

Bilans et flux de polluants organiques dans le bassin de la Seine

Cyrielle Briand¹, David Gateuille¹, Johnny Gasperi^{1*}, Elodie Moreau-Guigon², Fabrice Alliot², Marc Chevreuil², Martine Blanchard², Marie-Jeanne Teil², Jean-Marc Brignon³, Pierre Labadie⁴, H el ene Budzinski⁴, Vincent Rocher⁵, Sam Azimi⁵, Daniel Thevenot¹, R egis Moilleron¹, Michel Meybeck², Jean-Marie Mouchel^{2*}

¹ LEESU, Université Paris Est-Créteil, Créteil, France

² METIS, Université Pierre and Marie Curie, Paris

³ INERIS, Verneuil en Halatte, France

⁴ EPOC, Bordeaux, France

⁵ SIAAP, Paris, France

* gasperi@u-pec.fr, jean-marie.mouchel@upmc.fr

Résumé

De nombreuses études sur le bassin de la Seine visent à quantifier plusieurs familles de polluants dans les différents compartiments environnementaux et urbains. Parmi les familles les plus étudiées figurent les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), principalement émis durant la combustion des matières organiques comme le chauffage domestique et le trafic routier, les polychlorobiphényles (PCB), longtemps utilisés comme isolants électriques thermorésistants avant d'être interdits en 1987 ainsi que les phtalates (PAE) encore utilisés en tant que plastifiants. D'autres familles ont connu un intérêt grandissant comme les polybromodiphényléthers (PBDE) utilisés comme retardateurs de flamme dans les industries plastiques et textiles, les alkylphénols (AP) très massivement utilisés jusqu'au début des années 2000 pour leurs propriétés tensio-actives dans les détergents et autres produits d'entretien ou encore, les composés perfluorés (PFA) entrant notamment dans la composition des textiles imperm rables ou des revêtements anti-adhésion des ustensiles de cuisine. En plus de la diversité des voies d'émissions de ces composés, la grande variété de leurs propriétés physico-chimiques entraine des comportements très diversifiés dans l'environnement. Notre étude vise à établir les bilans massiques de ces 6 familles de composés à l'échelle du bassin de la Seine et de l'agglomération Parisienne à partir des concentrations rapportées dans plus de 70 études portant sur l'environnement de la Seine.

Ces premiers résultats, issus d'une approche simplifiée, permettent d'observer des schémas très contrastés entre les différents contaminants. Les HAP sont les composés les plus abondants dans les sols du bassin avec des teneurs de l'ordre de 10^4 tonnes, suivis des AP et le DHEP (10^3 t), les PCB et le BPA (10^2 t) et les PBDE (10^1 t). Les retombées atmosphériques apparaissent comme étant les apports principaux vers ces sols pour l'ensemble des polluants avec des concentrations maximales mesurées pour le DEHP de plusieurs $\mu\text{g/L}$. A l'aval de Paris et des rejets de STEP du SIAAP, les flux les plus importants en micropolluants concernent le DEHP avec 10 t.an^{-1} puis les AP et les HAP représentant respectivement plus de 4 t.an^{-1} et 2 t.an^{-1} . Les flux de PBDE, de l'ordre de 30 kg.an^{-1} , sont les plus faibles. La source principale de HAP vers la Seine semble être l'érosion des sols, tandis que pour le DEHP, les AP et le BPA, les résultats préliminaires indiquent que ce sont les apports urbains. Pour les PBDE et les PCB ces deux sources semblent contribuer à part égale. Cette approche simplifiée ne tient pas compte de la variabilité spatiale et temporelle des concentrations au sein des réservoirs et des différents paramètres contrôlant les échanges entre eux. Cependant des voies d'amélioration pour préciser ces calculs sont proposées dans ce document et sont en cours d'application.

1 Contexte et objectifs de l'étude

Alors que les métaux ont été étudiés dès 1989, les polluants organiques persistants ont connu un intérêt grandissant à partir de 1995. Cette évolution résulte d'une part d'un contexte réglementaire avec la mise en place de la Directive Cadre sur l'eau et des nombreuses interrogations des gestionnaires sur la qualité des eaux de surface qui ont découlé de cette directive. Cette évolution s'explique également par une prise de conscience face à de nombreux xénobiotiques dans notre quotidien, couplée à une évolution technologique permettant de doser ces composés à l'état de trace.

