

4.3.1. Cycle de vie du plomb dans le bassin de la Seine

Laurence Lestel¹, Cécile Goiffon¹, Jean-Marie Mouchel², Richard Julian³ et Youcef Bouzidi³

¹ CDHT-CNAM, 5 rue du Vertbois, 75003 Paris, lestel@cnam.fr

² CEREVER, Champs sur Marne

³ CREIDD, UTT, Troyes

PIREN-Rapport-Lestel-431-2003-03-11.doc

4.3.1. Cycle de vie du plomb dans le bassin de la Seine	1
1. Introduction	1
2. Principes de la modélisation des flux de plomb	1
2.1. Construction du schéma des flux.....	1
2.2. Modélisation :méthodologie.....	5
2.3. Spatialisation des données.....	6
3. Collecte des données nécessaires à la spatialisation du cycle de plomb dans le bassin de la Seine, 1800-2000.....	6
3.1. Rapport de population	7
3.2. Spatialisation des lieux de transformation du plomb.....	7
4. Conclusion.....	8
5. Bibliographie.....	12

1. Introduction

Lors de la traversée de l'agglomération parisienne, la Seine se charge en éléments traces, preuve si besoin en est de l'impact de la ville sur le fleuve. Comprendre l'origine de ces éléments traces implique d'établir le cycle de vie de ces éléments, en prenant en considération l'ensemble des flux les concernant depuis leur entrée dans l'espace géographique considéré par voie d'importation, leur transformation en bien d'usage, leur stockage, jusqu'à leur dispersion dans les différents compartiments environnementaux, air, eau, sol ou biomasse. Faisant suite aux travaux reportés dans les rapports précédents du PIREN Seine (Lestel, 2000 et 2002), ce rapport présente dans une première partie le principe de la modélisation des données que nous avons retenu pour décrire la circulation du plomb dans le bassin de la Seine et son évolution depuis 1885. Au delà de la quantification de ces flux de matières tenant compte du temps long, nous rajouterons une dimension spatiale en considérant, à la suite de Sitigliani (1993) et Baccini (1991), le milieu hydrologique comme espace de mesure où peut être réalisé le lien entre contamination de l'environnement et activité humaine. Nous présenterons les données nécessaires à la spatialisation du modèle à l'échelle du bassin de la Seine en deuxième partie. En conclusion, nous soulignerons les points que nous souhaitons développer, ainsi que les données que nous devons exploiter pour valider le cycle de vie du plomb établi par simulation et extrapolation de données existantes.

2. Principes de la modélisation des flux de plomb

2.1. Construction du schéma des flux

Les données recueillis dans les phases précédentes du PIREN Seine ont été transposées dans une matrice faisant apparaître deux niveaux d'analyses.

Un premier niveau comprenant les échanges de plomb entre quatre processus de base : Transformation, Usages, Environnement et Gestion des déchets, auxquels il faut ajouter les échanges avec l'extérieur des limites du système (Figure 1).

Un deuxième niveau, plus détaillé, correspondant au niveau de collecte des données (Figure 2).

Notre souci étant de limiter le nombre de catégories, tout en gardant un degré de précision suffisant, nous avons regroupé l'ensemble des informations en catégories présentant un même type de profil environnemental. Ce dernier est déterminé d'une part par la forme chimique du plomb, d'autre part par le mode de dispersion du plomb. Ainsi, pour les usages, nous avons distingué le plomb sous sa forme métal du plomb tétraéthyle et des oxydes de plomb, catégorie qui regroupe la plupart des dérivés chimiques du plomb. La catégorie « alliage » a été traitée indépendamment du plomb métal du fait de sa circulation non négligeable sous forme cachée, soudures dans des objets manufacturés par exemple. Dans l'ensemble appelé « environnement » qui est ici le réceptacle des rejets du plomb, nous avons distingué trois types de sols selon des critères de spatialisation. Le « sol » industriel accueille les scories de l'usine et représente un point localisé. Le sol urbain est le réceptacle des canalisations et câbles gainés de plomb enchâssés sous une surface imperméabilisée. Les rejets de plomb seront représentés proportionnellement à la population. Le sol « non anthropisé » accueille le plomb de chasse et celui provenant de l'épuration des eaux. Les rejets y sont considérés de manière homogène sur l'ensemble de la superficie concernée.

