se caractérise par une grande diversité de régimes hydrologiques et climatiques et a connu une évolution sensible des niveaux de traitements des eaux dans les différentes usines du SIAAP (Figure 2).

L'agglomération parisienne peuplée de 8,5 millions d'habitants est constituée de la ville de Paris et de 180 communes, l'ensemble couvrant une surface de près de 2000 km² environ. Les réseaux actuels et les usines de traitement permettent de traiter l'ensemble des effluents de temps sec ainsi qu'une partie des effluents de

temps de pluie générés par le ruissellement de l'eau de pluie sur les chaussées et les toitures. La capacité de traitement dans les usines est cohérente avec la capacité de transport du réseau parvenant aux stations. Cependant, en amont des usines, des débordements du réseau en 300 déversoirs d'orage sont possibles (Figure 3). En pratique, des déversements notables n'ont lieu qu'une à deux fois par an en moyenne et en quelques dizaines de sites principaux. Afin d'améliorer la situation et de diminuer les flux polluants déversés sans traitement en Seine, diverses stratégies sont mises en œuvre. Parmi celles-ci, la construction de nouvelles usines distribuées dans l'agglomération parisienne, l'augmentation des capacités de stockage et le traitement différé des eaux stockées, mettant en œuvre les capacités nominales des usines sur des durées plus importantes qu'actuellement, font l'objet de simulations prospectives.

Il convient de noter que le SIAAP utilise couramment le logiciel ProSe en interne pour les études prospectives qu'il mène, tant sur le réseau interdépartemental de collecteurs unitaires et pluviaux (Figure 2) que sur l'ensemble des usines de traitement de ces effluents, pour les périodes de temps sec et de temps de pluie (pluies de projet théoriques) et plus généralement sur des années complètes utilisées comme périodes de référence. En amont de ce travail de modélisation, le SIAAP contribue à la compréhension du système Seine à l'aval de l'agglomération parisienne en complétant les données acquises au pas de temps mensuel dans la cadre des Réseaux de Contrôle par un suivi hebdomadaire d'un grand nombre de variables caractérisant la qualité de l'eau (Figure 1) ainsi que par le suivi en continu, enregistré au pas de 15 minutes, de l'oxygène dissous (Figure 1).

Toutes ces données sont comparées aux résultats du modèle. Cette confrontation entre mesures et calculs a pour objectif de valider l'outil de modélisation, l'analyse des écarts entre mesures et calculs étant également riche d'enseignements. Car l'objectif de la modélisation, dans sa phase initiale, pré-opérationnelle, est bien d'aider à la compréhension des systèmes complexes et non simplement de produire des chiffres (Modelling for insight, not numbers). A cet égard le modèle ProSe est mixte : c'est un outil opérationnel utilisable pour le calcul des variables majeures qui sous-tendent l'état écologique des cours d'eau (NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , O_2 ...) mais également un outil de recherche pour les investigations qui restent à mener sur des processus encore mal connus et particulièrement complexes (transport des vases et processus associés, évolution des micropolluants organiques et métalliques, devenir des pathogènes...).

Le modèle ProSe est enfin utilisé à titre d'essai comme un interpolateur spatial et temporel afin de caractériser selon une approche statistique la qualité de l'eau variable par variable : les taux de défaillance par rapport au bon état écologique sont calculés pour chaque variable pour chaque année de référence. L'amélioration de la situation résultant des travaux sur le réseau de collecte et sur les usines est ainsi caractérisée selon des critères objectifs (Figure 4).

Il est apparu indispensable d'améliorer la validité du calcul des concentrations en orthophosphate et d'ajouter la variable nitrite comme variable d'état de ProSe. En effet le processus d'adsorption des orthophosphates n'était jusqu'à présent pas pris en compte et les concentrations calculées excédaient assez systématiquement les concentrations observées en Seine. Enfin les nitrites posent un problème nouveau du fait des rejets opérés par les usines de nouvelle génération qui réalisent la nitrification de l'ammonium et partiellement la dénitrification. En effet ces installations sont difficiles à piloter et les concentrations en nitrites dans les rejets sont fortement variables ce qui peut conduire à des concentrations en Seine après dilution supérieures à celles qui caractérisent un bon état écologique.

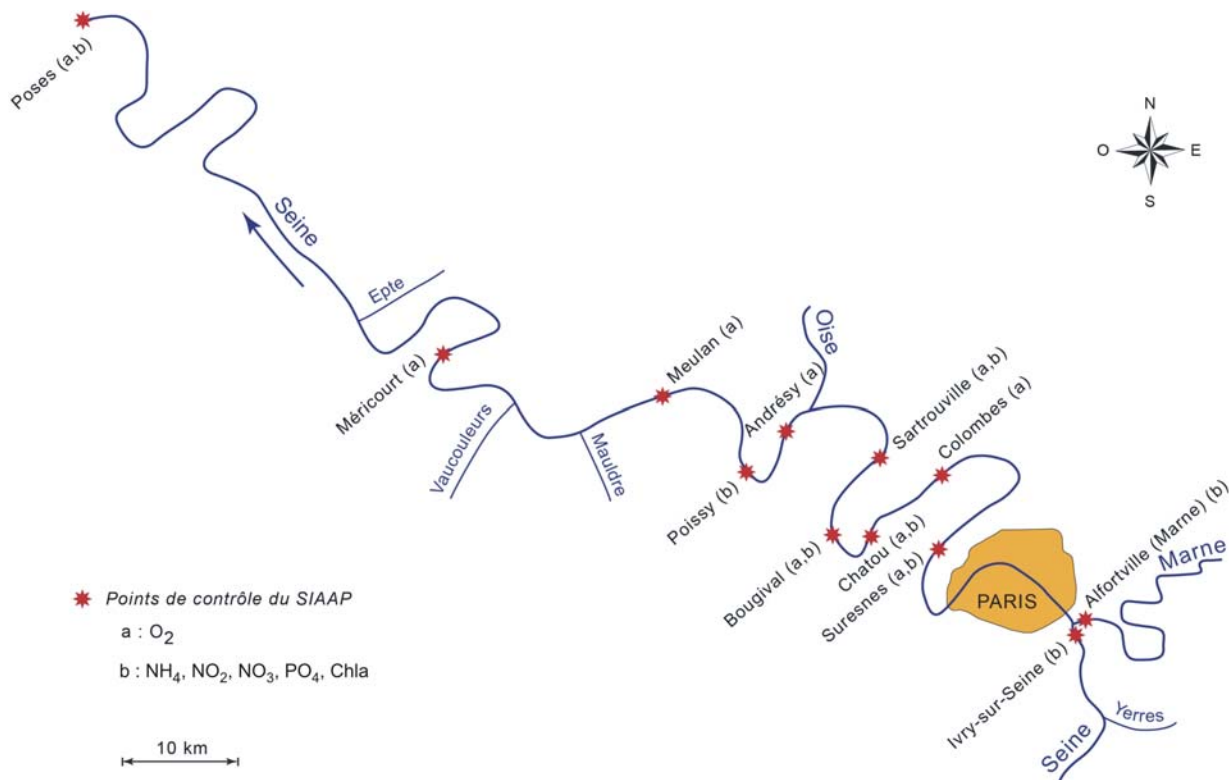


Figure 1 : Domaine d'étude et sites de mesure des nitrites et des orthophosphates

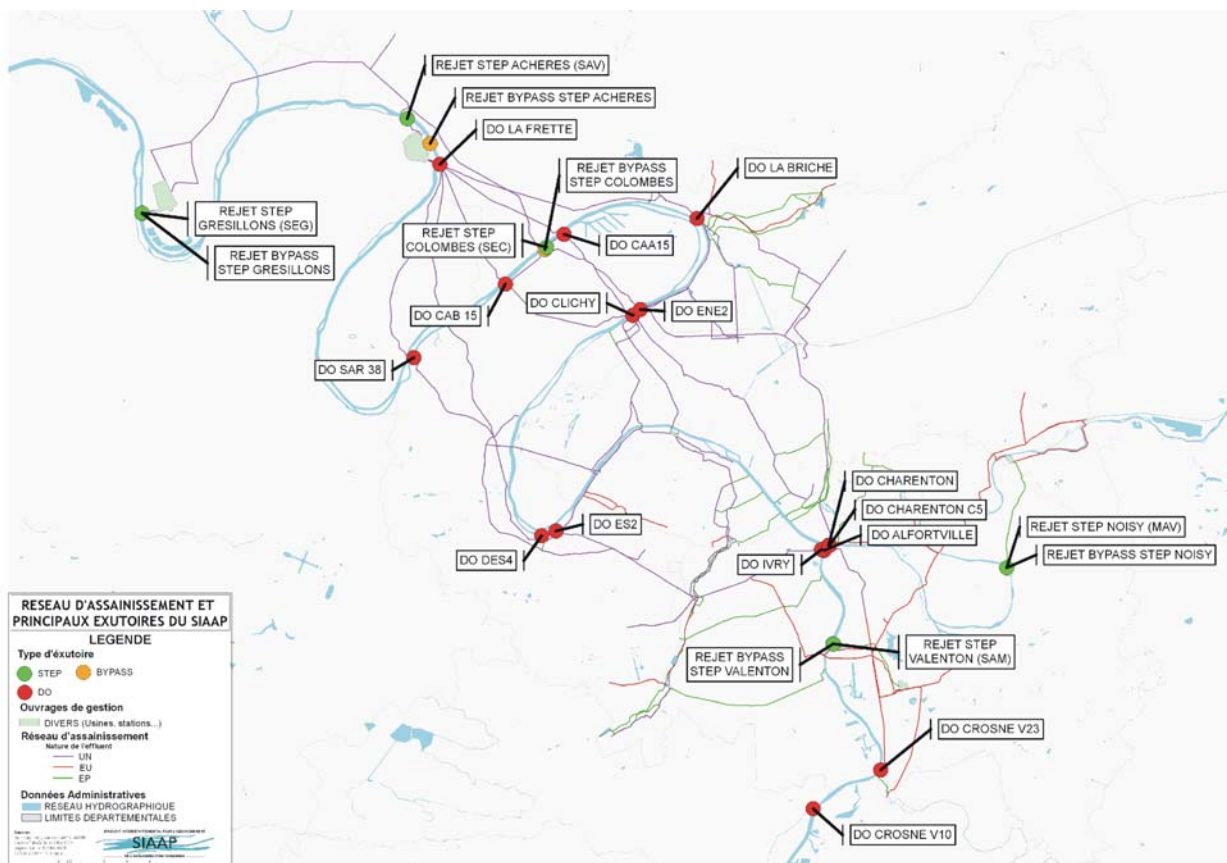


Figure 2 : Réseau interdépartemental et usines de l'agglomération parisienne

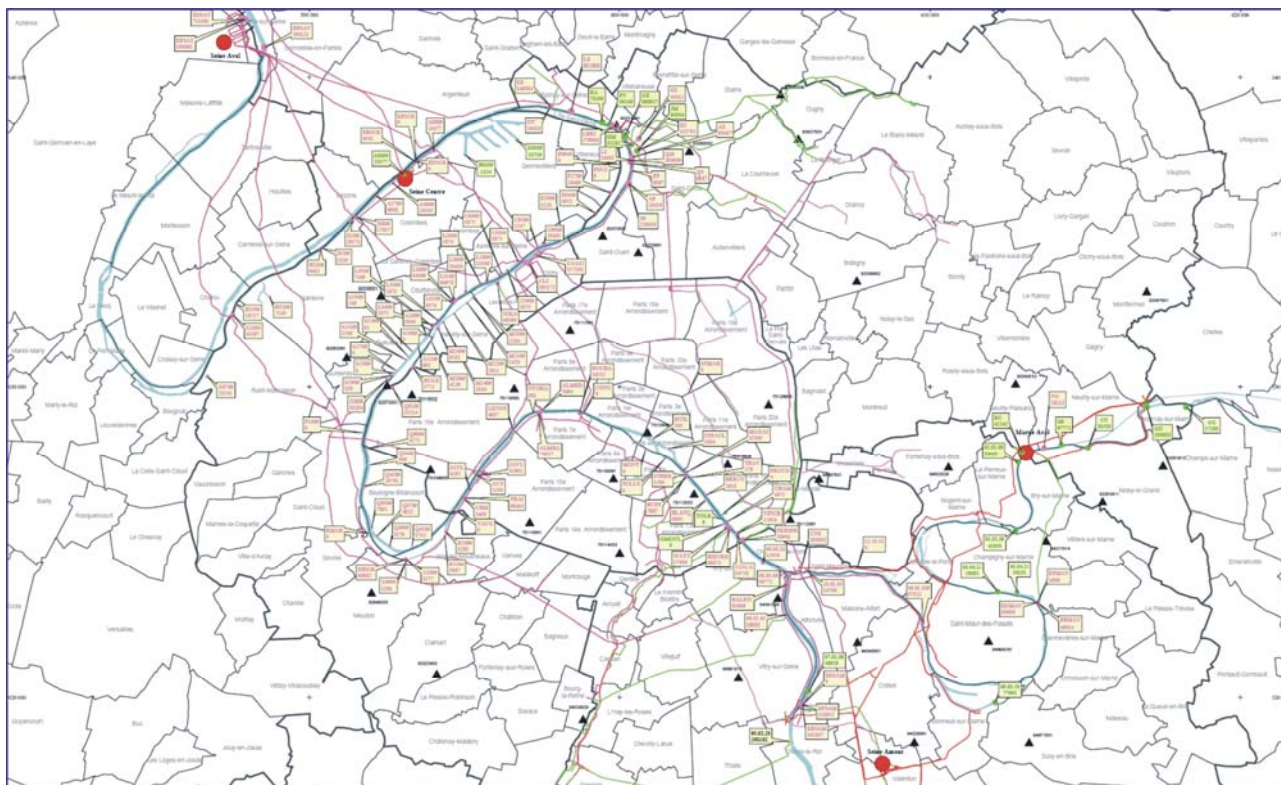
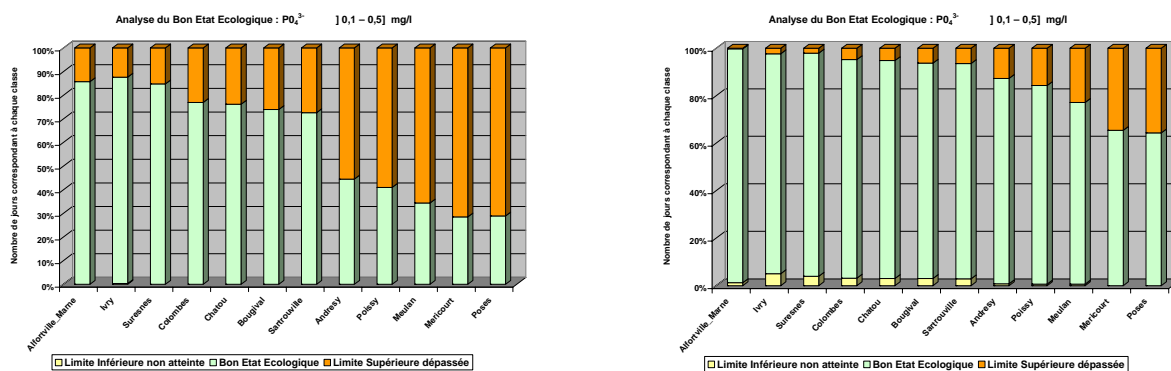


Figure 3 : Principaux déversoirs d'orages de l'agglomération parisienne



Année 2007

Année 2008

Figure 4 : Présentation statistique des résultats : orthophosphates en 2007 et 2008

3 Modélisation du comportement biogéochimique des nitrites en Seine

3.1 Conceptualisation

Les nitrites peuvent intervenir lors de plusieurs processus du cycle de l'azote. Nous privilégions ici le processus dominant de production de nitrites comme variable intermédiaire lors de la nitrification de l'ammonium.

L'ammonium NH_4^+ est d'abord transformé en nitrite NO_2^- . Cette étape (Figure 5) s'appelle nitrosation ou nitritation, des bactéries dites nitrosantes ou nitritantes (Nitrosomonas) permettant cette oxydation. La deuxième étape (Figure 5) transforme les nitrites en nitrate NO_3^- . Cette étape s'appelle nitratation, des bactéries nitratantes (Nitrobacter) permettant cette nouvelle oxydation. Le degré d'oxydation de l'azote passe ainsi de -3 dans l'ion NH_4^+ à +3 dans l'ion NO_2^- pour atteindre +5 dans l'ion NO_3^- . La première étape est la plus lente et contrôle ainsi la cinétique globale de passage de l'ammonium au nitrate. Pour cette raison les nitrites sont en général peu présents dans les cours d'eau, leur consommation étant plus rapide que leur production. Dans certaines circonstances et en particulier dans un contexte général d'eutrophisation des cours d'eau leur concentration n'est pas négligeable et peut être dommageable pour la vie piscicole à des concentrations supérieures à 0,2 mg/L.

Cette conceptualisation consistant à privilégier les nitrites comme composé intermédiaire entre l'ammonium et les nitrates nous semble pertinente dans la mesure où nous souhaitons également étudier le devenir des nitrites apportés en Seine par les usines de traitement des eaux usées. Ces apports s'ajoutent à la production en Seine de nitrite, intermédiaire de la transformation de l'ammonium en nitrate.

Les différentes équations illustrant le schéma conceptuel adopté sont rassemblées au Tableau 1 (G. Billen, modèle SENEQUE). Ces équations ont été reprises dans le modèle ProSe.

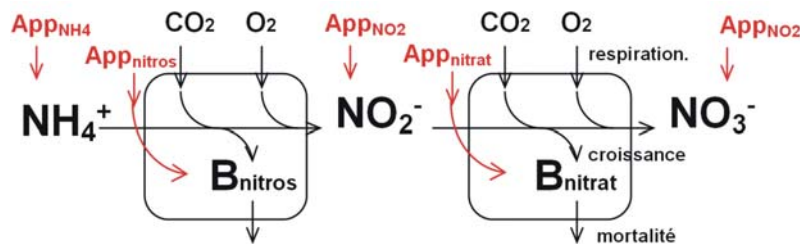


Figure 5 : Nitrification de l'ammonium en deux étapes (G. Billen, modèle SENEQUE)

Les équations résolues par SENEQUE et ProSe sont les suivantes :

$$d\text{NH}_4/\text{dt} = \text{App}_{\text{NH}_4} - \text{nitros}_{\text{max}} \cdot \text{NH}_4 / (\text{NH}_4 + \text{K}_{\text{NH}_4}) \cdot \text{O}_2 / (\text{O}_2 + \text{K}_{\text{O}_2\text{nit}}) \cdot \text{B}_{\text{nitros}}$$

$$d\text{B}_{\text{nitros}}/\text{dt} = \text{App}_{\text{nitros}} + Y_{\text{nit}} \cdot \text{nitros}_{\text{max}} \cdot \text{NH}_4 / (\text{NH}_4 + \text{K}_{\text{NH}_4}) \cdot \text{O}_2 / (\text{O}_2 + \text{K}_{\text{O}_2\text{nit}}) \cdot \text{B}_{\text{nitros}} - \text{kd} \cdot \text{B}_{\text{nitros}}$$

$$d\text{NO}_2/\text{dt} = \text{App}_{\text{NO}_2} + \text{nitros}_{\text{max}} \cdot \text{NH}_4 / (\text{NH}_4 + \text{K}_{\text{NH}_4}) \cdot \text{O}_2 / (\text{O}_2 + \text{K}_{\text{O}_2\text{nit}}) \cdot \text{B}_{\text{nitros}} - \text{nitrat}_{\text{max}} \cdot \text{NO}_2 / (\text{NO}_2 + \text{K}_{\text{NO}_2}) \cdot \text{O}_2 / (\text{O}_2 + \text{K}_{\text{O}_2\text{nat}}) \cdot \text{B}_{\text{nitrat}}$$

$$d\text{B}_{\text{nitrat}}/\text{dt} = \text{App}_{\text{nitrat}} + Y_{\text{nat}} \cdot \text{nitrat}_{\text{max}} \cdot \text{NO}_2 / (\text{NO}_2 + \text{K}_{\text{NO}_2}) \cdot \text{O}_2 / (\text{O}_2 + \text{K}_{\text{O}_2\text{nat}}) \cdot \text{B}_{\text{nitrat}} - \text{kd} \cdot \text{B}_{\text{nitrat}}$$

$$d\text{NO}_3/\text{dt} = \text{App}_{\text{NO}_3} + \text{nitrat}_{\text{max}} \cdot \text{NO}_2 / (\text{NO}_2 + \text{K}_{\text{NO}_2}) \cdot \text{O}_2 / (\text{O}_2 + \text{K}_{\text{O}_2\text{nat}}) \cdot \text{B}_{\text{nitrat}}$$

Tableau 1 : Equations décrivant la dynamique des variables NH₄, NO₂ et NO₃

Les valeurs numériques des paramètres qui interviennent dans ces équations et qui ont été adoptées pour cette simulation préliminaire sont rassemblées dans le tableau 2 ci-dessous.

		nitrosantes	nitratantes
nmax	mgN / mgC.h	0.7	2.5
Kn	mgN/l	1.5	0.02
Ko2	mgO2/l	0.5	1.5
Y	mgC/mgN	0.07	0.02
μmax	h ⁻¹	0.05	0.05
topt	°C	25	25
diti	°C	12	12

Tableau 2 : paramètres de la modélisation

3.2 Données d'entrée du modèle

3.2.1 Apports amont et affluents

Les concentrations de nitrites en Marne et en Seine ont été fournies par le SEDIF. Les prélèvements sont réalisés aux prises d'eau de Neuilly et Choisy respectivement. Ce sont des moyennes journalières. Les lacunes sont complétées par interpolation linéaire entre les concentrations disponibles avant et après la lacune.