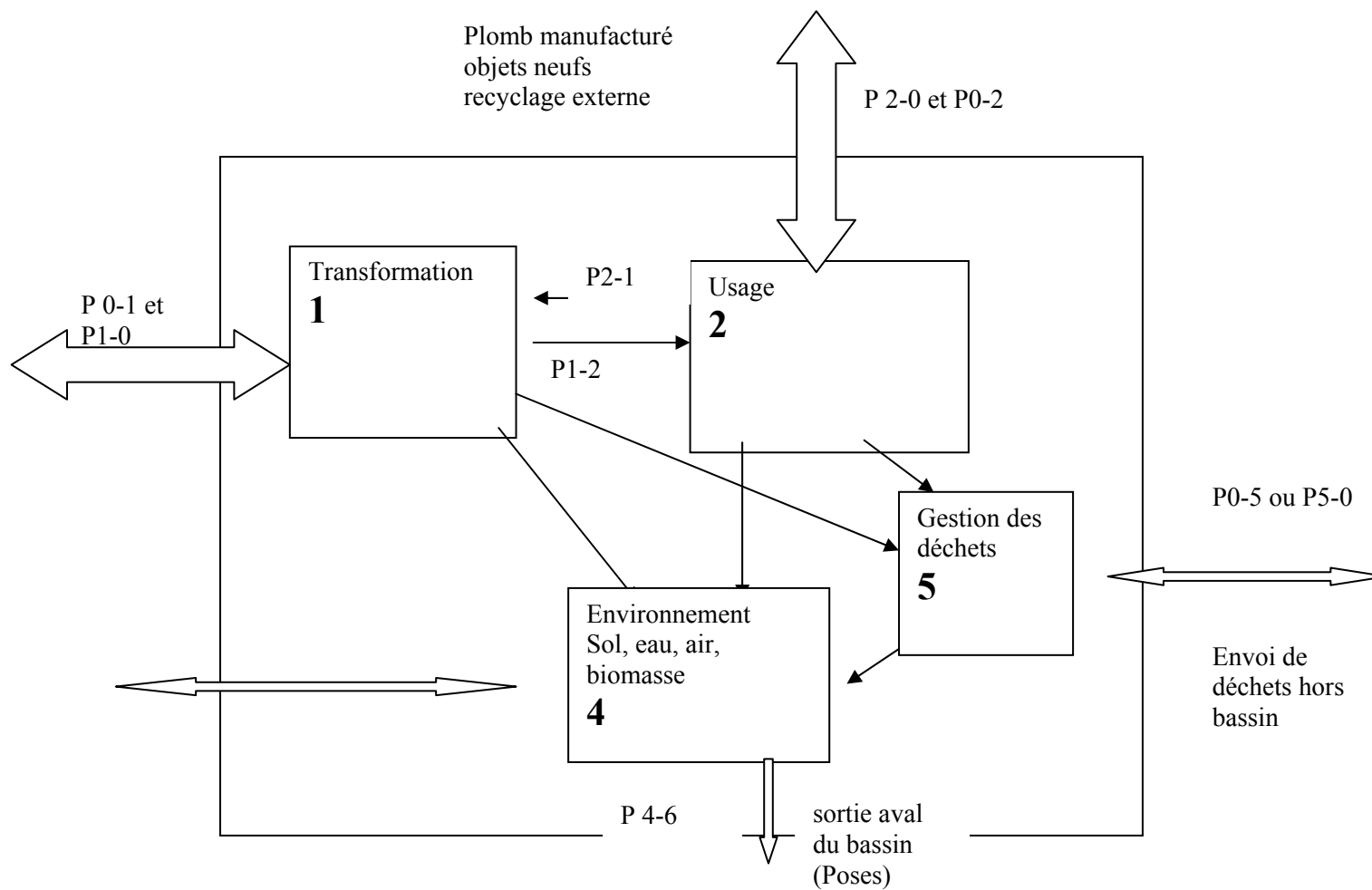


Figure 1: Flux généraux de plomb dans le bassin de la Seine

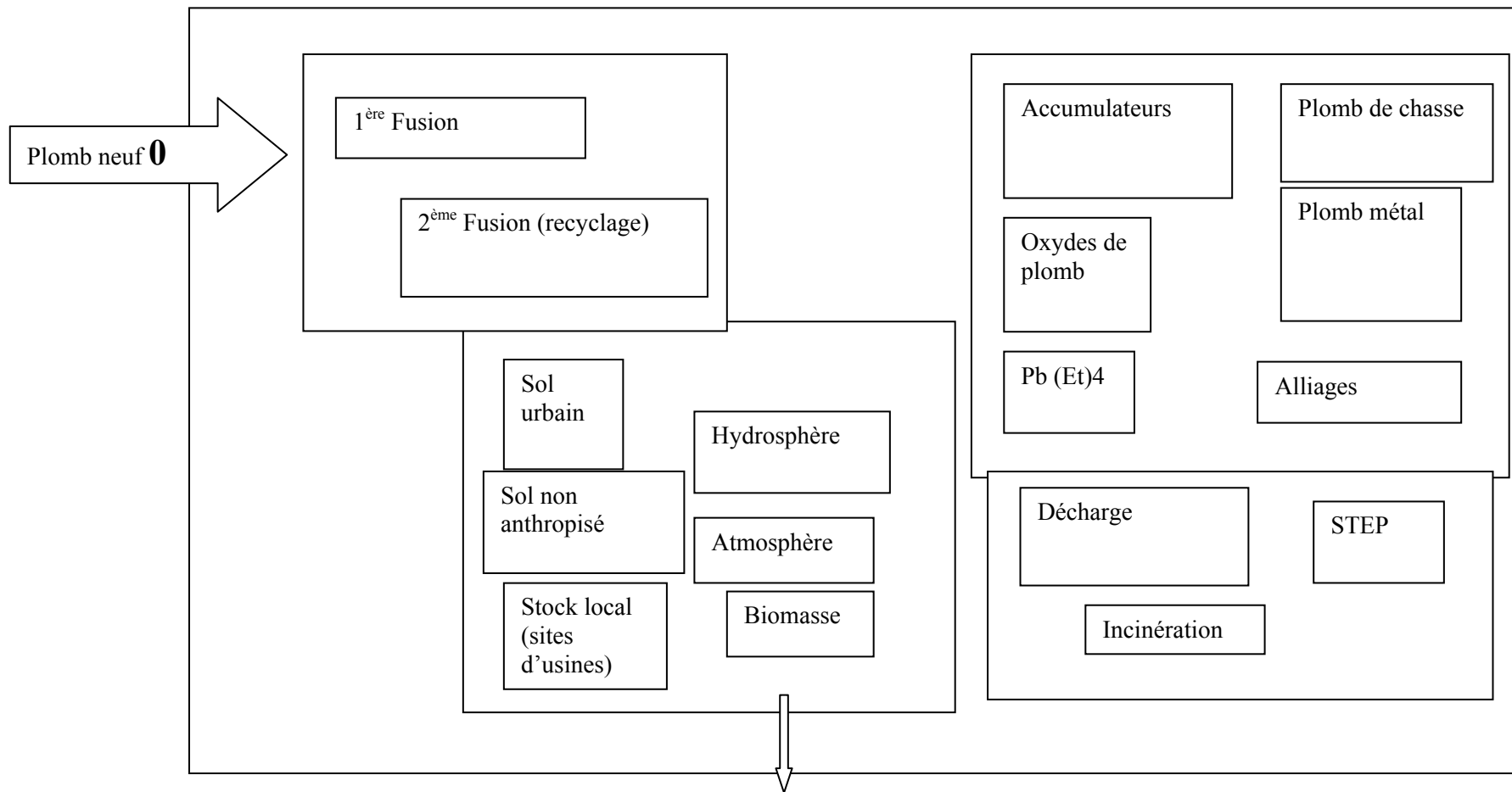


Figure 2 : Ensemble des objets générateurs ou récepteurs de flux de plomb

Des matrices ont été établies pour les années 1885, 1955, 1971 et 1994. Les travaux d'enquête, de consultation d'archives ne permettent de reconstituer qu'une petite partie du puzzle. Certaines données telle que la consommation de Plomb tétraéthyle en France sont disponibles pour presque toutes les années. Pour certaines années, telle 1971, l'existence de bilans statistiques a permis de dresser un schéma assez complet du système. Mais le bilan pluriannuel reste très incomplet, et une méthode doit être mise en oeuvre pour le reconstituer. La disparité des données recueillis rend le travail délicat. En effet, les séries chronologiques longues (même à trous) sont rares. Il est assez fréquent que le mode de collecte des statistiques industrielles ait changé au cours du temps. De même un certain nombre d'usages du Plomb sont apparu alors que d'autres ont disparu. Il n'est donc pas possible de cheminer selon la démarche qui semble a priori la plus naturelle, soit : (i) générer des séries chronologiques complètes pour une certain nombre de variables clés (interpolation et/ou extrapolation) puis (ii) appliquer pour chaque année la même algorithme (complexe) pour reconstituer les données manquantes moyennant quelques hypothèses complémentaires. Nous sommes donc amenés à proposer une méthode