Pour l'Oise les mesures hebdomadaires du SIAAP à la confluence Seine Oise ont été interpolées linéairement au pas journalier.

Pour les affluents secondaires les données mensuelles des Réseaux de contrôle sont entrées sans modification, ProSe assurant l'interpolation linéaire des concentrations.

Les débits journaliers de la Seine et de la Marne à l'amont du domaine modélisé et les débits des affluents proviennent de la banque HYDRO France.

3.2.2 Stations d'épurations

Les concentrations en nitrites sont mesurées en sortie des différentes usines du SIAAP (Marne aval, Seine amont, Seine centre, Seine aval et Grésillons). Ces données sont fournies par le SIAAP au pas de temps journalier.

3.2.3 Rejets de temps sec et de temps de pluie

En l'absence de données pour la plupart de ces rejets, pour cette simulation préliminaire, nous avons supposé que les concentrations en nitrites étaient nulles.

3.3 Simulation réalisée

Le contexte général de l'année 2007 a été retenu pour cette simulation. Seul le processus de nitrification de l'ammonium a été simulé en deux étapes comme précisé précédemment.

La sensibilité du comportement du système au temps de résidence des vases en reptation au fond de la Seine a été testée par augmentation progressive des paramètres décrivant les processus de remise en suspension des particules par la navigation, dominante en période d'étiage, et d'érosion liée à l'écoulement de la Seine, processus dominant par forts débits.

Toutes les variables usuelles sont simulées (Poulin M., 2003) mais nous ne présentons ici que les résultats concernant les nitrites. Les concentrations simulées pour l'ammonium et les nitrates ont été vérifiées et sont peu différentes de celles obtenues lors des simulations antérieures (une seule étape de l'ammonium aux nitrates).

3.4 Résultats

Les résultats concernant les nitrites ont été rassemblés en annexe A. Chaque figure représente l'évolution annuelle des nitrites en un des sites de mesure hebdomadaire du SIAAP dont la situation est précisée en Figure 1. Les figures sont classées selon l'ordre des sites, d'amont en aval.

A la confluence Seine Marne, à Ivry-sur-Seine et à la passerelle d'Alfortville sur la Marne, il est possible de constater que les concentrations décroissent nettement de l'amont du domaine (trait noirs) à la confluence Seine Marne, en particulier en période estivale et plus généralement en dehors des périodes de forts débit lorsque le temps de résidence de l'eau s'accroît. En Marne en particulier les concentrations calculées apparaissent fortement sous-estimées.

Cette sous-estimation constatée dès l'amont augmente de la confluence Seine Marne vers l'aval, de Suresnes à Chatou, Bougival puis Sartrouville.

A Poissy les rejets de l'usine Seine aval conduisent par dilution à des valeurs élevées au cours du mois de Juin. Les valeurs les plus fortes n'ont pas été observées.

A Poses, des concentrations élevées ont été mesurées en Mai et Juin. Nos estimations sont largement sous-estimées même en période de fort débit, en début d'année, de Janvier à Mars. La cinétique de nitrification des nitrites semble être trop rapide.

3.5 Perspectives

Il semble indispensable d'estimer en premier lieu les apports de nitrites de l'ensemble des rejets de temps sec et de temps de pluie de l'agglomération parisienne.

Dans un deuxième temps, des tests portant sur les cinétiques de nitrification et de nitrification devront être réalisés. Il semble dès à présent nécessaire de maintenir plus longtemps, sur des distances plus longues, les concentrations en nitrites observées en aval des principaux rejets et ce dès les biefs amont. Ces ajustements devront alors conduire à des valeurs calculées proches des valeurs observées pour l'ensemble des variables du cycle de l'azote, NH_4 , NO_2 et NO_3 et pour tous les sites où des mesures sont disponibles.

Enfin, il est possible que des processus actuellement mal connus soit à prendre en compte, en particulier pour ce qui concerne la production et la consommation de nitrites dans les sédiments de la Seine. Ces recherches seront menées après 2010.

4 Modélisation du comportement biogéochimique des orthophosphates en Seine

Les concentrations en orthophosphates mesurées aux points de prélèvement de l'agglomération parisienne (Figure 1) sont le plus souvent et en toutes saisons sensiblement inférieures aux concentrations résultant de la dilution des apports tels que nous sommes actuellement en mesure de les estimer. La capacité des orthophosphates à s'adsorber sur les particules en suspension de la colonne d'eau et des sédiments, et à se désorber, est largement admise. Des travaux ont été menés dans le cadre du PIREN Seine (Némery, J., 2003 ; Némery et al., 2005 ; Némery J., Garnier J. et al., 2007a, 2007b) sur le piégeage du phosphore depuis les sols agricoles de la Seine amont jusqu'aux vases de l'estuaire de Seine.

4.1 Conceptualisation

Le schéma conceptuel adopté pour simuler les échanges d'orthophosphate entre phases dissoutes et particulaire s'appuie sur le principe d'un équilibre dynamique entre la concentration en orthophosphate (phase dissoute de la colonne d'eau et de l'eau interstitielle des vases fluides du fond dans le cas de la Seine), et la concentration en phosphore inorganique particulaire (des particules de la colonne d'eau et des vases du fond).

Devant les difficultés numériques rencontrées lors de l'implémentation dans ProSe de ces processus d'échange de phosphore entre phase dissoute et phase particulaire, deux schémas conceptuels et une variante ont été testés.

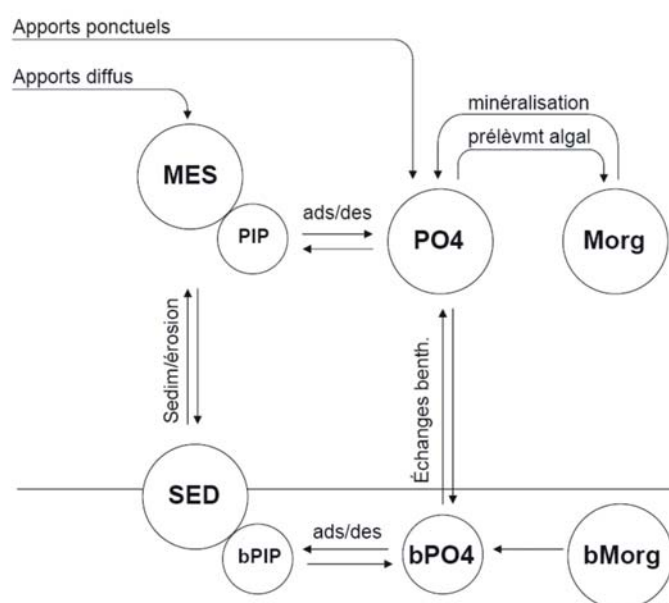


Figure 6 : Echange entre les variables PIP et P_{PO4} (G. Billen et al., SENEQUE)

4.1.1 Formalisme de l'adsorption des orthophosphates adopté dans SENEQUE

Le premier schéma s'appuie sur une relation d'équilibre instantané (Figure 7) entre les variables PIP, phosphore inorganique particulaire, MES, matières en suspension, et P_{PO4} , orthophosphate :

$$PIP = MES \cdot P_{ac} \cdot P_{PO4} / (P_{PO4} + K_{ps})$$

Avec :

PIP : phosphore inorganique particulaire

MES : matières en suspension

Les valeurs numériques adoptées pour cette simulation préliminaire sont les suivantes $P_{ac} = 5,5$ mgP/gMES, $K_{ps} = 0,7$ mgP/l.

Cette relation traduit le fait que, la concentration en orthophosphate augmentant, les sites potentiels pour l'adsorption sur les particules se saturent progressivement. La valeur limite est ici de 5,5 mgP/gMES. Pour une concentration K_{ps} en P_{PO_4} de 0,7 mgP/l, la variable PIP vaut la moitié de la valeur à saturation.

Ce formalisme traduit un équilibre instantané entre les variables PIP, MES et P_{PO_4} . Cet équilibre est déplacé par un apport de l'une ou plusieurs des trois variables dans le volume élémentaire de calcul considéré (une maille pour ProSe) si l'on considère la résolution aux différences finies, réalisée dans ProSe, des équations d'évolution des variables de la colonne d'eau et des sédiments. Il en résulte une adsorption ou une désorption des orthophosphates.

L'algorithme mis en œuvre peut être explicité ainsi :

On calcule tout d'abord PIP_{pot}^t , phosphore inorganique particulaire potentiel à partir de P_{PO_4} et MES à l'instant t :

$$PIP_{pot}^t = MES^t \cdot P_{ac} \cdot P_{PO_4}^t / (P_{PO_4}^t + K_{ps})$$

Notons δPIP la différence $PIP_{pot}^t - PIP^t$

1. Si $\delta PIP > 0$ il existe une capacité d'adsorption résiduelle

1.1. Si $\delta PIP > P_{PO_4}^t$, $\delta PIP' = P_{PO_4}^t$

1.2. Si $\delta PIP < P_{PO_4}^t$, $\delta PIP' = \delta PIP$

Dans les deux cas :

$$P_{PO_4}^{t+dt} = P_{PO_4}^t + \delta PIP'$$

2. Si $\delta PIP < 0$ il y aura désorption de phosphore sous forme orthophosphate

$$P_{PO_4}^{t+dt} = P_{PO_4}^t - \delta PIP$$

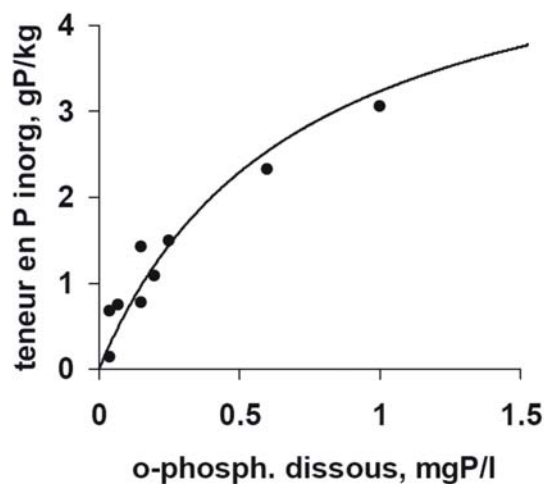


Figure 7 : Relation entre les variables PIP, MES et P_{PO_4} (G. Billen et al., SENEQUE)

4.1.2 Formalisme proposé par J. Némery

Les travaux menés sur l'ensemble du bassin de la Seine par J. Némery (Némery J., 2003 ; Némery et al., 2005; Némery J., Garnier J., 2007a; Némery J., Garnier J., 2007b), depuis les petits bassins versant de l'amont jusqu'à l'estuaire de la Seine, ainsi que sur la Marne, ont permis de proposer une relation de type « Freundlich » paramétrable et adaptée au type de bief sur lequel on l'applique. Ce deuxième formalisme présente l'intérêt de faire intervenir un « temps caractéristique » qui pourrait s'interpréter comme le temps de

contact entre la phase dissoute et la phase particulaire, cette durée s'accroissant des petits ordres de rivière amont aux ordres élevés de l'aval du bassin de la Seine.

Cette relation est la suivante :

$$\text{PIP/MES} = a \cdot P_{\text{PO}_4}^b \cdot T_c^d$$

Avec :

T_c : temps caractéristique, dépendant du site d'étude,

a, b, d : paramètres expérimentaux,

PIP : variable liée aux MES en équilibre avec P_{PO_4}

4.2 Données d'entrée du modèle

4.2.1 Apports amont et affluents

Les relations proposées sont utilisées pour calculer la variable PIP aux entrées du domaine modélisé, les concentrations en MES et en P_{PO_4} étant connues. Pour la relation de type Freundlich on adopte à l'amont un temps caractéristique T_c de 1 mois.

4.2.2 Rejets de STEP, rejets de temps sec et de temps de pluie

La concentration en PIP dans les différents types de rejets urbains est calculée à partir des concentrations en phosphore total et en orthophosphate. Ces concentrations sont soit mesurées soit estimées à partir des méthodes usuelles (Poulin M., 2003). La concentration en phosphore inorganique particulaire est supposée égale à la moitié de la différence entre les concentrations en phosphore total et en orthophosphate.

4.3 Simulations réalisées

Trois séries de simulations ont été réalisées correspondant aux deux formalismes à tester. Le premier, « SENEQUE », est voisin de ce qui est utilisé dans SENEQUE aux questions numériques près, le deuxième, « Freundlich », est plus prospectif et utilise de manière simplifiée le formalisme proposé au cours du travail de thèse de J. Némery. Nous n'avons pas tenté de prendre en compte l'âge des particules à l'aide de ProSe et, pour cette simulation préliminaire, nous avons adopté un « temps caractéristique » T_c de 1 mois à l'amont du domaine simulé et de 3 mois à l'intérieur.

4.4 Résultats

Les résultats concernant les orthophosphates ont été rassemblés en annexe B et C pour les simulations « SENEQUE » et en annexe D pour la simulation « Freundlich ». Chaque figure représente l'évolution annuelle des orthophosphates en un des sites de mesure hebdomadaire du SIAAP dont la situation est précisée en Figure 1. Les figures sont classées selon l'ordre des sites, d'amont en aval.

4.4.1 Simulation « SENEQUE »

Les figures sont regroupées en annexe B. En période de fortes concentrations en MES, des oscillations numériques compromettent totalement la validité des résultats. L'examen détaillé des concentrations de P_{PO_4} et de PIP montre que ces compartiments se vident et se remplissent alternativement. Ce problème est dû à la formulation adoptée et introduite dans ProSe. Un équilibre instantané entre les variables P_{PO_4} et PIP n'est pas compatible avec la conception de ProSe. En période de faible concentration en MES, pendant la période de débit moyen à faible, les oscillations numériques sont plus rares et les résultats obtenus sont encourageants. Les concentrations mesurées et calculées sont en bon accord.

Des dispositions ont donc été prises pour tenter de résoudre ce problème numérique en introduisant dans ProSe une procédure simulant une cinétique d'évolution graduelle vers l'équilibre.

4.4.2 Simulation « SENEQUE » amortie

L'algorithme d'amortissement mis en œuvre peut être explicité ainsi :

Comme précédemment, on calcule tout d'abord $\text{PIP}_{\text{pot}}^t$, phosphore inorganique particulaire potentiel à partir

de P_{PO4} et MES à l'instant t :

$$PIP_{pot}^t = MES^t \cdot P_{ac} \cdot P_{PO4}^t / (P_{PO4}^t + K_{ps})$$

Notons δPIP la différence $PIP_{pot}^t - PIP^t$

1. Si $\delta PIP > 0$ il existe une capacité d'adsorption résiduelle

1.1. Si $\delta PIP > P_{PO4}^t$, $\delta PIP' = P_{PO4}^t$

1.2. Si $\delta PIP < P_{PO4}^t$, $\delta PIP' = \delta PIP$

Dans les deux cas :

$$P_{PO4}^{t+dt} = P_{PO4}^t - \delta PIP' \cdot dt / (dt + K_{dt})$$

2. Si $\delta PIP < 0$ il y aura désorption de phosphore sous forme orthophosphate

$$P_{PO4}^{t+dt} = P_{PO4}^t - \delta PIP \cdot dt / (dt + K_{dt})$$

K_{dt} est un paramètre ajustable. Ainsi pour $K_{dt} = dt$, l'échange sera réduit de moitié par rapport à l'échange non amorti.

Les figures sont regroupées en annexe C. La simulation dont les résultats sont présentés à été réalisée avec $K_{dt} = dt = 10$ mn. Les oscillations ont totalement disparu et les résultats sont en bon accord avec les mesures sans que nous ayons modifié des valeurs utilisées dans SENEQUE.

4.4.3 Simulation « *Freundlich* »

Les figures sont regroupées en annexe D. Pour chaque site ont été tracées les évolutions temporelles mesurées (croix bleues) et calculées (trait bleu sans adsorption, trait rouge avec adsorption de type Freundlich). Le formalisme est plus stable que le précédent, seules quelques oscillations étant observées sur la Marne à Alfortville en Février 2007. L'adsorption est notable pendant les périodes de fortes concentrations en MES mais reste faible. De nombreuses périodes de faible désorption peuvent être observées en particulier pendant la période de faible débit. Les résultats obtenus montrent que l'adsorption simulée reste faible et ne permet pas d'expliquer l'écart entre concentrations mesurées et calculées.

4.5 Perspectives

La méthode retenue pour SENEQUE fournit des résultats satisfaisants du point de vue de la simulation de l'adsorption des orthophosphates avec les paramètres utilisés dans ce logiciel, sans qu'il ait été nécessaire de les ajuster. En revanche ce formalisme produit des oscillations numériques du fait de l'hypothèse d'équilibre instantané entre les variables PIP, MES et PO4. Une méthode est proposée pour éliminer ces oscillations numériques. Des tests devront être réalisés concernant l'influence sur les résultats de la constante de temps retenue et du pas de temps de calcul.

5 Perspectives d'évolution du modèle ProSe

La modélisation des variables nitrites et orthophosphates sera poursuivie afin de parvenir dès que possible à une version opérationnelle au cours de l'année 2010.

Les apports de nitrites par les réseaux d'assainissement en temps de pluie feront l'objet d'estimation à partir des données disponibles au SIAAP et collectées dans le programme OPUR. Des ajustements portant sur les cinétiques de transformation des nitrites en nitrates seront également menées en 2010.

Les difficultés numériques rencontrées en période de fortes concentrations de matières en suspension et de leurs variations rapides d'un jour à l'autre proviennent du formalisme adopté d'équilibre instantané entre phosphore inorganique particulaire et orthophosphate. Ces oscillations numériques semblent pouvoir être éliminées pour les situations rencontrées en 2007. La solution adoptée consiste à introduire une cinétique d'amortissement des échanges entre les variables PIP et PO4. Cette méthode devra être validée.

Le suivi de ces actions 2010 sera réalisé lors des réunions à prévoir du groupe de travail SENEQUE-ProSe, la première de ces réunions ayant eu lieu fin Septembre 2009.

La modélisation du comportement des bactéries indicatrices de contamination fécale apportées avec les rejets de temps de pluie sera prise en compte par l'ajout dans ProSe de variables simulant le comportement de telles bactéries libres et attachées aux particules.

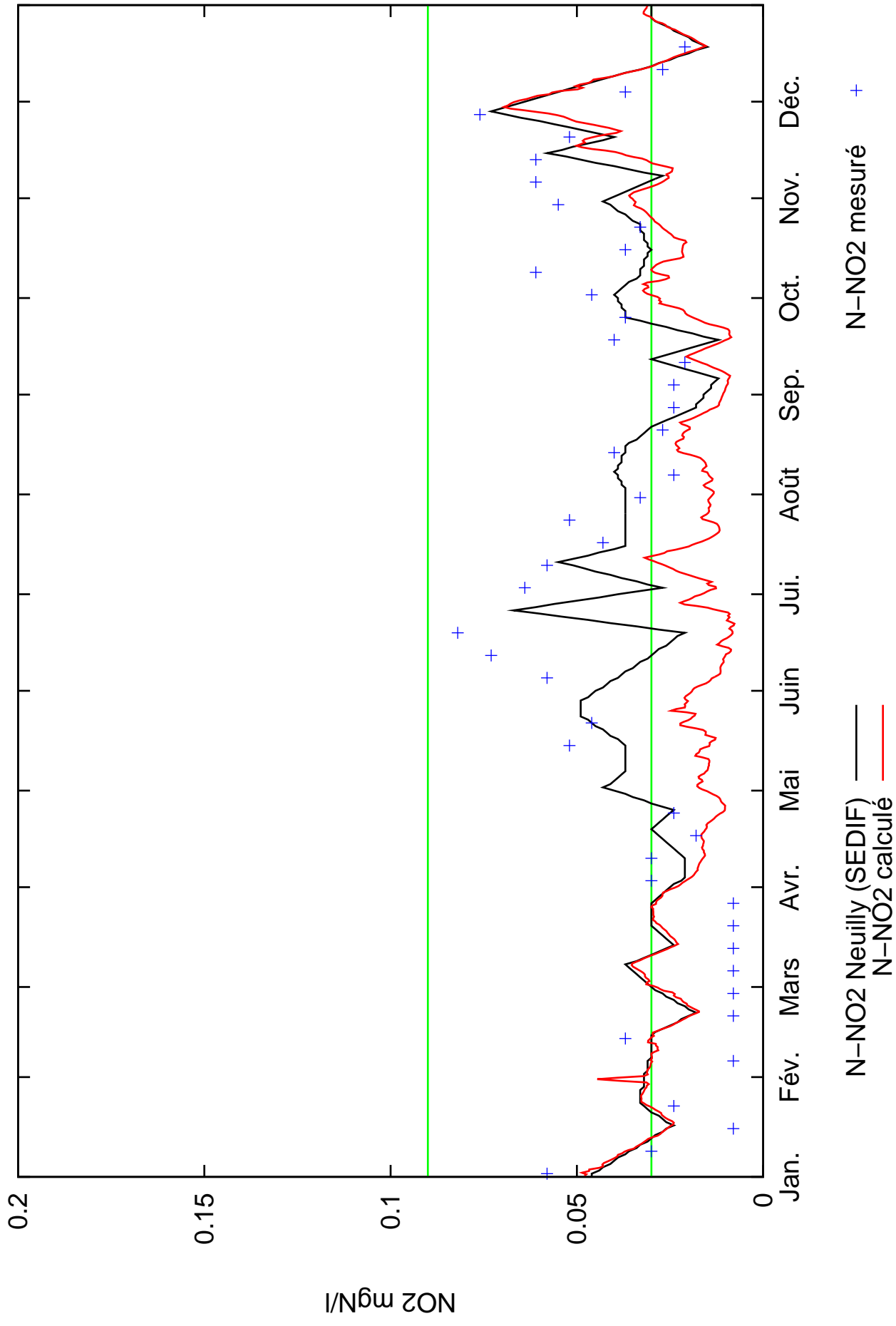
De plus nous nous intéresserons en 2010 à la croissance algale et à son effet sur les teneurs en oxygène de la Seine. En ce qui concerne les croissances algales, les modèles actuels sont souvent pris en défaut sur la prévision des blooms. Outre la connaissance aussi précise que possible des biomasses algales parvenant aux limites amont du domaine modélisé, l'amélioration des modèles passe par une meilleure prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle du rayonnement solaire. Ce travail réalisé, des approches plus approfondies, utilisant par exemple un certain niveau d'assimilation de données, seront mis en œuvre pour tenter, par exemple, de mieux évaluer la date d'occurrence et l'intensité des blooms algaux. L'analyse de la contribution des algues à la qualité de l'eau de la Seine entre Paris et Pose sera réalisée grâce à une analyse variographique mise au point en 2009 sur les nitrates dans le cadre de la thèse d'Edwige Polus (Polus E., 2009).

6 Bibliographie

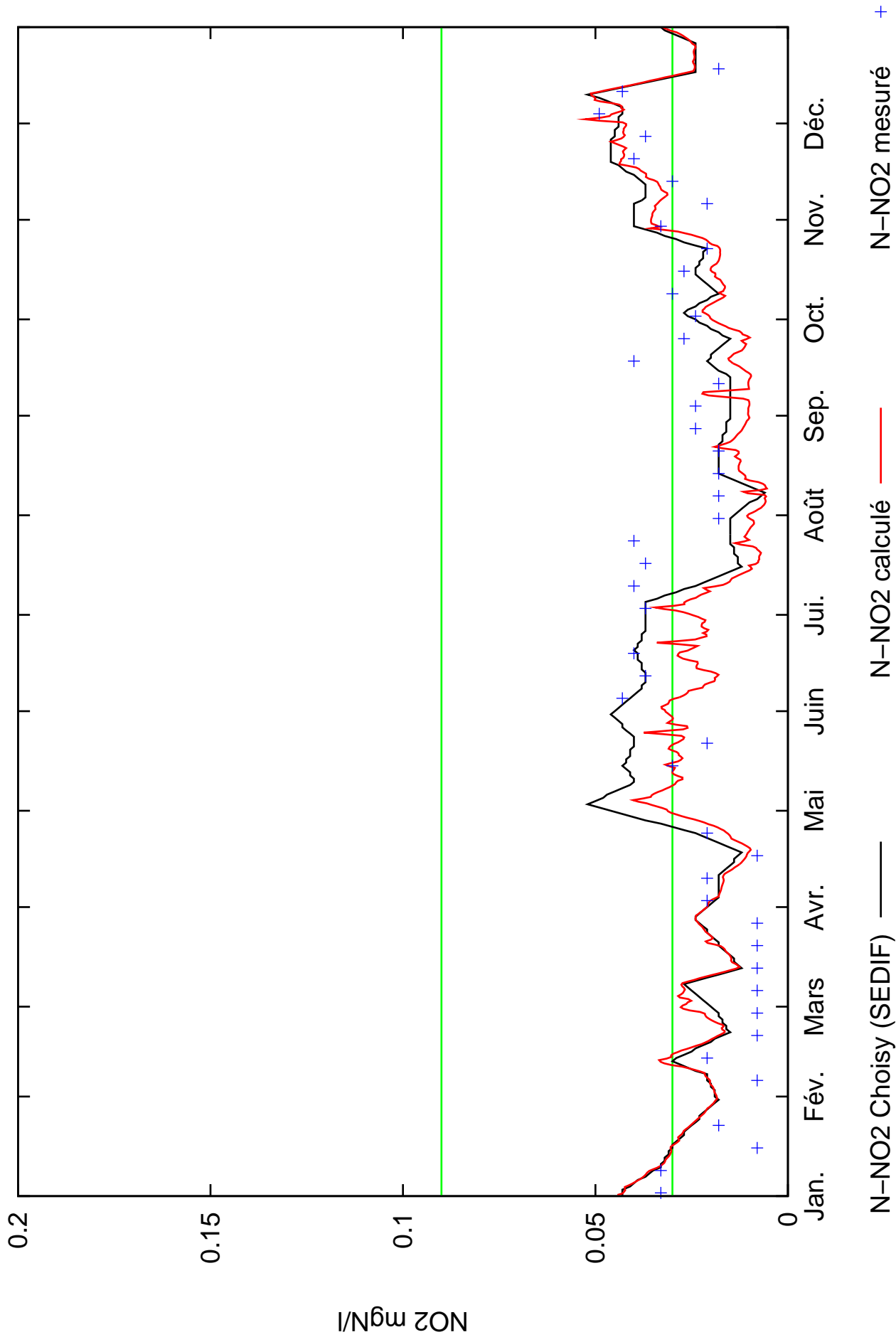
- Billen G., Garnier J., Thieu V., Silvestre M., 2009, Présentation du modèle Riverstrahler/ SENEQUE, Atelier SENEQUE-ProSE du 24 Septembre 2009.
- Garnier J., Némery J., Billen G., Théry S., 2005, Nutrient dynamics and control of eutrophication in the Marne River system: modelling the role of exchangeable phosphorus, *Journal of Hydrology* 304 (2005) 397–412 pages.
- Némery J., 2003, Origine et devenir du phosphore dans le continuum aquatique de la Seine des petits bassins amont à l'estuaire : rôle du phosphore échangeable sur l'eutrophisation, thèse UPMC-GRN, 264 p.
- Némery J., Garnier J., 2007a, Origin and fate of phosphorus in the Seine watershed (France): Agricultural and hydrographic P budgets, *JGR*, Vol. 112, G03012, doi:10.1029/2006JG000331, 2007.
- Némery J., Garnier J. 2007b, Typical features of particulate phosphorus in the Seine estuary (France), *Hydrobiologia* (2007) 588: p. 271–290, doi 10.1007/s10750-007-0669-7.
- Polus E., Flipo N., de Fouquet C., Poulin M., soumis en 2009, Geostatistics for assessing the efficiency of distributed physically-based water quality model, application to nitrates in the Seine River.
- Poulin M., 2006, Réalisation de simulations PROSE, année de référence 2003, Rapport SAFEGE-ARMINES-SETUDE pour le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne, Rapport Ecole des Mines de Paris R060629 MPOU.
- Ruszniewski. M., Sablayrolles C., Poulin M., 2007, Réalisation de simulations PROSE, Etude de l'alimentation de l'usine Seine Aval, Rapport Ecole des Mines de Paris R071212MPOU.
- Poulin M., 2008, Réalisation de simulations PROSE, année de référence 2006, Rapport SAFEGE-ARMINES pour le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne, Rapport Ecole des Mines de Paris R080310 MPOU.
- Poulin M., 2009, Réalisation de simulations PROSE, année de référence 2004 et 2005, Rapport SAFEGE-ARMINES-SETUDE pour le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne, Rapport Ecole des Mines de Paris R090313 MPOU.

7 Annexe A : Concentrations en nitrites mesurées et calculées en 2007

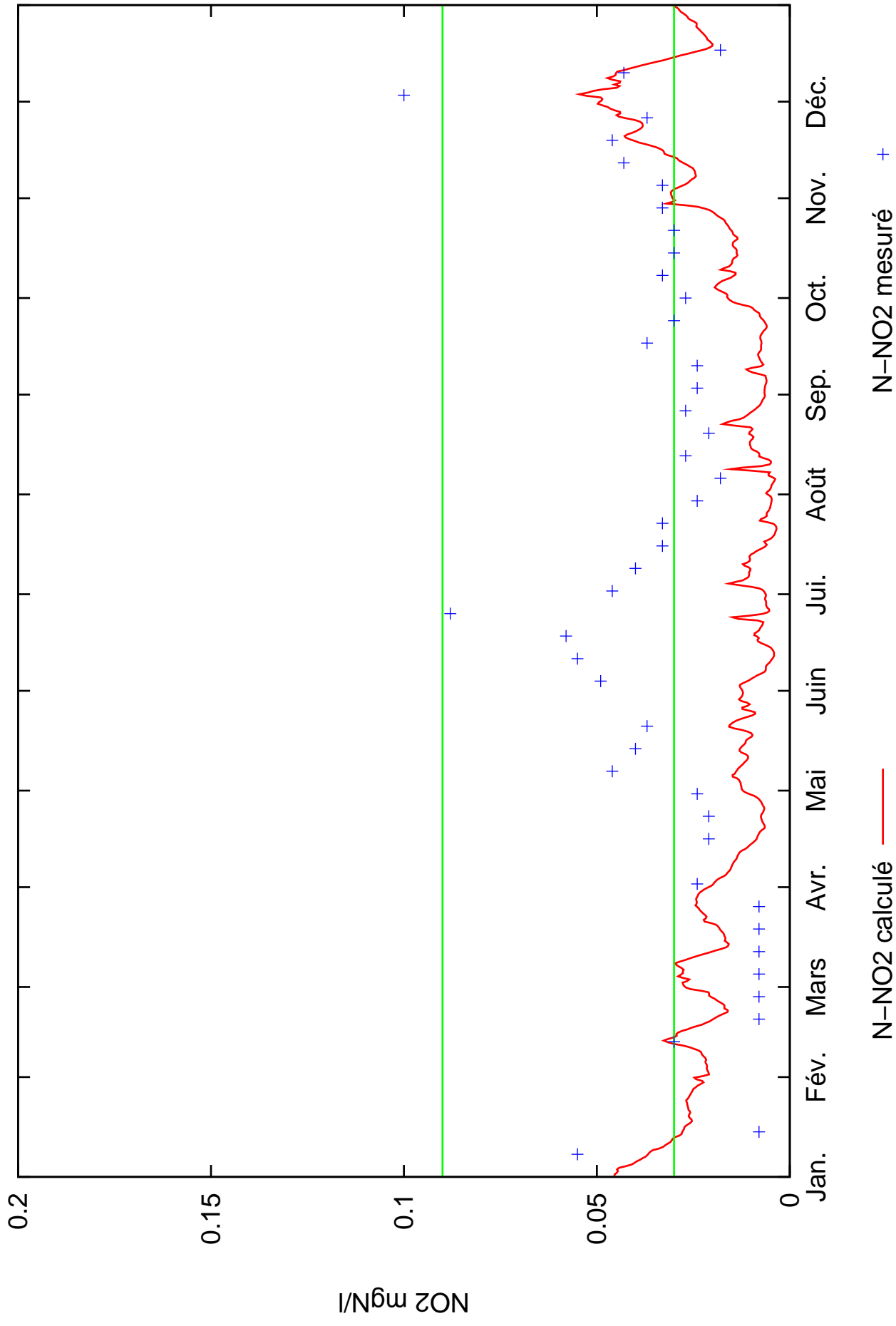
Alfortville (Marne) : nitrite mesuré et calculé en 2007



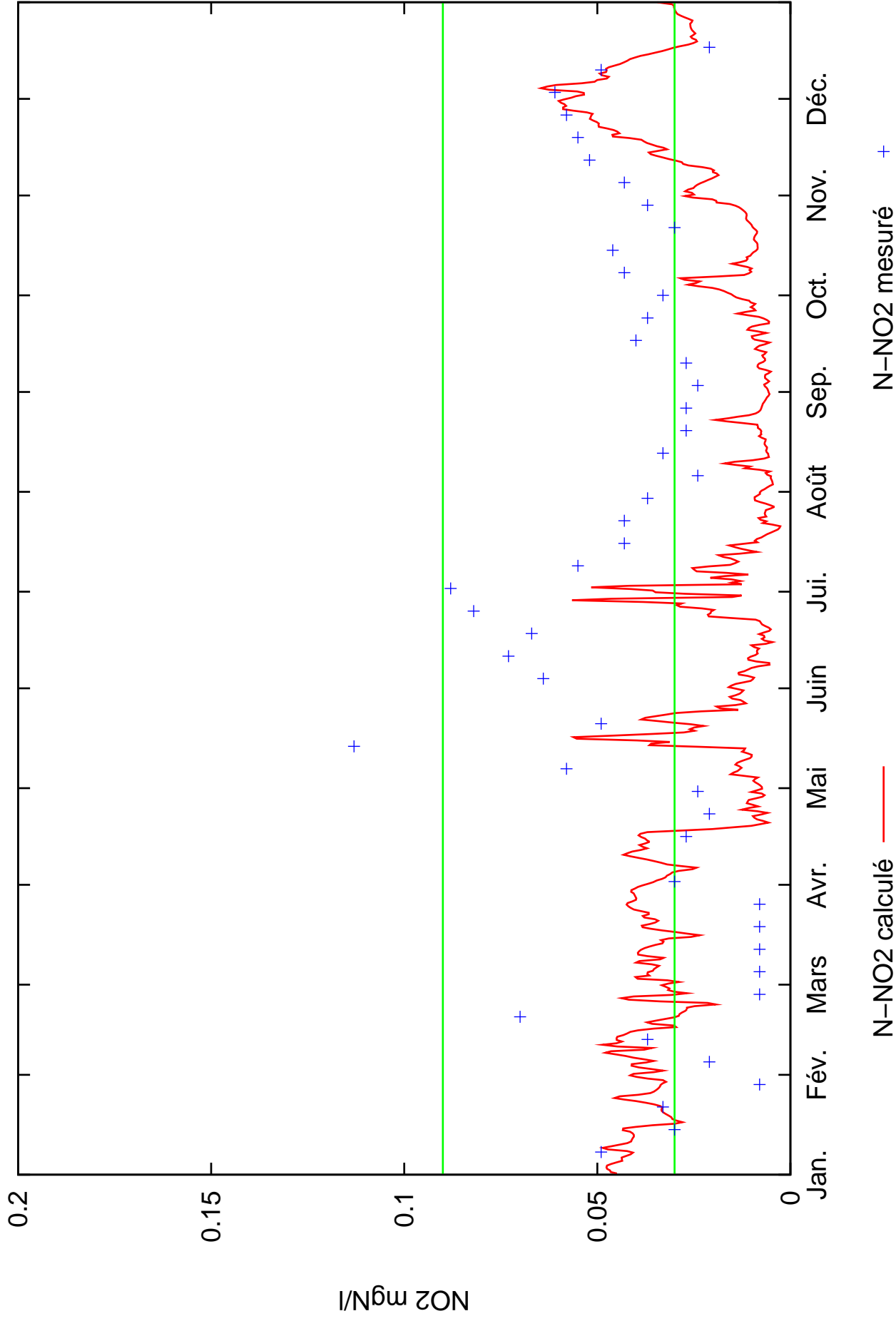
Ivry : nitrite mesuré et calculé en 2007



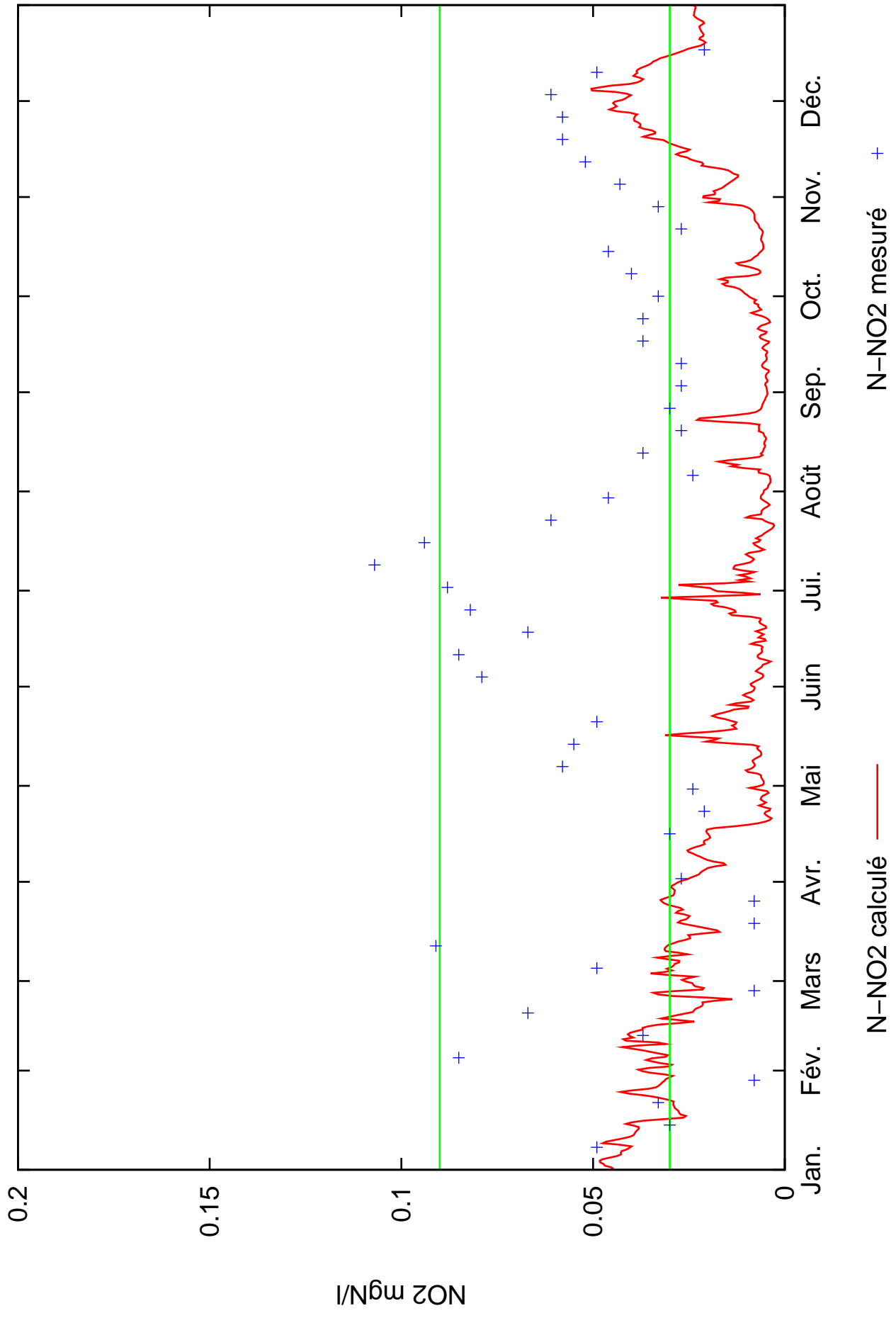
Suresnes : nitrite mesuré et calculé en 2007