globale, qui aura l'avantage de valider la cohérence globale sur le long terme de l'ensemble ; en effet, nous n'avons aucune preuve a priori que le jeu des données collectées ne contient pas d'incohérence interne (par exemple génération de stocks négatifs à partir d'une certaine date).

2.2. Modélisation : méthodologie

On considère un certain nombre de stocks qui sont soit des stocks de process (première fusion, deuxième fusion, fabrication de produits manufacturés à partir d'oxydes de plomb...), des stocks d'usage (produits manufacturés en cours d'utilisation, les canalisation en plomb des bâtiments...), des stocks milieux (sites/sols industriels, sol naturel, milieu urbain...). On considère également tous les flux annuels entre ces stocks. Soient $S_{i,k}$ le stock de i à l'année k et $F_{i,j,k}$ le flux de i vers j durant l'année k . $F_{0,j,k}$ et $F_{j,0,k}$ sont les flux d'import-export concernant le stock j pour l'année k . Les variables inconnues sont les flux puisque tous les stocks peuvent être reconstitués à partir des valeurs initiales des stocks et du cumul des flux annuels.

$$S_{i,k+1} - S_{i,k} - \sum_j (F_{j,i,k} - F_{i,j,k}) = 0$$

Le principe de la méthode proposée consiste à considérer au départ tous les flux comme des variables inconnues puis d'appliquer un certain nombre de contraintes pour aboutir à un jeu optimal de ces variables (optimal au sens de la minimisation globale de l'ensemble des contraintes). Ainsi, toutes les contraintes ne seront pas nécessairement vérifiées exactement.