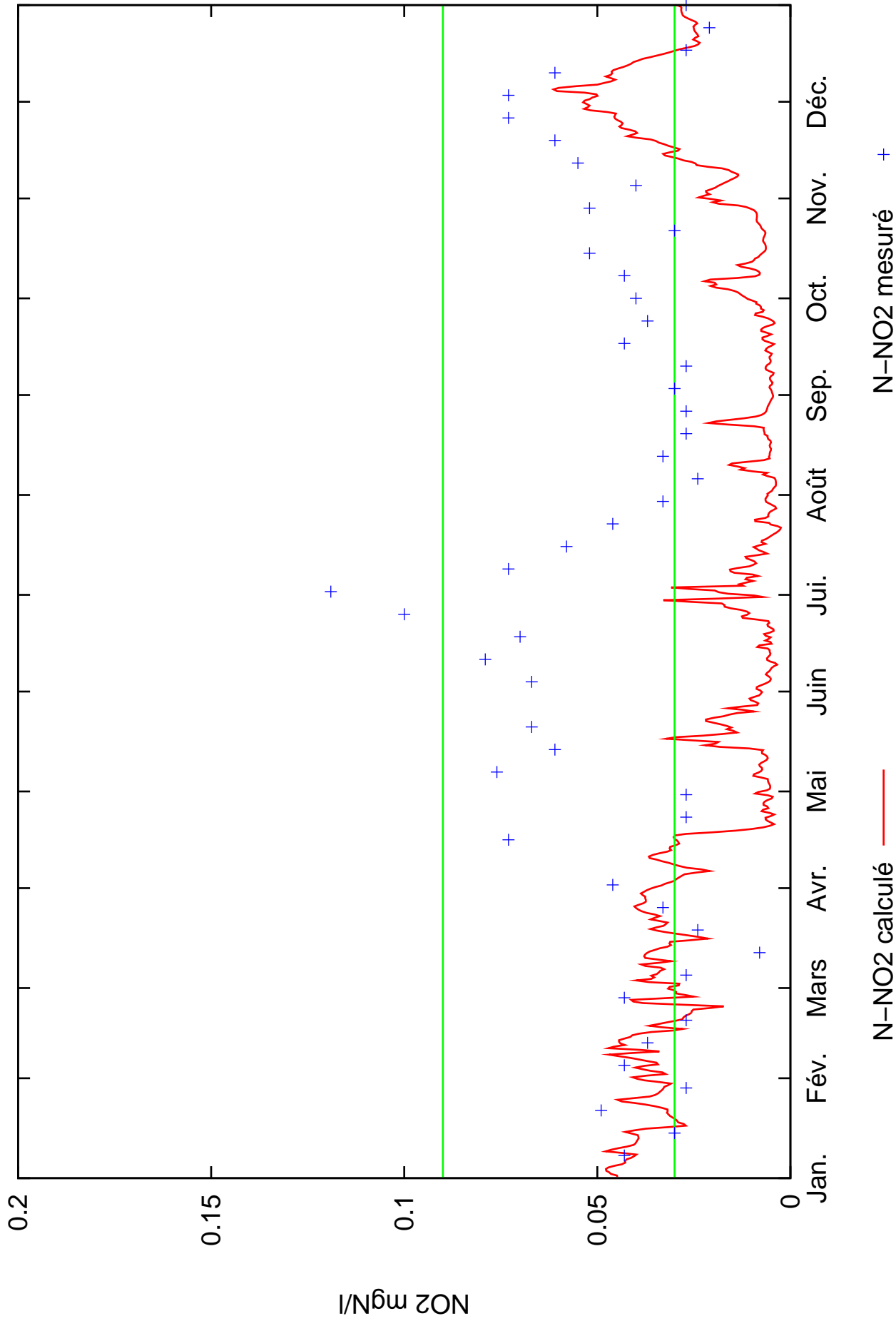
Chatou : nitrite mesuré et calculé en 2007



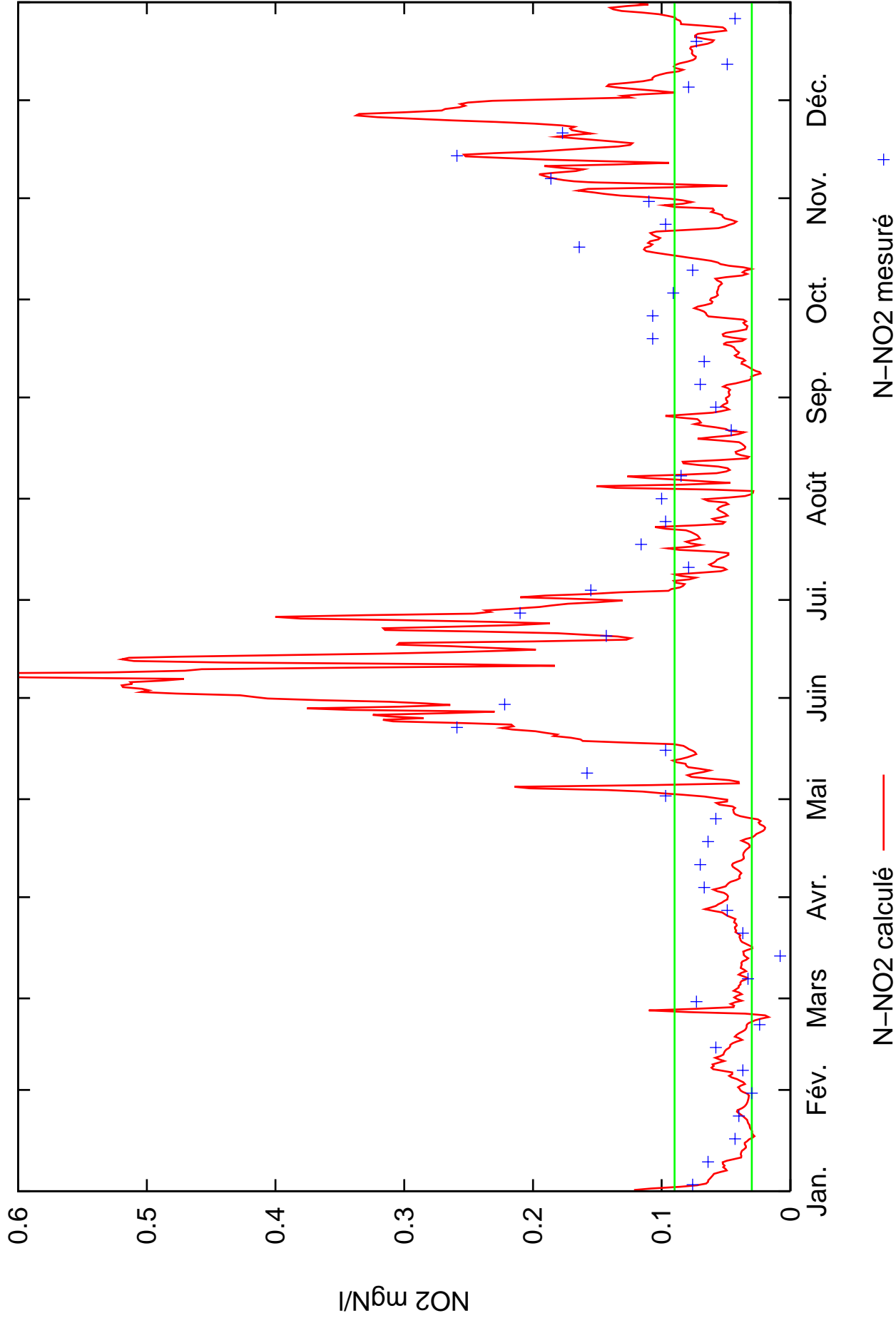
Bougival : nitrite mesuré et calculé en 2007



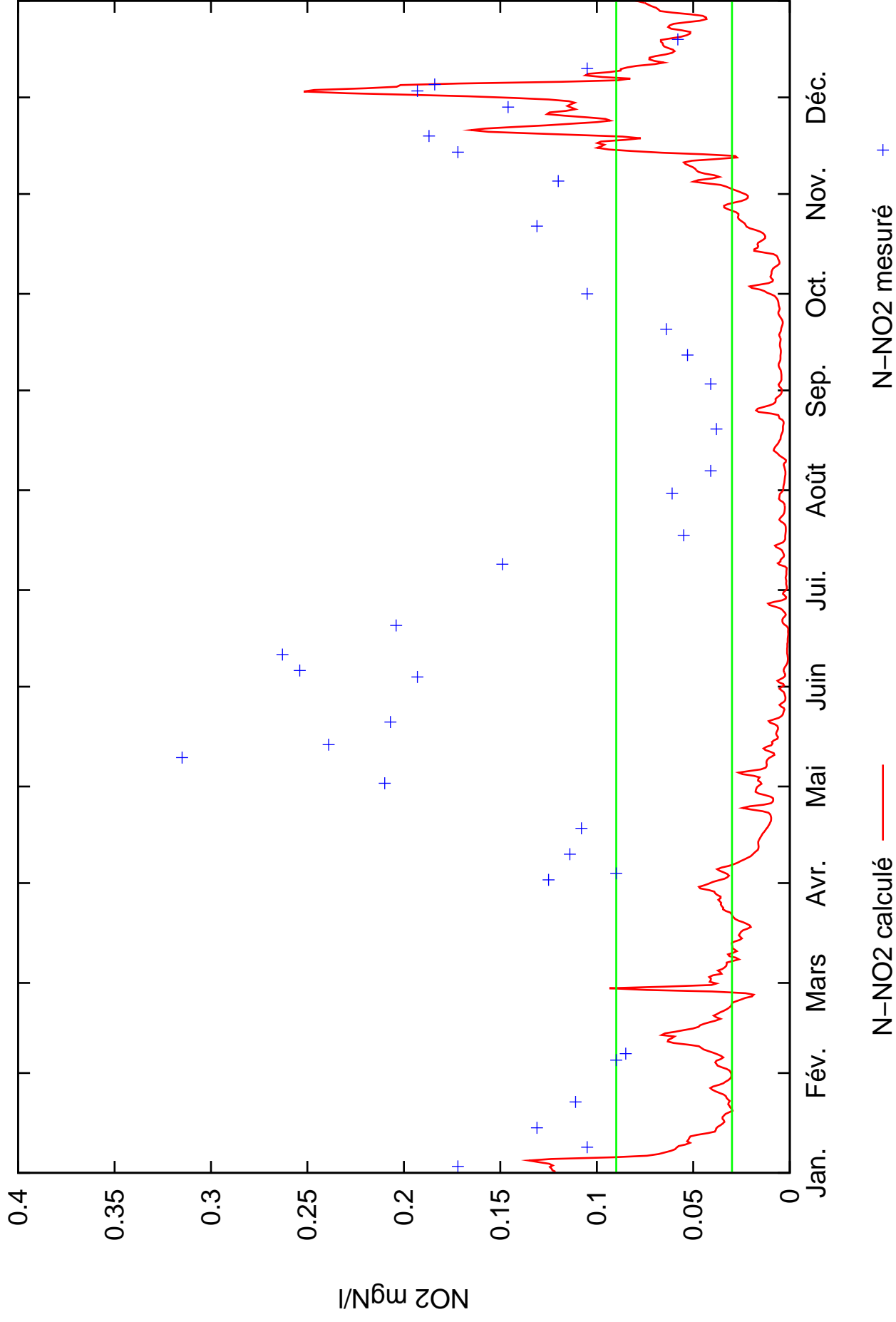
Sartrouville : nitrite mesuré et calculé en 2007



Poissy : nitrite mesuré et calculé en 2007

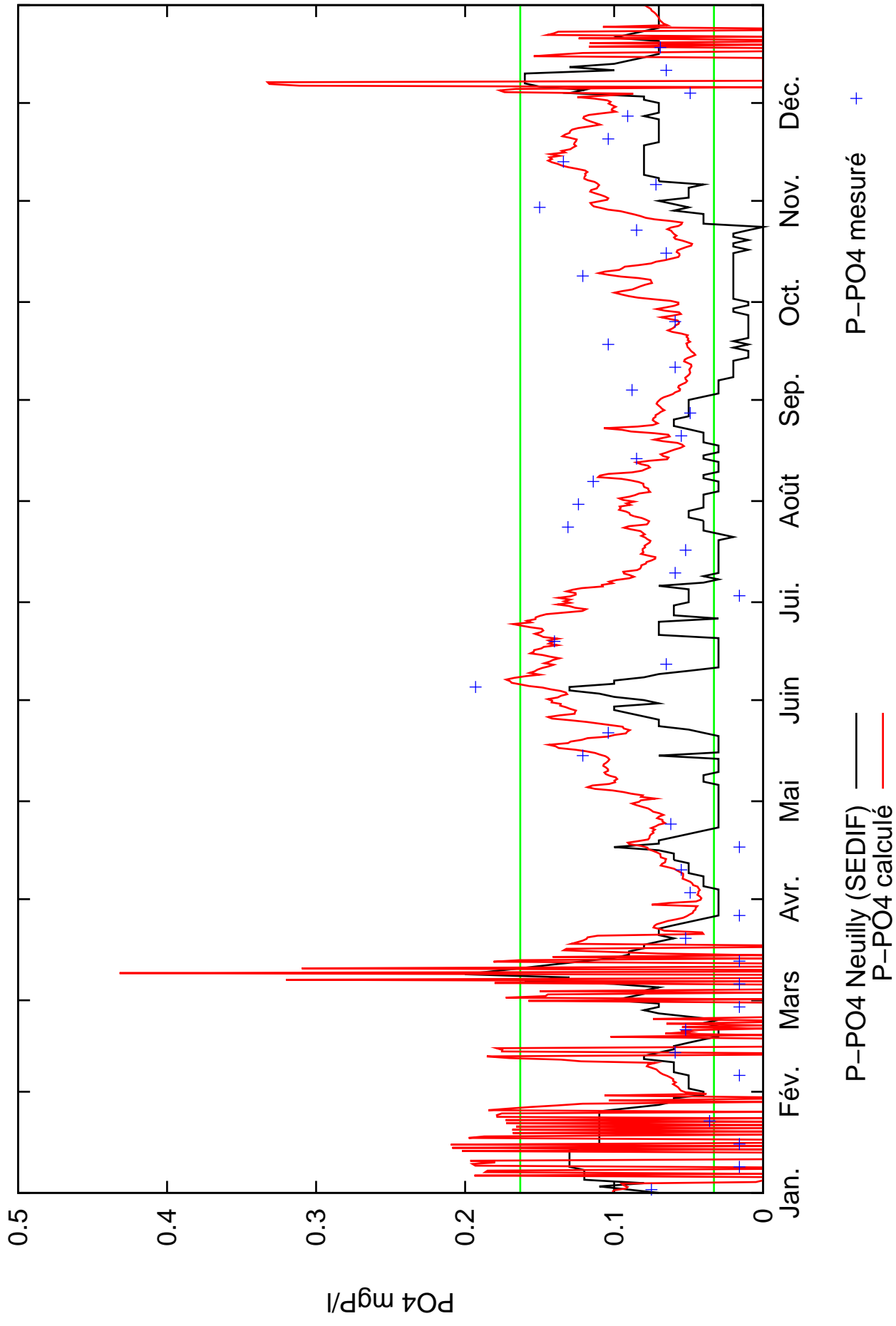


Poses : nitrite mesuré et calculé en 2007

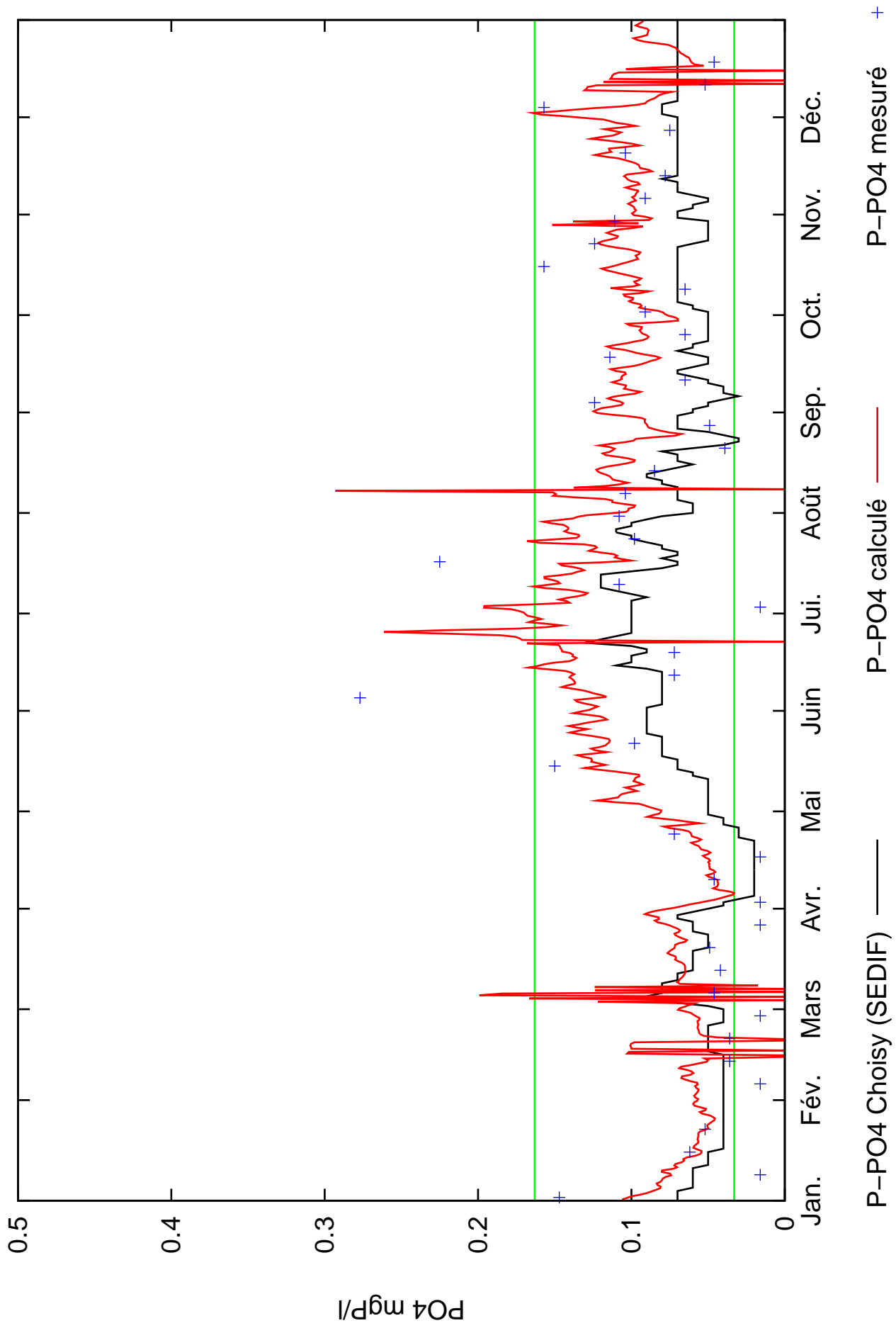


8 Annexe B : Concentrations en orthophosphates mesurées et calculées en 2007, adsorption simulée par une relation de type « SENEQUE »