Les contraintes à appliquer sont de différent types, certaines sont des évidences, d'autres sont des retranscription de connaissances sur les processus, d'autres sont des contraintes techniques destinées à favoriser la convergence :

Type 1 : Certains flux sont exactement nuls

$$F_{i,j,k} = 0$$

Type 2 : La variation interannuelle d'un flux est la plus faible possible (i.e. les technologies et les quantités dans un process ne peuvent pas évoluer instantanément)

$$F_{i,j,k+1} - F_{i,j,k} = \varepsilon$$

Type 3 : Certains stocks (les stocks de process) restent toujours sensiblement nuls

$$S_{i,k} = \varepsilon$$

Type 4 : Certains flux (ou sommes de flux) sont connus

$$\sum_{(i,j) \in C} F_{i,j,k} - SF^*_{i,j,k} = 0, \text{ où } SF^*_{i,j,k} \text{ est une donnée}$$

Type 5 : Certains stocks sont connus

$$S_{i,k} - S^*_{i,k} = 0, \text{ où } S^*_{i,k} \text{ est une donnée}$$

Type 6 : Certains flux (type fuite) sont liés à un process (i)

$$F_{i,l,k} - \lambda \times \sum F_{j,i,k} = 0$$

Type 7 : Certains flux (type fuite) sont liés à un stock

$$F_{i,j,k} - \mu \times S_{i,k} = 0$$

Les coefficients λ et μ peuvent évidemment évoluer dans le temps, ils dépendent des technologies, des modes de vie, mais des valeurs doivent être proposées.

Toutes les équations seront considérées comme des contraintes, c'est à dire que tout les termes de type $G = 0$ listés ci-dessus seront remplacés par des termes $G^2 = 0$, qui seront cumulés (avec un poids p_G a priori différent pour chacun) au sein d'une grande fonction coût (Γ) à minimiser.

Enfin, on doit ajouter une contrainte technique, munie d'un poids faible, pour lever des indéterminations de type réciproque ou circulaire sur les flux. Cette contrainte technique dit simplement que les flux sont petits. L'application de cette contrainte fera que les flux réciproques, ($F_{i,j}$ et $F_{j,i}$) forcément indéterminés, qui n'interviennent que par leur différence, convergeront vers une situation où l'un des deux flux est nuls.

Enfin, le minimum de la fonction coût sera recherché sous une contrainte de flux positifs.

Cette méthodologie de construction d'images de la circulation du Pb dans le bassin sera utilisée de façon itérative avec les experts, en modifiant éventuellement des contraintes ou des poids jusqu'à aboutir à une image satisfaisante et cohérente.

2.3. Spatialisation des données

Le terrain de cette étude est le bassin de la Seine qui inclut totalement ou partiellement 25 départements administratifs. Les statistiques disponibles et les archives consultées ne permettant pas d'obtenir des données à cette échelle, nous avons décidé de collecter les informations soit au niveau national (statistiques, ...) soit à l'échelle de la commune (industrialisation, population,...). Pour présenter des sous-ensemble cohérents, nous avons adopté le découpage du bassin de la Seine en 29 sous-bassins, proposé par le PIREN Seine, ramené à 27 si l'on exclut les deux sous-bassins en aval de Poses, que nous avons pris comme limite de cette étude. C'est donc à l'échelle de chacun de ces sous-bassins que seront établies 27 matrices de flux de plomb. Par convention, les flux entre ces sous-bassins seront considérés comme globalement nuls, les entrées et sorties étant gérées au niveau supérieur de l'ensemble du Bassin. Par contre les sorties spécifiques vers le milieu Seine seront spatialisées à l'échelle de chaque sous-bassin. Nous pourrons ainsi confronter la simulation avec les valeurs expérimentales recueillies à la sortie de chaque sous-bassin (données AESN ou Piren Seine).

3. Collecte des données nécessaires à la spatialisation du cycle de plomb dans le bassin de la Seine, 1800-2000.

Les données à l'échelle de la France sont transposables à l'échelle de chaque bassin en établissant pour l'ensemble de la période considérée deux facteurs :

- la fraction de la population F_p
- l'importance relative de l'industrialisation F_i

Nous considérerons en effet, en première approximation, que les flux de plomb relatifs aux usages sont proportionnels à la population, par exemple :

- nombre d'accumulateurs lié au nombre de voitures
- Pb(tétraéthyle) proportionnel à la circulation automobile
- Oxyde de plomb des verres spéciaux (comme les tubes cathodiques) proportionnel au nombre de téléviseurs, ...