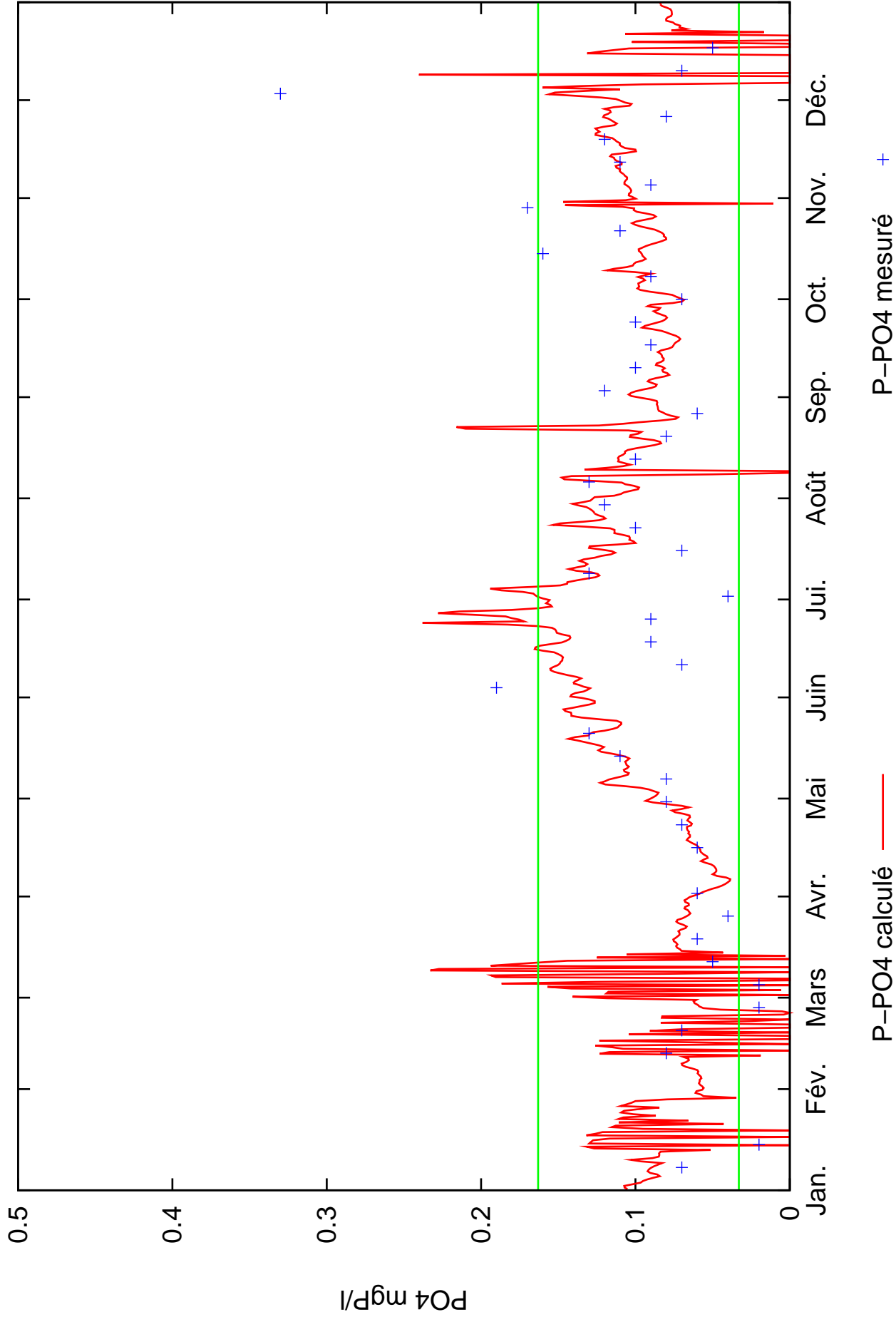
Alfortville (Marne) : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



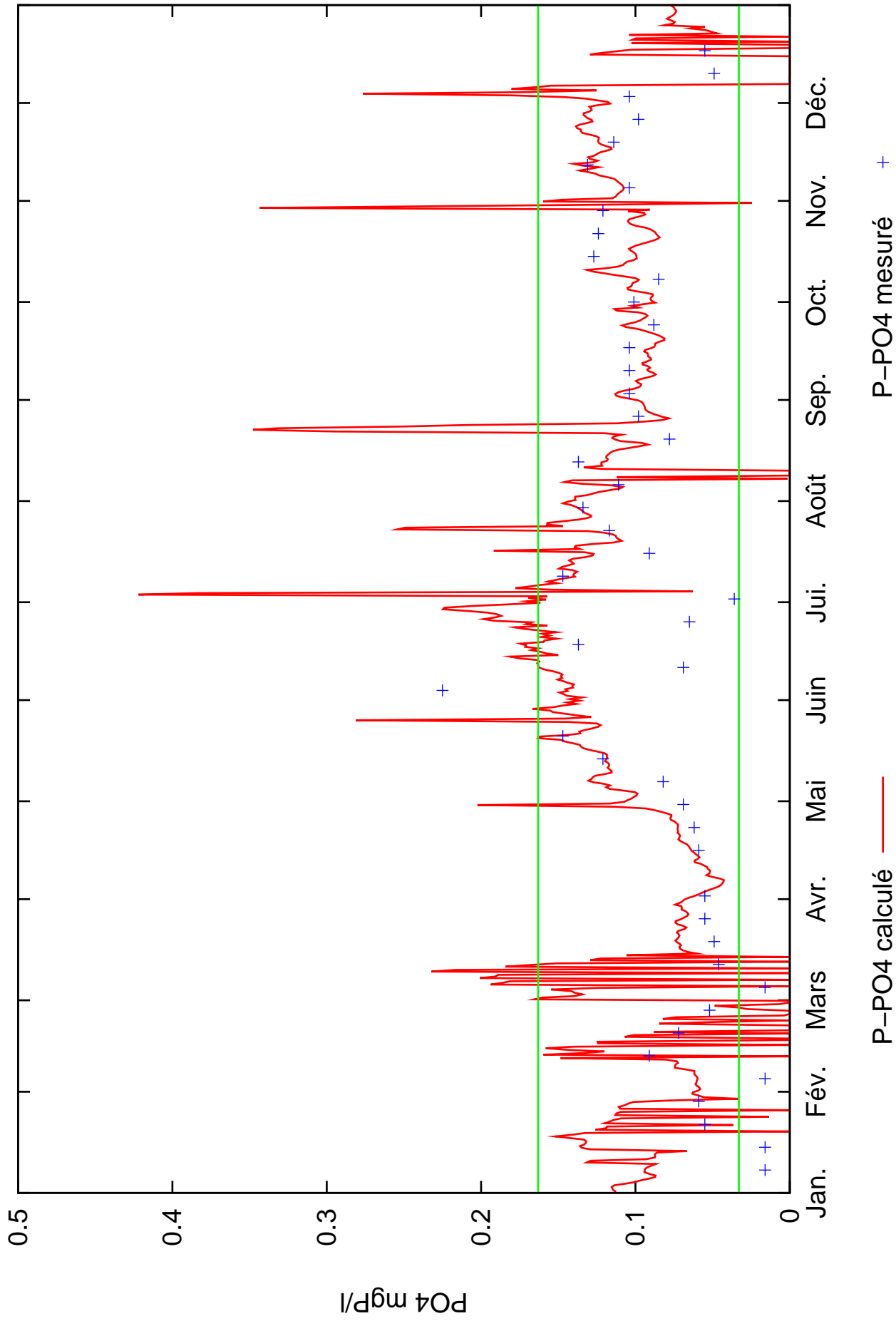
Ivry : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



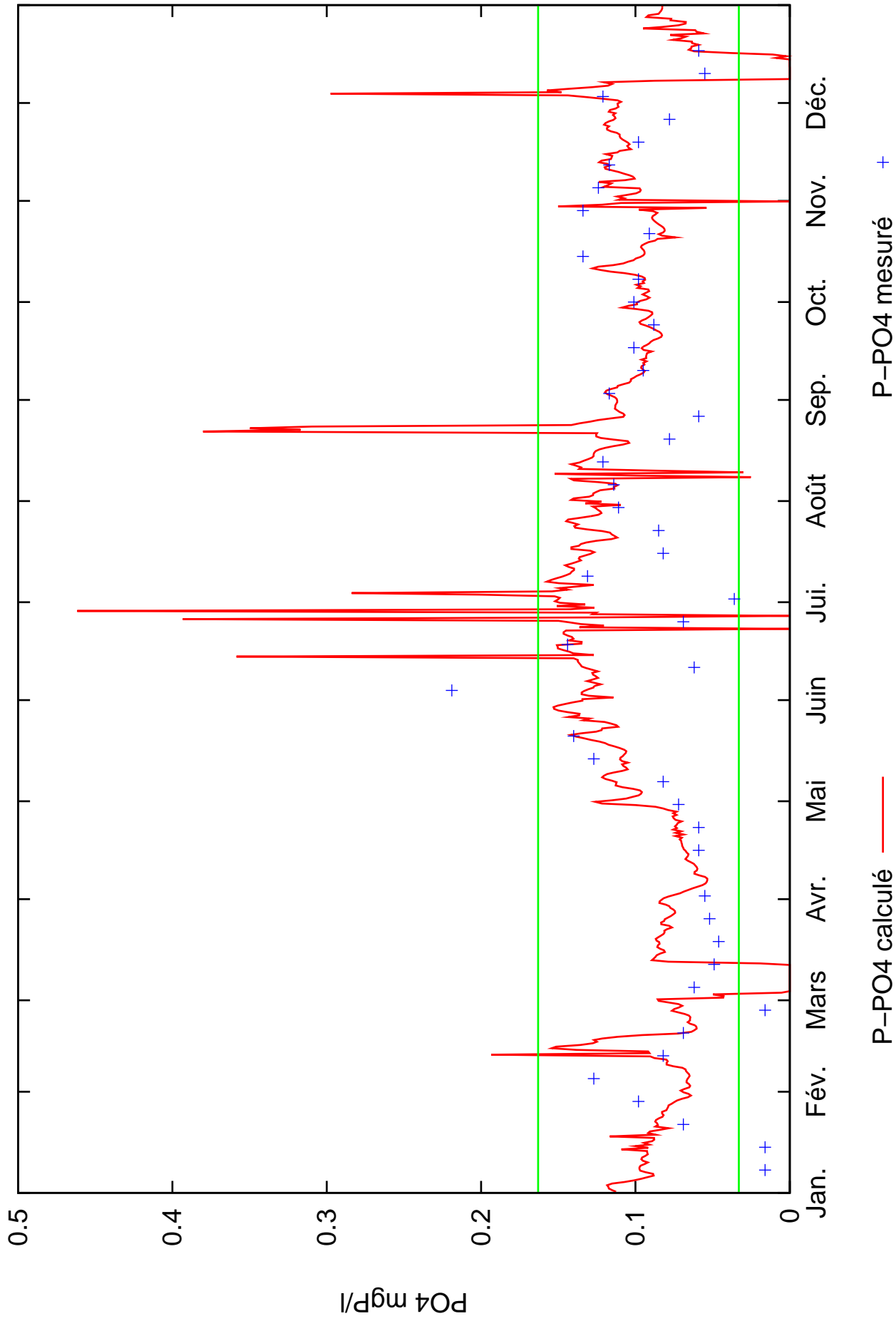
Suresnes : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



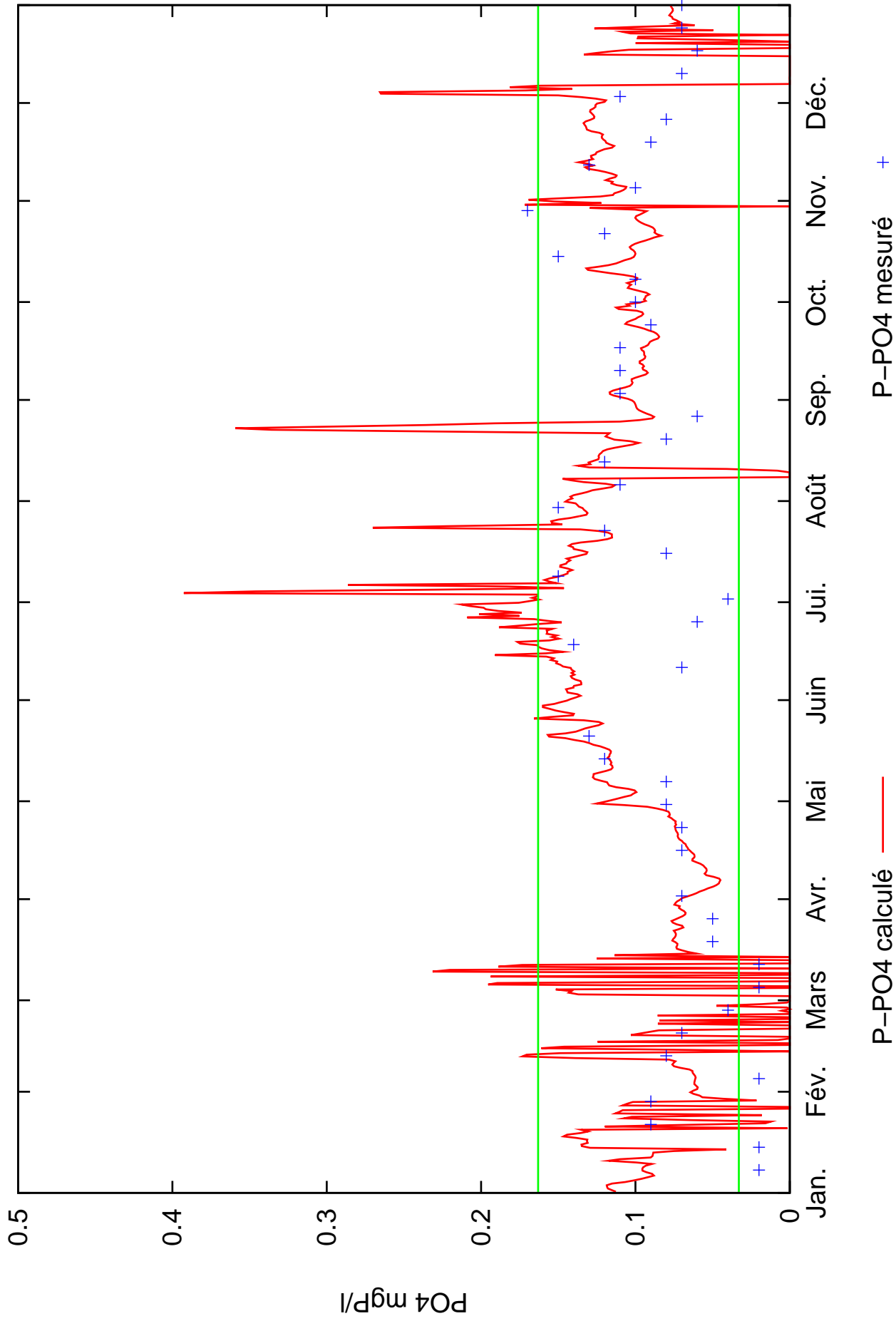
Chatou : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



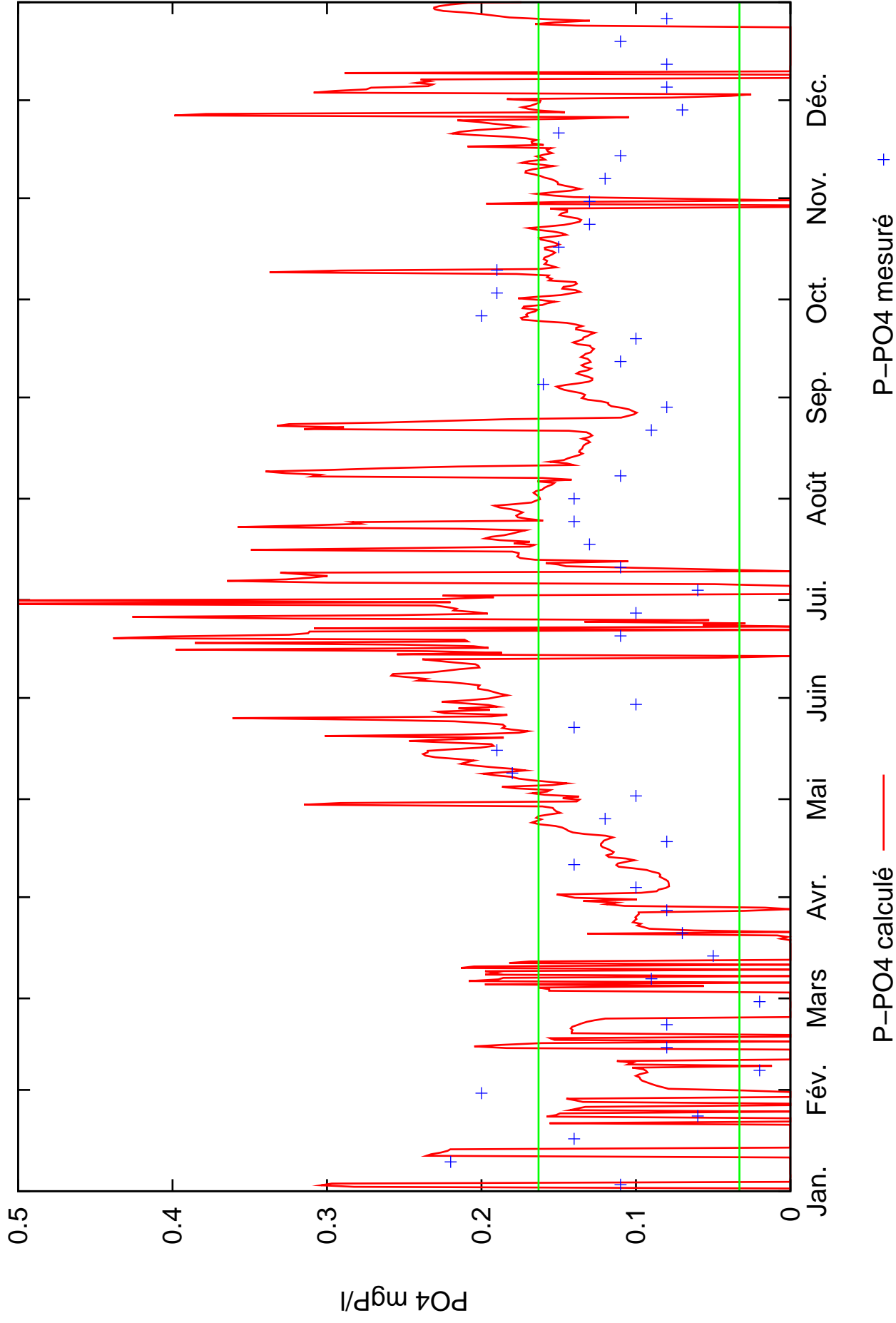
Bougival : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



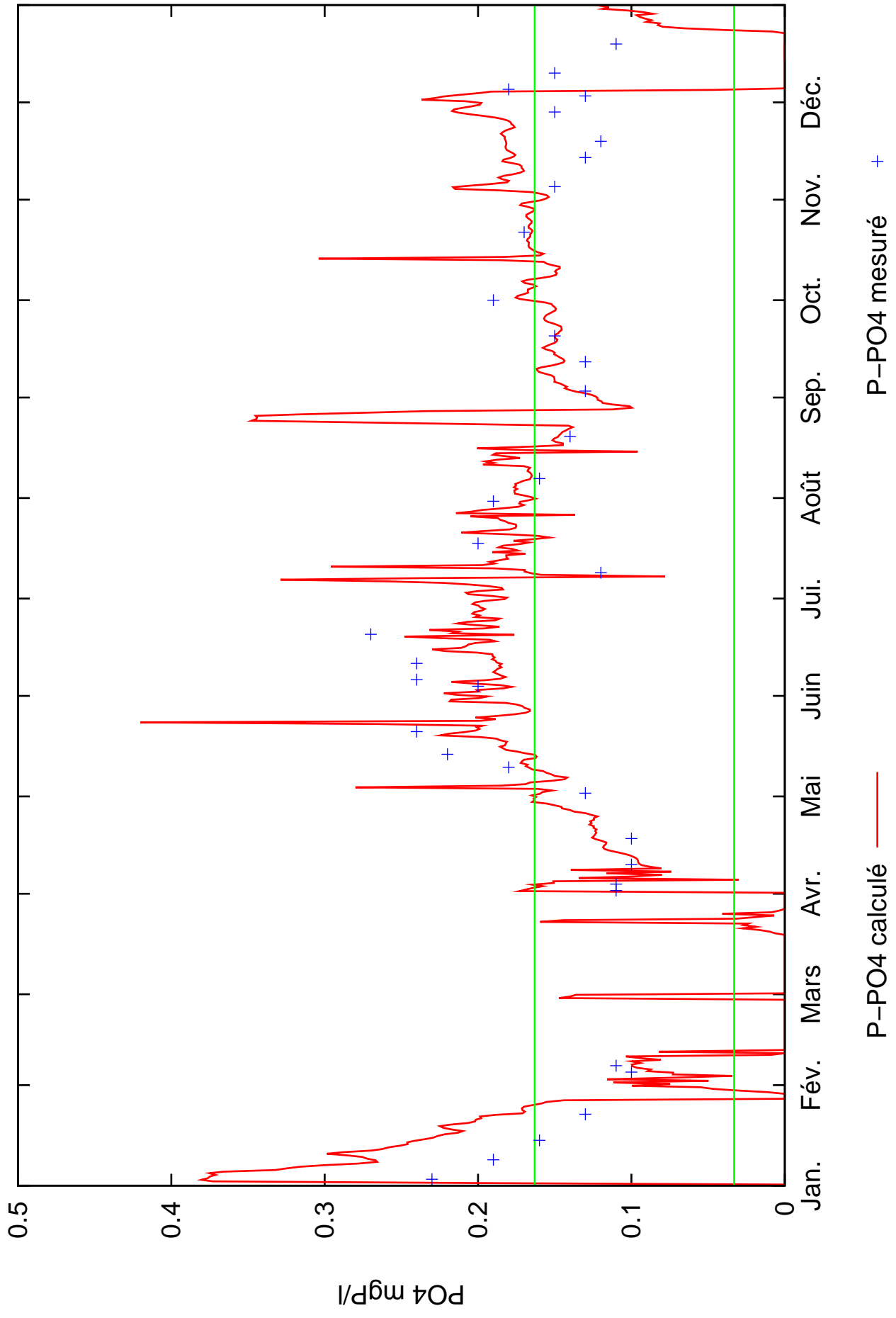
Sartrouville : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



Poissy : orthophosphate mesuré et calculé en 2007

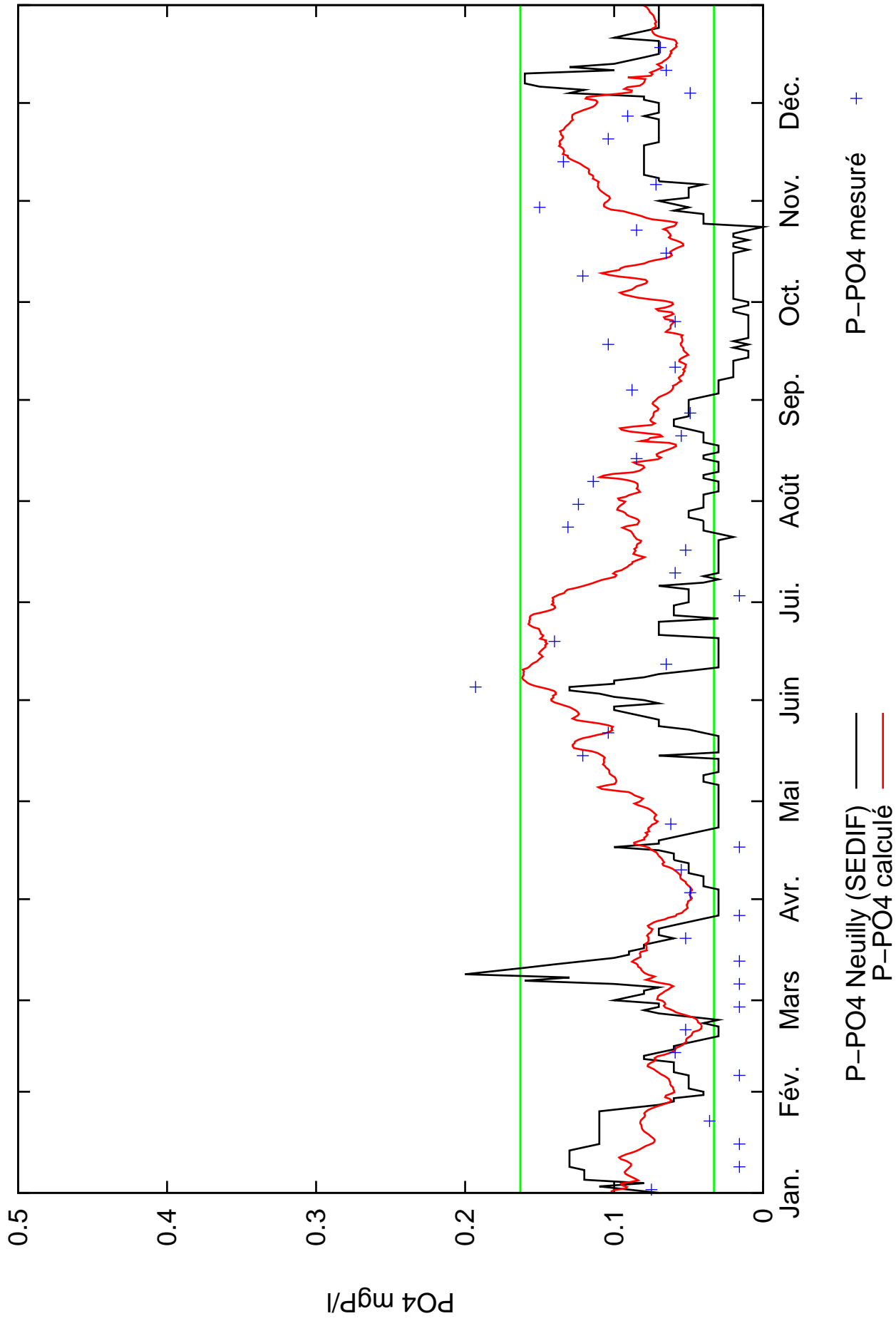


Poses : orthophosphate mesuré et calculé en 2007

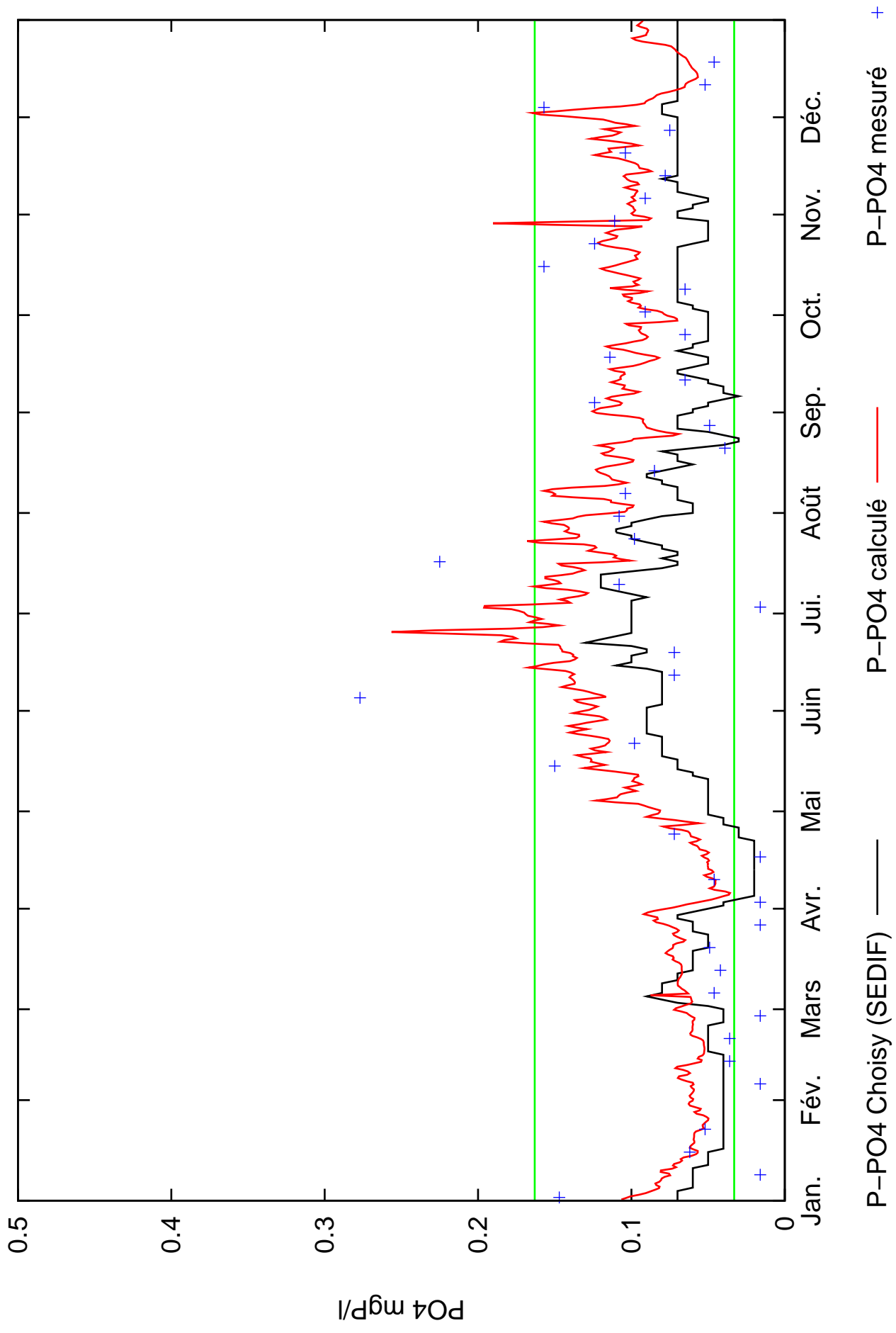


9 Annexe C : Concentrations en orthophosphates mesurées et calculées en 2007, adsorption simulée par une relation de type « SENEQUE » amortie

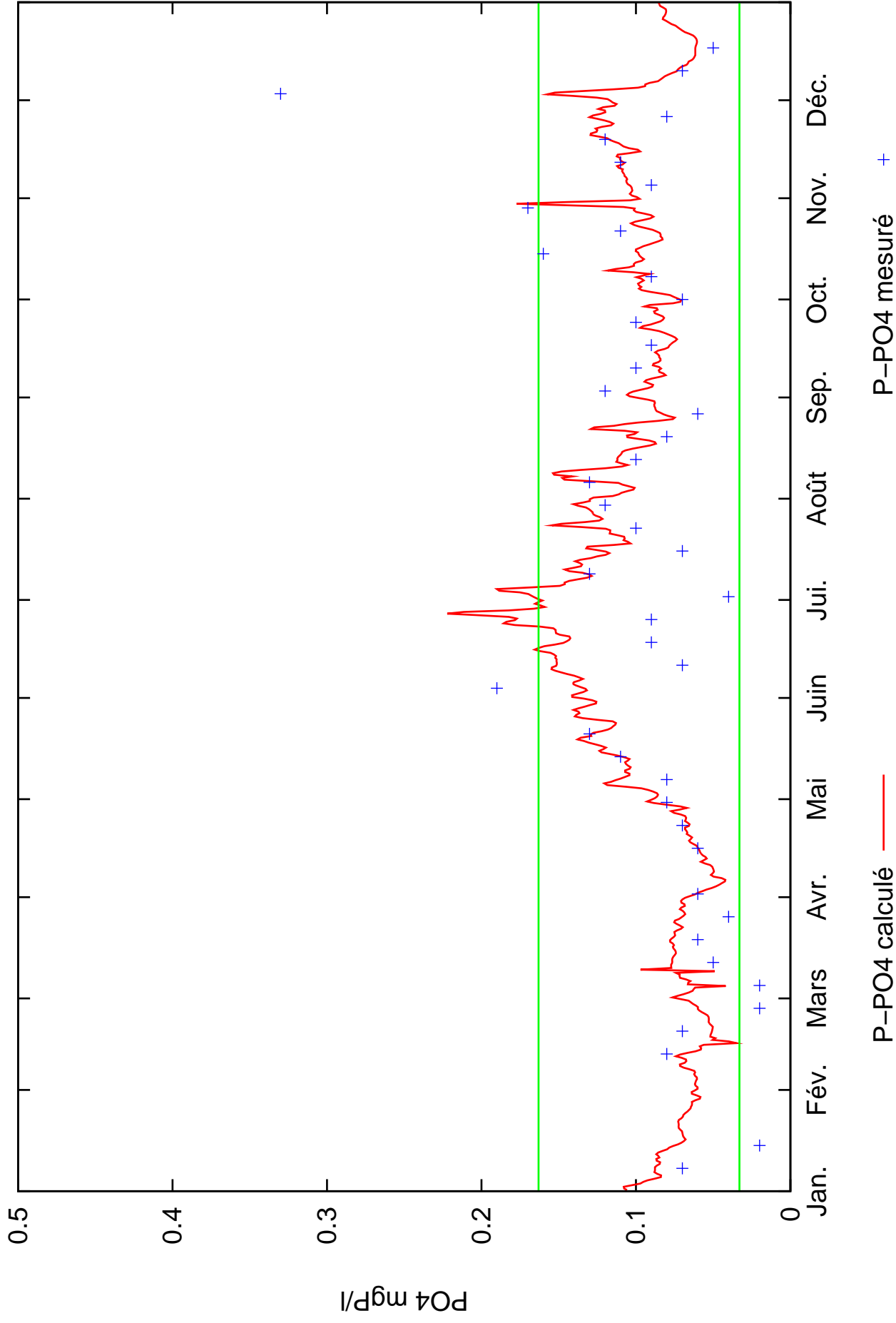
Alfortville (Marne) : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



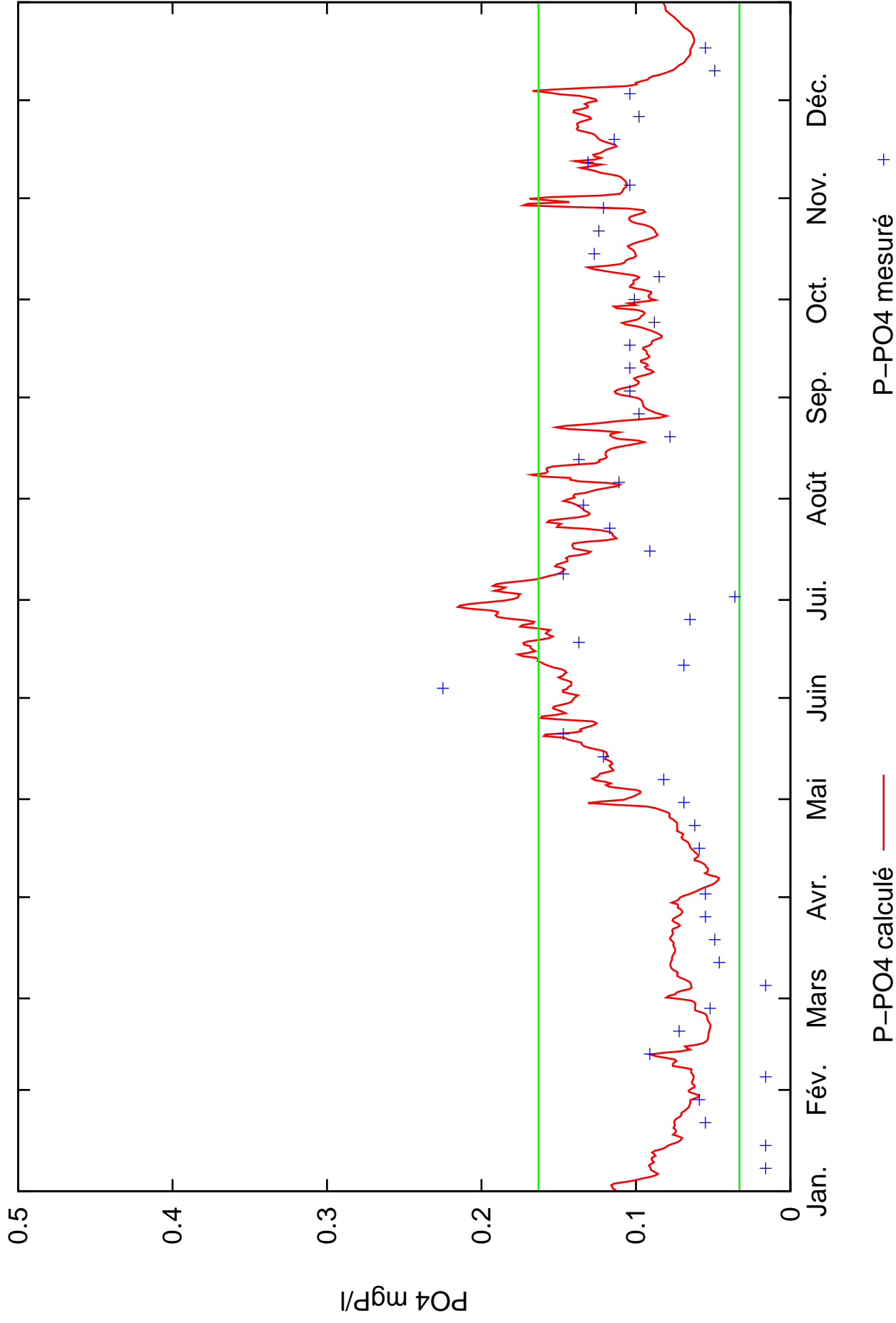
Ivry : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