La circulation du plomb dans les lieux de transformation est proportionnelle à l'importance industrielle de la région. Historiquement, il faut donc tenir compte de la très forte industrialisation de Paris, puis de sa banlieue, avant la période de désindustrialisation de la proche-couronne dans les années 1970.

Un panachage des deux facteurs s'avère indispensable dès que l'on doit définir les entrées et sorties de plomb à l'échelle de chaque bassin, par exemple :

- pour le recyclage des batteries, fonction de la population, mais aussi de la capacité de recyclage des usines de 2^{ème} fusion de la région considérée.
- pour évaluer les flux de munitions entre les sociétés productrices et les lieux de consommation.

3.1. Rapport de population

Il a été documenté entre 1806 et 1999 (Motte et al., 2002).

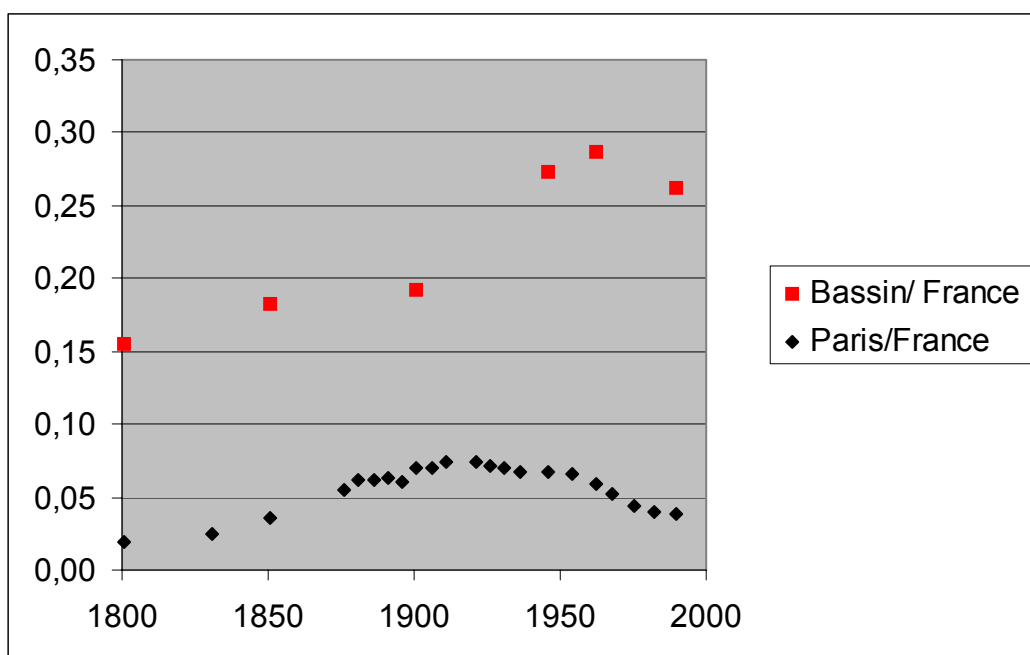


Figure 3: Rapport de population entre Paris, le Bassin de la Seine et la France

3.2. Spatialisation des lieux de transformation du plomb

Nous avons établi une liste des lieux de transformation du plomb :

Métallurgie des métaux non-ferreux

- Fonderies de plomb
- Fabrique et recyclage des accumulateurs
- Fabriques de câbles

Industrie chimique

Fabrication de la cêruse pour le XIXe siècle, du minium, d'autres dérivés comme les acétates, chromates, le plomb tétraéthyle, etc. Pour ce dernier il convient de s'intéresser également aux raffineries et aux entreprises de conditionnement des produits pétroliers.

Cristallerie et fabriques de verres spéciaux.

Pour chacun de ces métiers, nous réalisons des inventaires sur l'ensemble du bassin qui nous a permis d'établir une première carte des communes ayant hébergé 345 usines rejetant du plomb entre 1875 et 2000. Outre Paris et la région parisienne, cette carte montre une concentration importante de ces communes le long de la Seine ainsi qu'un nombre conséquent d'usines dans les départements de l'Oise et de la Haute-Marne (Figure 4). Ces inventaires seront prochainement complétés par une campagne dans les archives départementales de l'Oise, des Yvelines de la Seine-et-Marne et de l'Essonne courant février 2003.