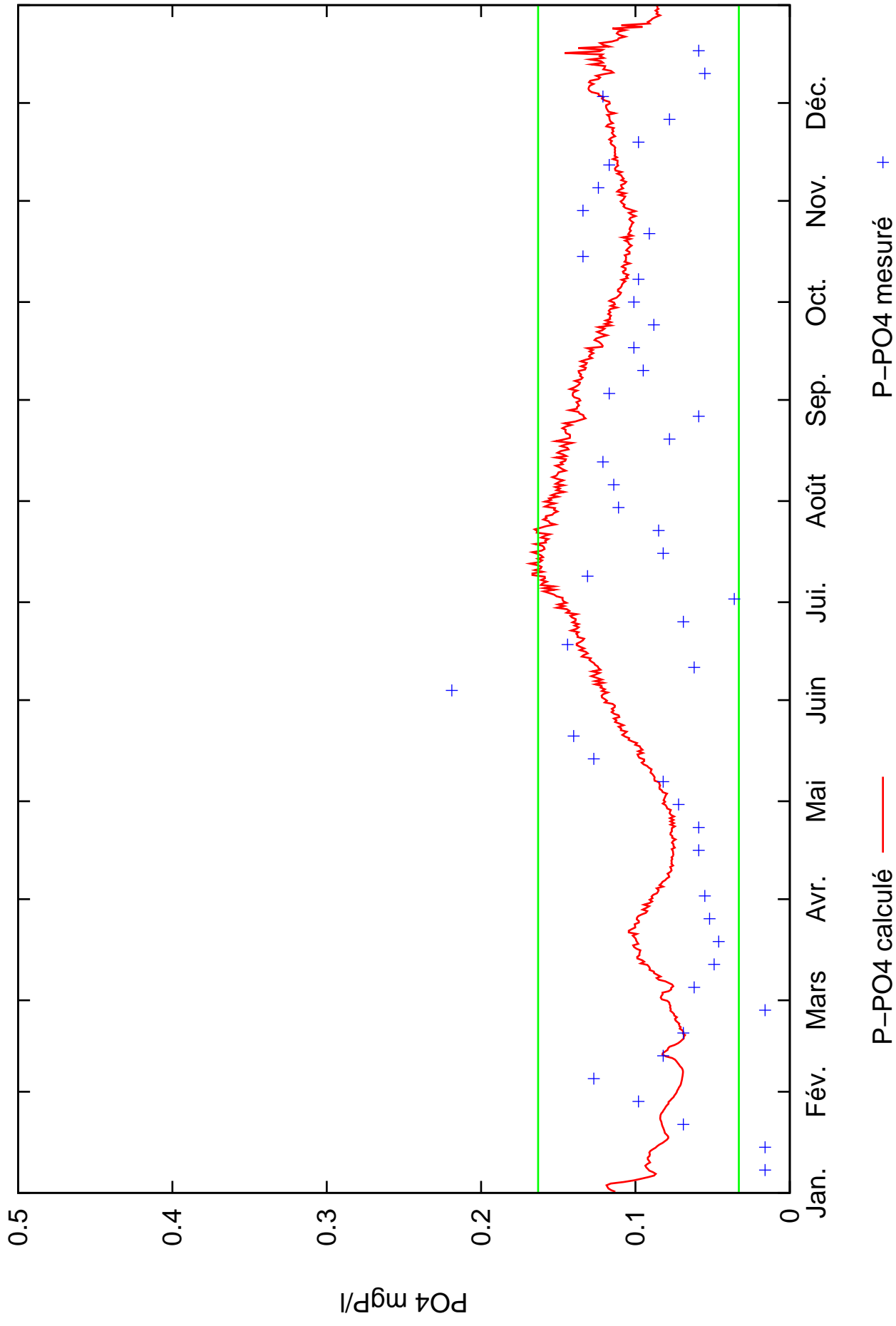
Suresnes : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



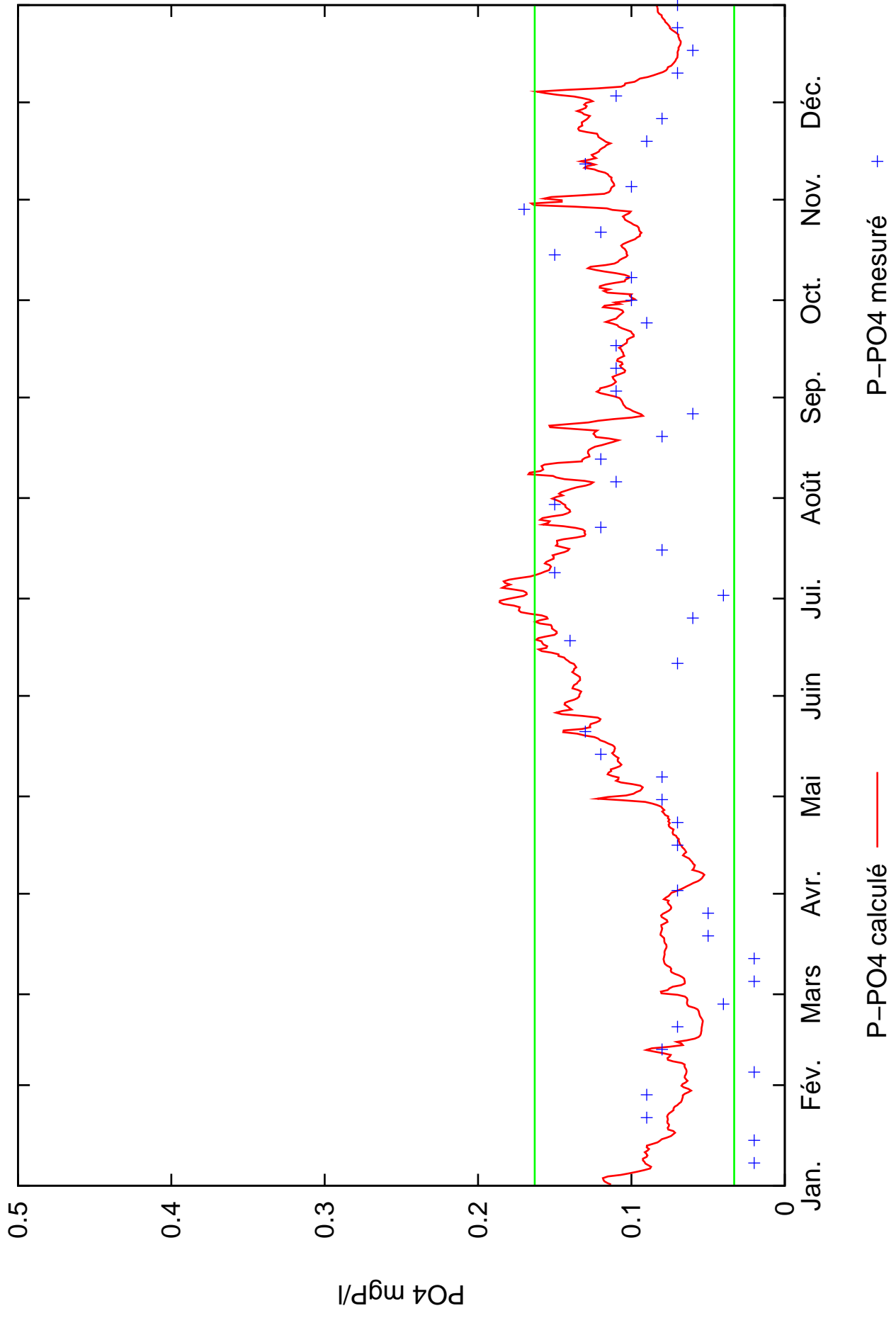
Chatou : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



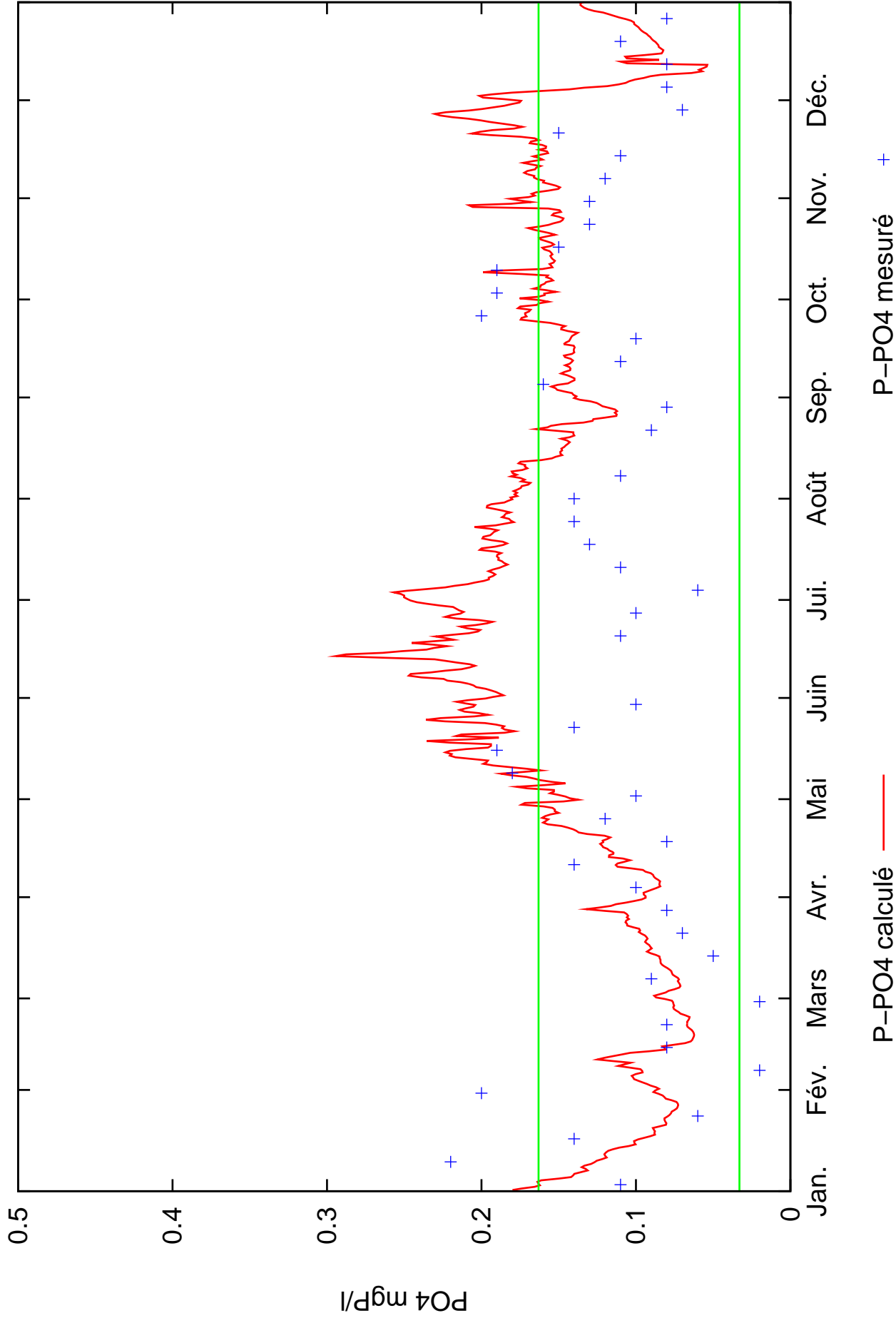
Bougival : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



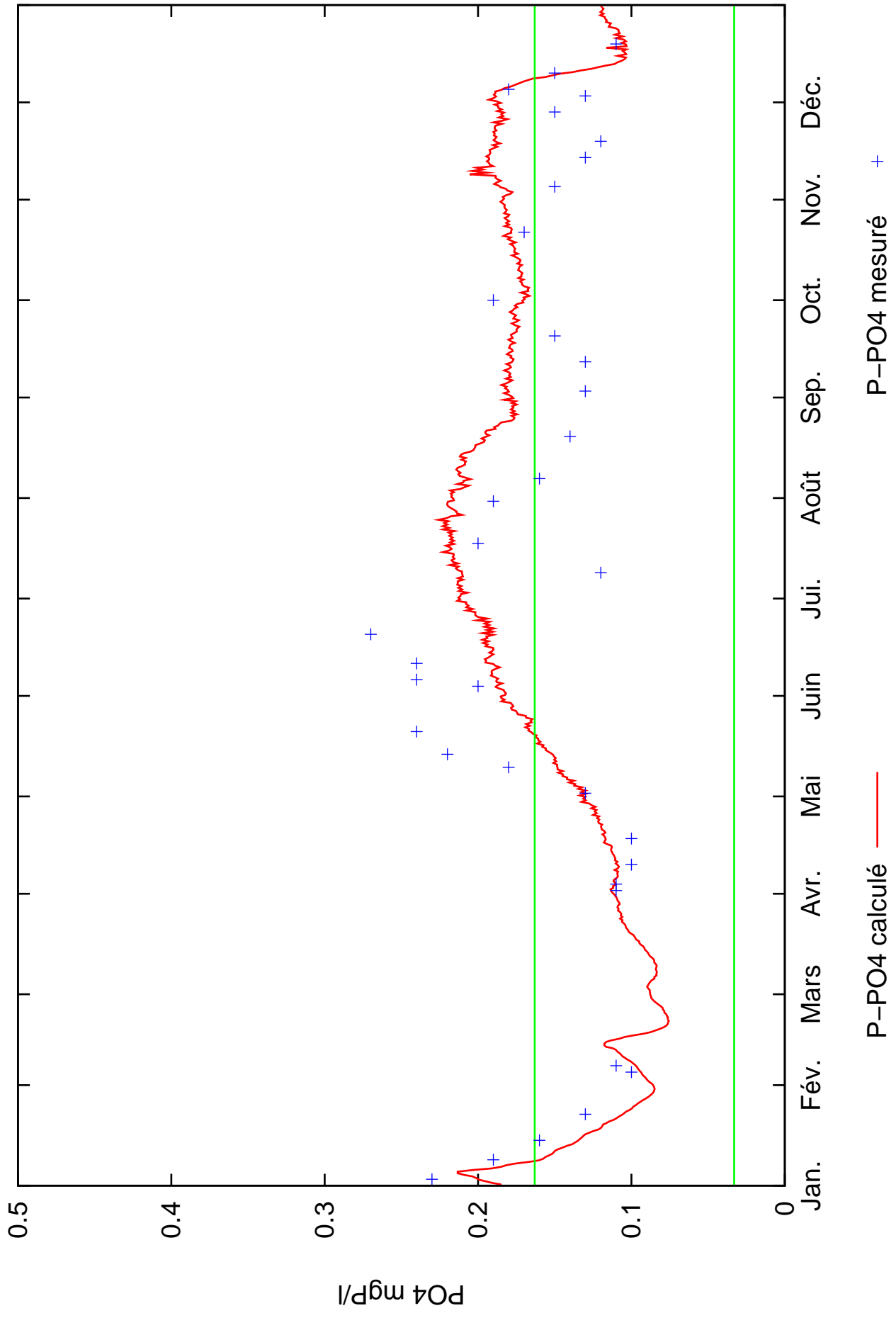
Sartrouville : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



Poissy : orthophosphate mesuré et calculé en 2007

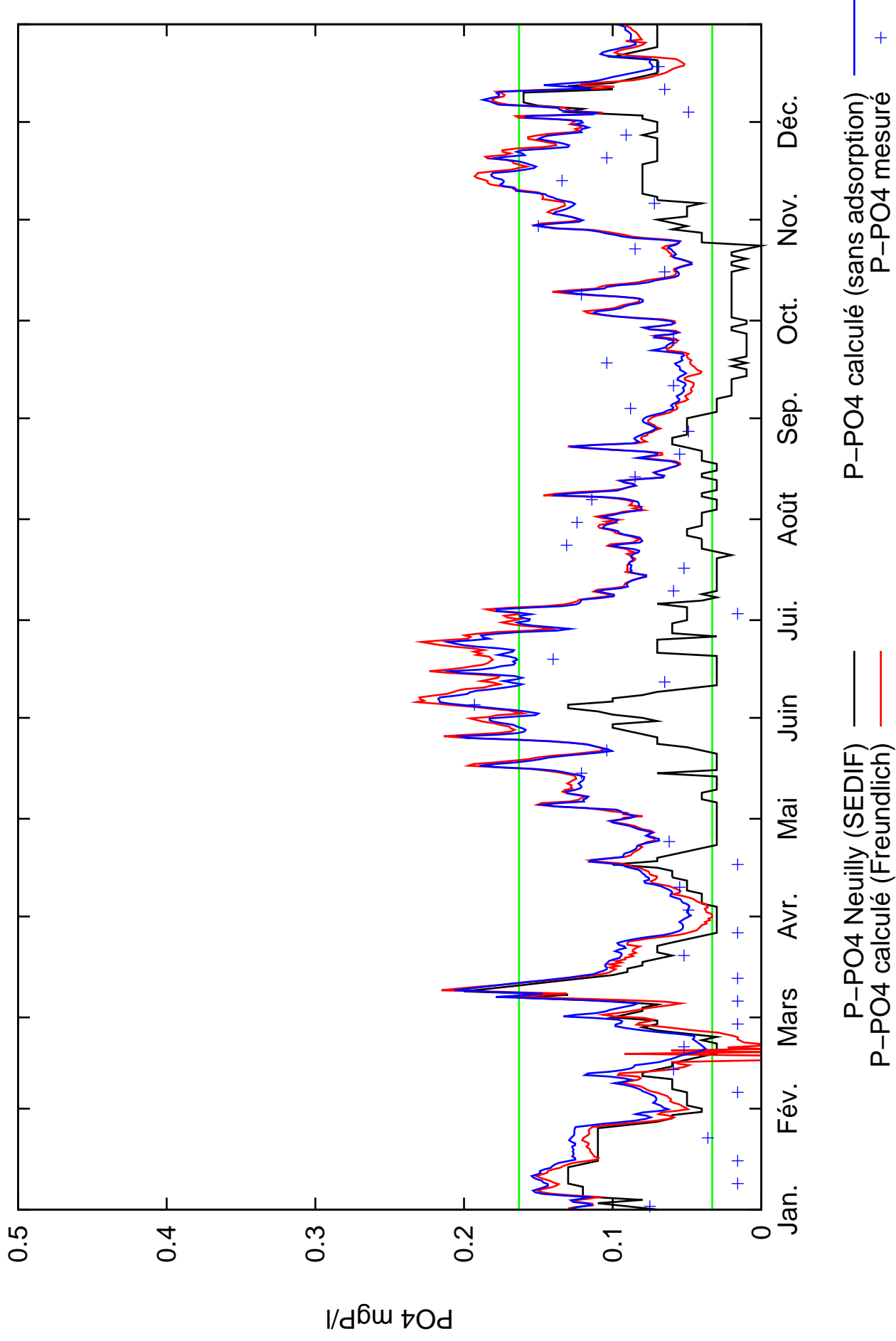


Poses : orthophosphate mesuré et calculé en 2007

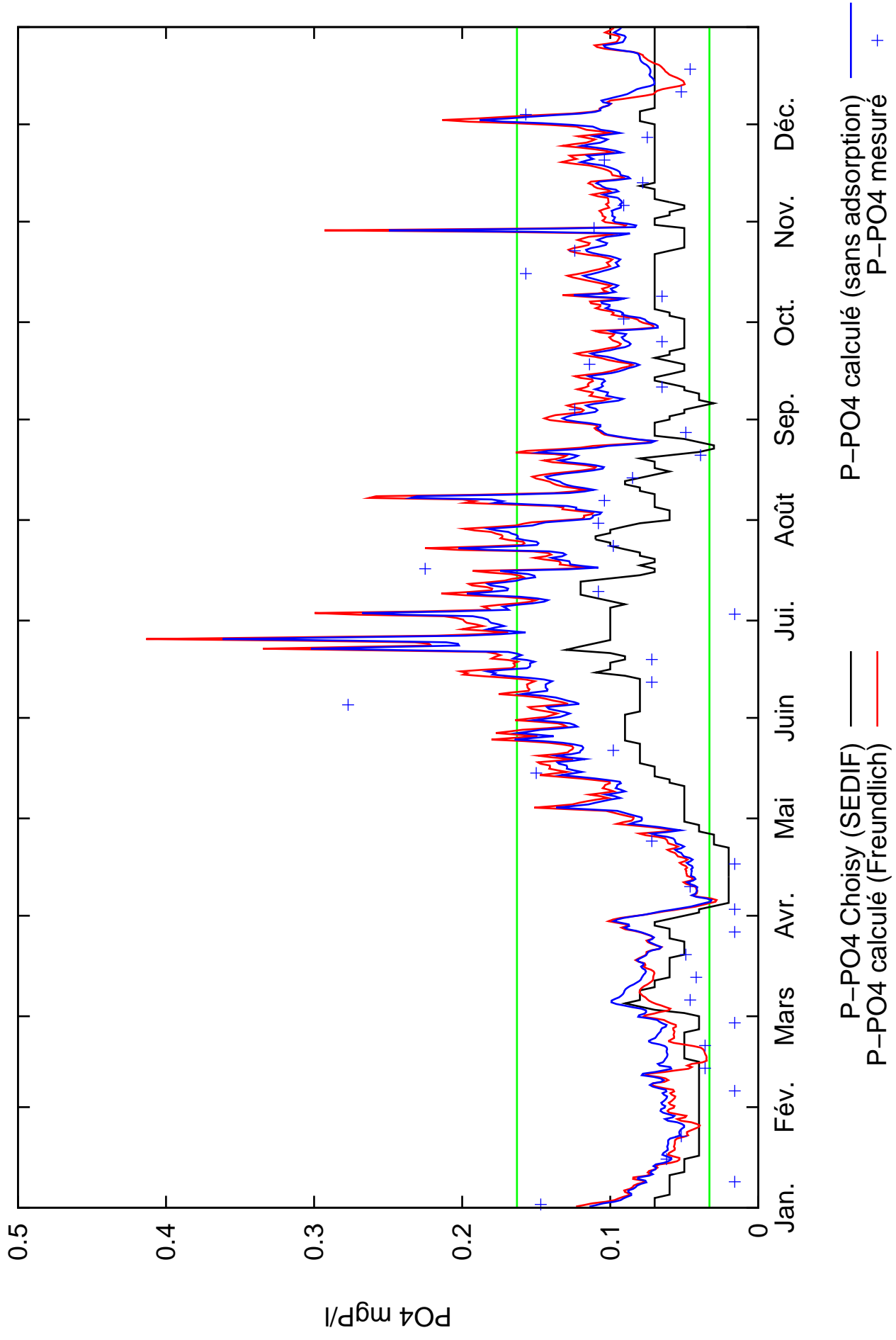


10 Annexe D : Concentrations en orthophosphates mesurées et calculées en 2007, adsorption simulée par une relation de type « Freundlich »

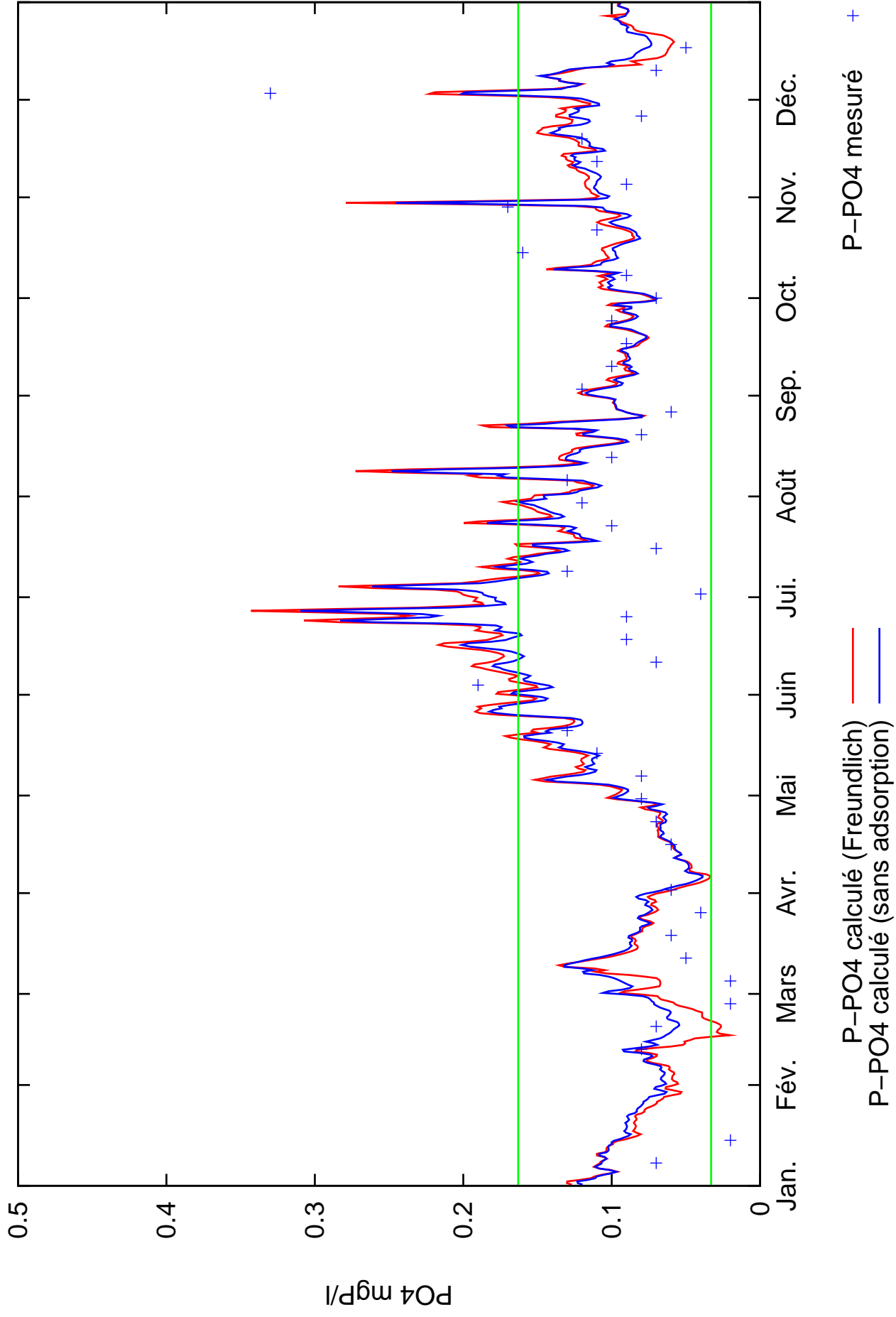
Alfortville (Marne) : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



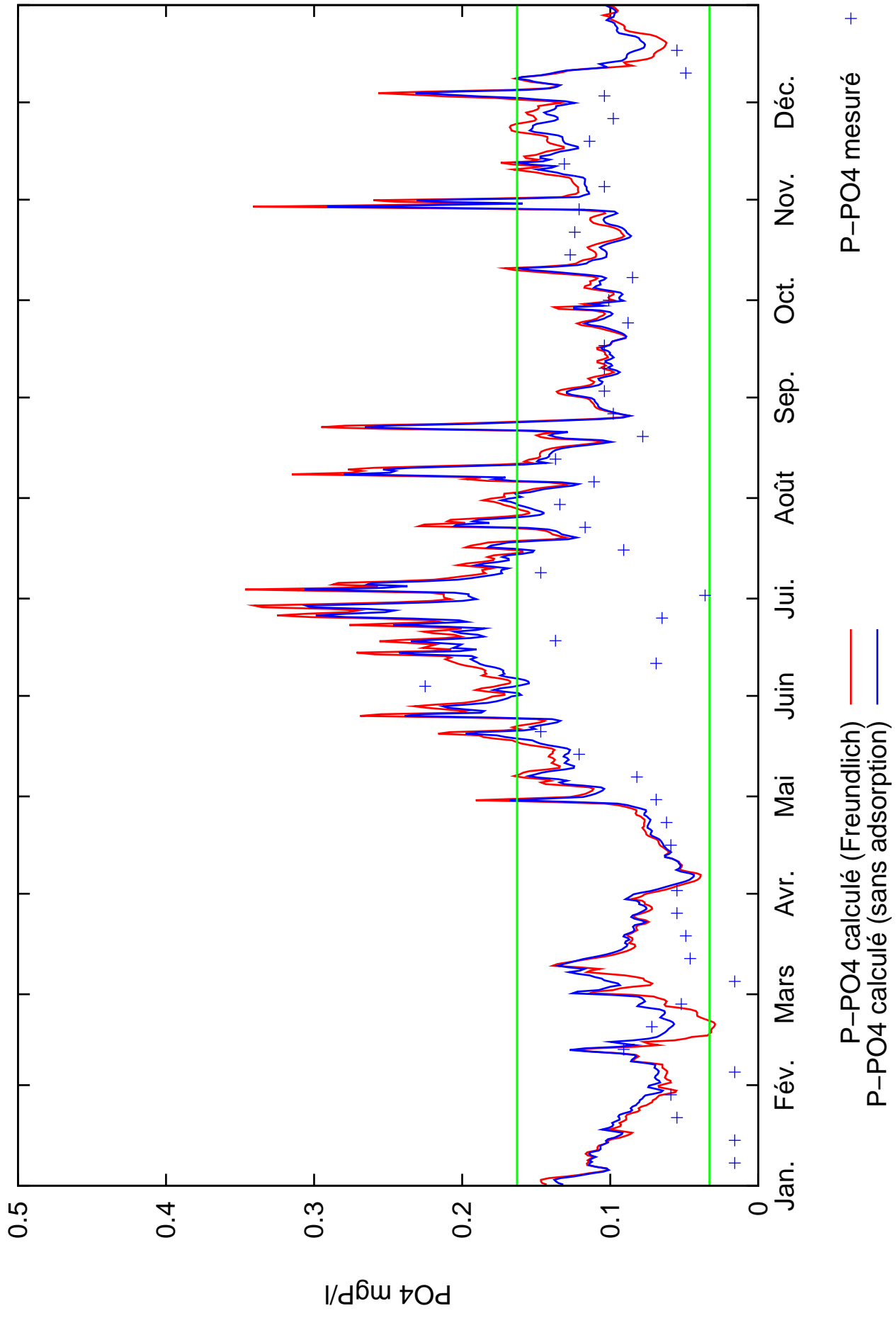
Ivry : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



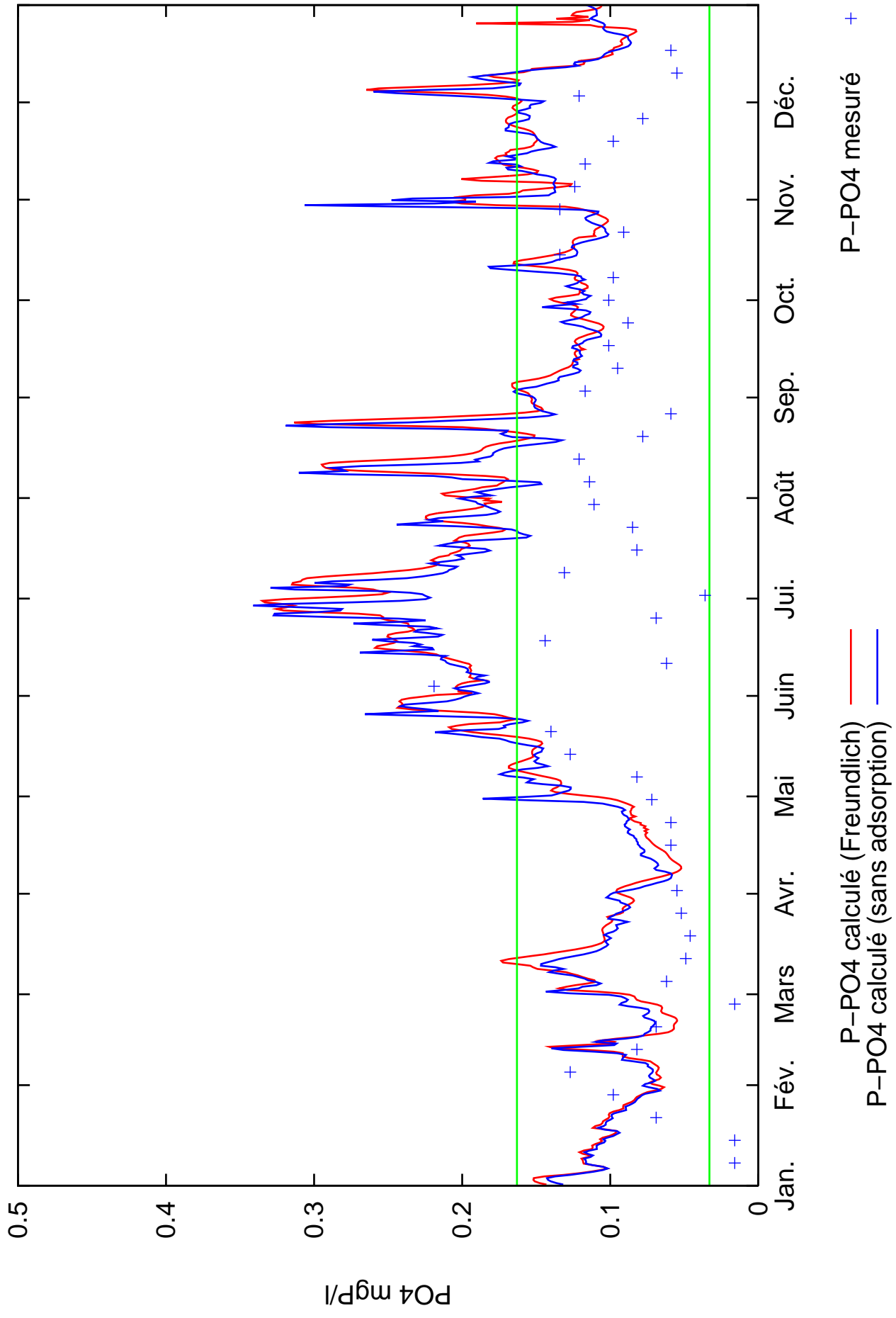
Suresnes : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



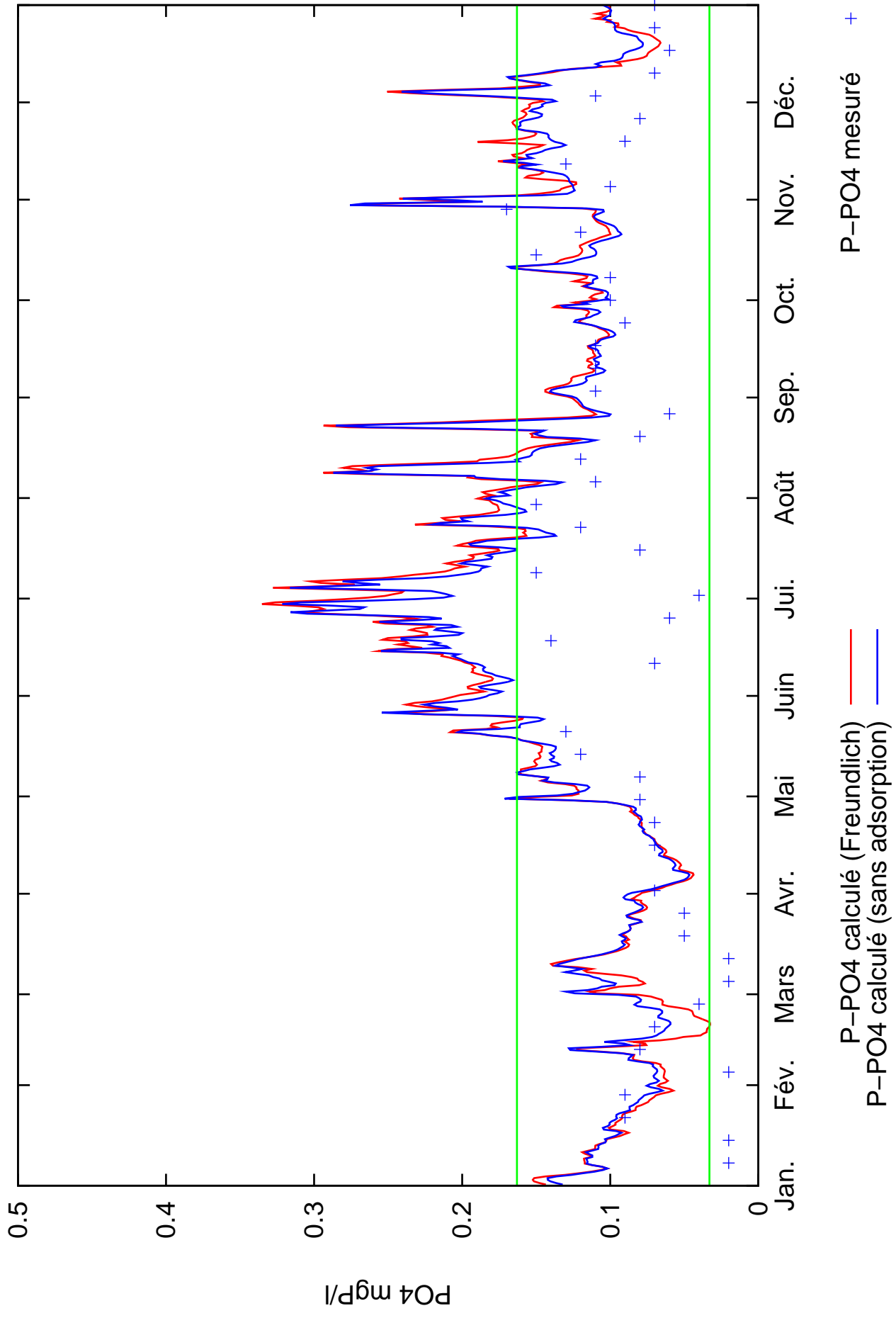
Chatou : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



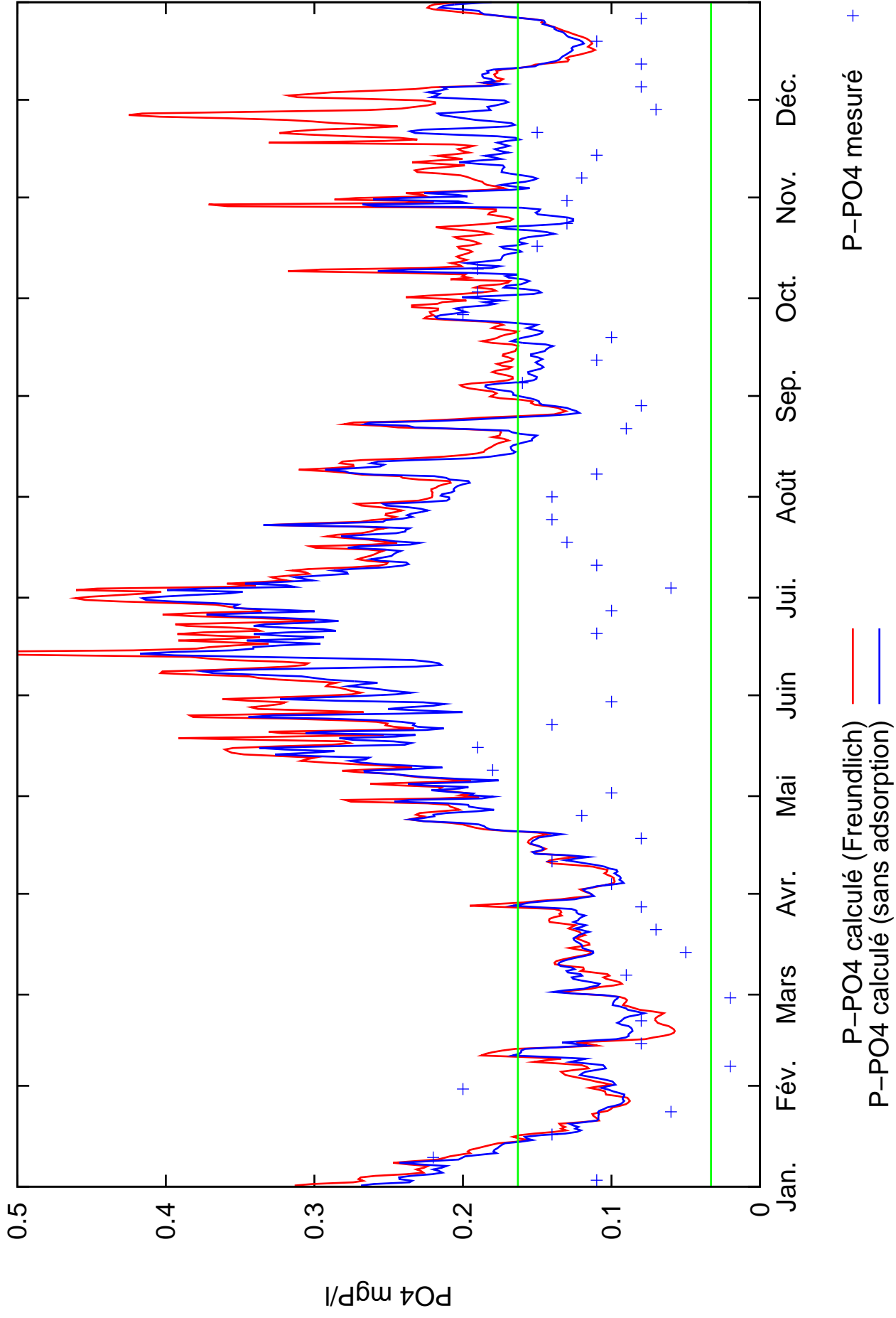
Bougival : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



Sartrouville : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



Poissy : orthophosphate mesuré et calculé en 2007



Poses : orthophosphate mesuré et calculé en 2007