Ces activités industrielles sont une cause importante des rejets de plomb vers l'hydrosphère. Pour soutenir ce point de vue, nous avons représenté par Système d'Information Géographique les données de qualités de l'eau enregistrées par l'AESN depuis 1976, en ne prenant en compte que les valeurs mesurées sur sédiments (AESN, 2002, Meybeck, 2002). Le bassin a été découpé en 27 sous-bassins s'arrêtant à Poses, que nous avons pris comme limite aval de notre étude. Les cartes les plus intéressantes sont celles couvrant les périodes 1981-1985 et 1991-2000 (Figure 5 et Figure 6). De 1976 à 1980, il n'existe que très peu de valeurs de plomb sur sédiments (rappelons que les premières analyses systématiques des métaux en rivière réalisées pour par l'inventaire national de pollution démarrent en 1976). Pour la période 1986-1991, les analyses ne couvrent pas l'ensemble du bassin, celles qui existent étant plutôt regroupées à l'Ouest du Bassin, délaissant des zones pourtant non exemptes de pollution dans les années qui précèdent, comme la Haute-Marne par exemple. Est-ce lié à une diminution du nombre de points de mesures ou à la constatation d'une amélioration (transitoire) de la qualité de l'eau du réseau dans sa partie Est, ne demandant alors plus autant de surveillance ?

La comparaison des deux cartes 1981-1985 et 1991-2000 avec la carte des implantations industrielles indique une corrélation nette entre le développement de l'activité industrielle et la concentration en plomb relevée en rivière. Il ne faut pas négliger cependant l

- les retombées atmosphériques liées à l'usage du plomb tétraéthyle,
- les rejets hydriques par lixiviation à partir des décharges ou des stocks de plomb urbain

4. Conclusion

Comprendre le cycle de vie du plomb dans le bassin de la Seine nécessite de faire des choix spécifiques à l'étendue spatiale et temporelle de cette étude. Contrairement aux études classiques de cycle de vie établi à l'échelle d'une usine, voire d'une ville, il nous faut ici tenir compte de la dispersion à plus ou moins longue distance du plomb. De plus, prendre en compte les rejets du plomb urbain nous impose de remonter dans le temps pour déterminer l'importance de ces stocks. Les données actuellement à notre disposition ont permis d'établir un schéma de simulation des flux de plomb à l'échelle du bassin. Mais valider ce modèle nécessite de le comparer à des valeurs expérimentales, les plus nombreuses et les plus dispersées (dans le temps et dans l'espace) possibles. C'est ce travail de validation que nous nous proposons de mener cette année 2003.

Communes hébergeant des usines (1875-2000)
rejetant du plomb dans le Bassin de la Seine

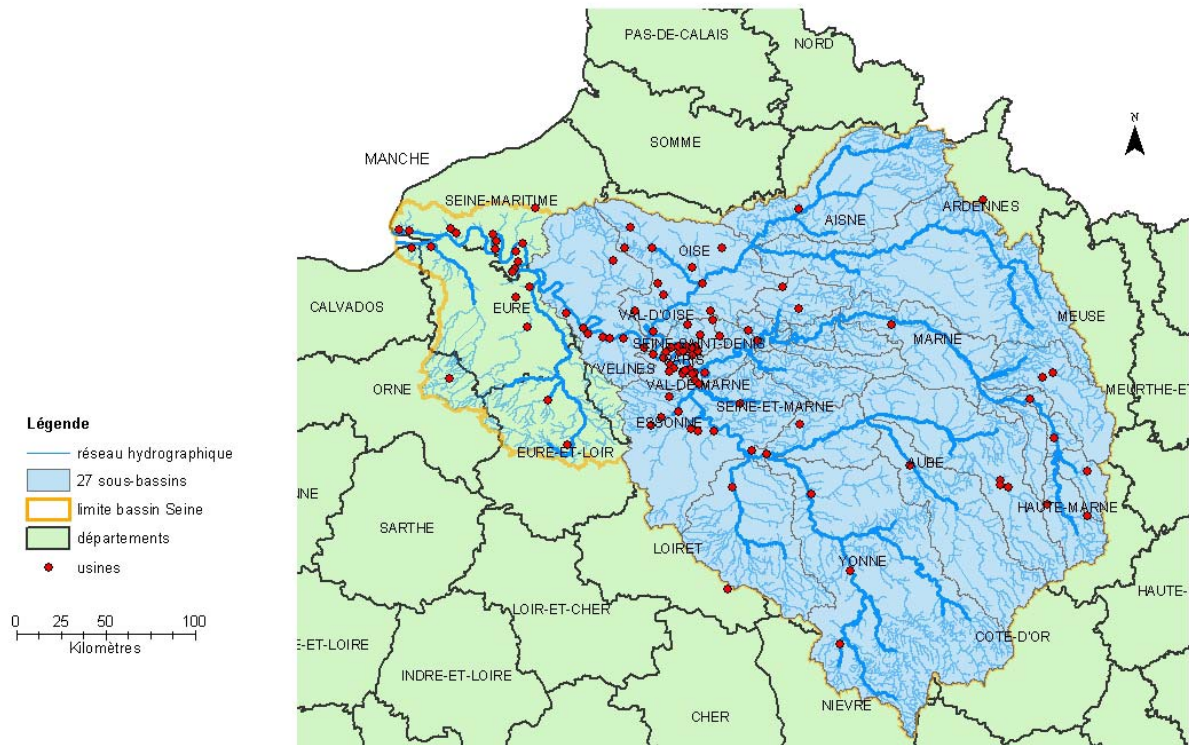


Figure 4: Communes hébergeant des établissements industriels rejetant du plomb (1875-2000)

Mesures du Plomb sur des sédiments de 1981 à 1985
dans le bassin de la Seine
sur une division de 27 sous-bassins versants

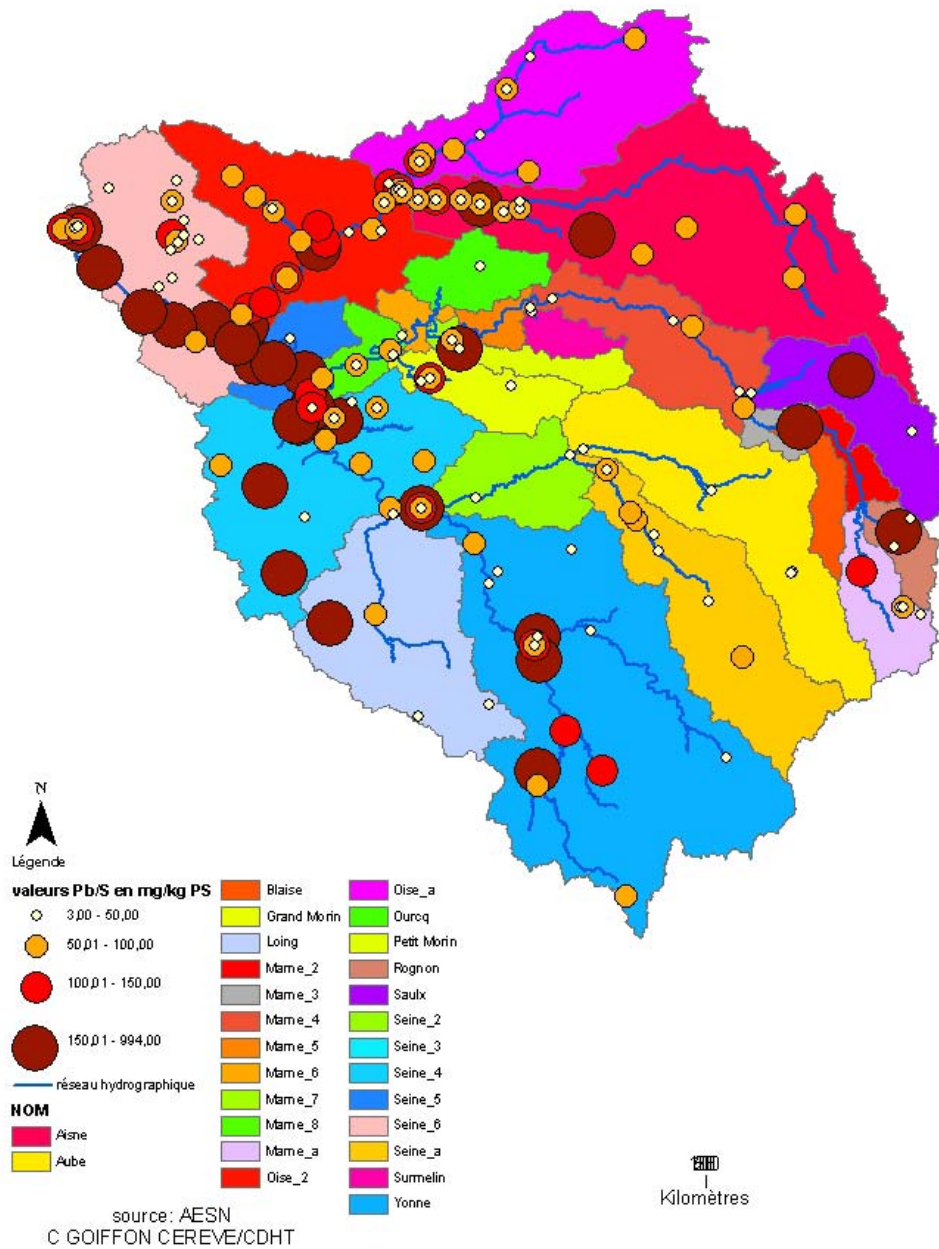


Figure 5: Mesures de plomb sur sédiments selon des données AESN (1981-85)

Mesures du Plomb sur des sédiments de 1991 à 2000
dans le bassin de la Seine
sur une division de 27 sous-bassins versants

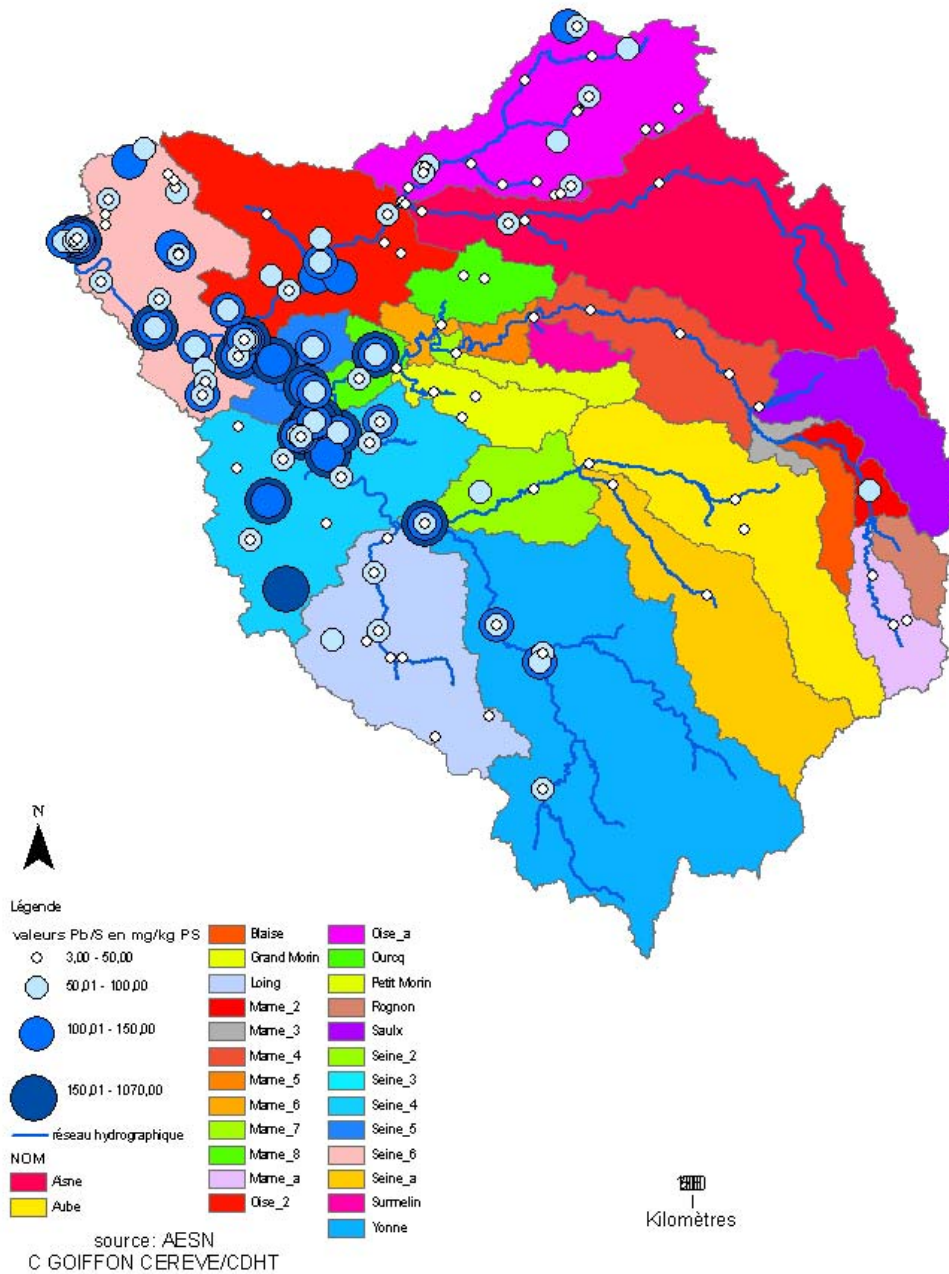


Figure 6: Mesure de plomb sur sédiments selon des données AESN (1991-2000)

5. Bibliographie

- AESN (2002). Base de donnée fournie par Jérôme BELLIARD que nous remercions.
- Baccini P. et Brunner (1991). *Metabolism of the anthroposphere*, Springer Verlag.
- Lestel L. (2000). Les cycles du plomb en France, 1818-1996. *Rapport PIREN Seine 2000*. pp. A43-A-52.
- Lestel L. et Meybeck. M. (2002), Cycle des métaux et métabolisme industriel. *Métaux lourds : des bilans en mutation*, Rapport PIREN Seine, fév. 2002. pp.55-59.
- Meybeck M. Horowitz A., Grosbois C., Ficht A., Cun C., Beaupère F., Saadoum M., Quenea K. Evolution de la contamination métallique du bassin médian et aval de la Seine (1980-2000). *Rapport Piren Seine 2000*, pp.A.53-A.73.
- Motte C., Brunstein D., Théry S. (2002). Evolution démographique du bassin de la Seine. *Analyse rétrospective du système Seine*, Rapport PIREN Seine, fév. 2002. pp.8-9.
- Stigliani W.M., Jaffe P. R. (1993). *Industrial metabolism and river basin studies: a new approach for the analysis of chemical pollution*. Princeton University, International Institute for Applied Systems Analysis, 45p.