À ce jour, les études portant sur les polluants organiques se sont intéressées à la contamination des eaux de surface par un large panel des polluants tels que les HAP, les PCB, les plastifiants (phtalates, bisphénol A), les retardateurs de flamme (PBDE, tétrabromobisphénol), certains tensioactifs ou agents anti-salissures (alkylphénols, composés perfluorés). Ces travaux avaient pour objectif de mieux cerner l'état et l'évolution de la contamination des masses d'eau au cours du cycle hydrologique, en lien avec les pressions urbaines subies. Les différents travaux du PIREN-Seine menés depuis les années 2000 ont ainsi permis une avancée significative sur la connaissance et la compréhension de la contamination de la Seine par certains polluants organiques. Si plus d'une cinquantaine de publications portant sur les polluants organiques ont été publiées, à l'échelle globale du bassin versant de la Seine, ces connaissances s'avèrent cependant limitées pour plusieurs raisons. D'une part, certaines études se limitent à des sous-bassins versants de petites tailles (Gateuille et al. 2014 ; Tran et al. 2015) ou à des zones urbaines (Dargnat et al. 2009). D'autres se focalisent uniquement sur les corridors fluviaux (Teil et al. 2007 ; Cladière et al. 2012) ou à des processus de transferts à petites échelles spatiales et temporelles (Labadie and Chevreuil 2011). Enfin, certains travaux se concentrent sur le comportement et le devenir d'une famille de polluants au sein d'un seul compartiment environnemental tel que l'atmosphère (Tlili 2011), le sol (Motelay-Massei et al. 2004 ; Muresan et al. 2010) ou les sédiments (Johnny Gasperi et al. 2009).

L'objectif de ce présent travail est d'agrèger et d'intégrer l'ensemble des connaissances acquises sur les polluants organiques en vue d'établir des bilans de flux à l'échelle du bassin de la Seine et également à l'échelle de l'agglomération Parisienne. Structurant pour la phase VII du PIREN-Seine (2015-2019), ce projet se veut fédérateur en associant toutes les équipes de recherche du PIREN-Seine travaillant sur les micropolluants (LEESU, UMR Metis, EPOC) tout en collaborant avec le programme OPUR (Observatoire des Polluants Urbains) pour les flux urbains de polluants et l'INERIS pour les émissions industrielles et émissions polluantes liées à l'usage des produits de consommations.

Dans ce rapport, sont décrites la base de données dans un premier temps, puis la méthodologie d'évaluation des flux ou stocks de polluants au sein des différents compartiments environnementaux et urbains. Les différentes hypothèses de travail sont détaillées et les premiers résultats sont également présentés. Enfin, des voies d'amélioration des calculs des stocks et des flux sont proposées.

2 Méthodologie

Ce travail s'appuie sur les approches intégratives précédemment développées pour les métaux (Thevenot et al. 2007 ; Meybeck et al. 2007). Deux cycles ont été dissociés pour l'étude des flux de polluants organiques. Un cycle « urbain » qui correspond à la zone SIAAP ainsi qu'un cycle « environnemental » qui englobe l'ensemble du bassin de la Seine. Les noms des flux sont dérivés de l'étude des flux de métaux de Thevenot et al. (2007) et la lettre détermine la manière dont les flux ont été quantifiés : S à partir de données expérimentales, C pour les flux issus de la combinaison de mesures et de modèles.

2.1 Le cycle « Environnemental »

Dans ce travail, une attention particulière a été portée sur les flux entrants dans le système Seine. Si l'ensemble des flux environnementaux à l'échelle du bassin de la Seine sont représentés dans la figure 1, seuls les stocks et les flux calculés dans cette étude sont détaillés ci-dessous :

- les stocks dans les sols forestiers, agricoles, urbains, industriels
- les flux vers ces sols, avec les retombées atmosphériques sur les zones forestières (**S10**), agricoles (**S11**) et urbaines (**S12**), ainsi que les apports par les épandages de boues de stations d'épuration (**C13**) et de sédiments dragués (**C25**)
- les flux depuis ces sols, liés à l'érosion des sols forestiers (**C15**), agricoles (**C16**), urbains (**C17**) et industriels (**C18**)
- les flux (particulaires & dissous) de la Seine en amont (**S19**) et à l'aval (**S20**) de Paris puis en aval des rejets de stations du SIAAP (**S21**). Pour cette étude, l'exutoire du bassin de la Seine a été pris à Triel sur Seine.

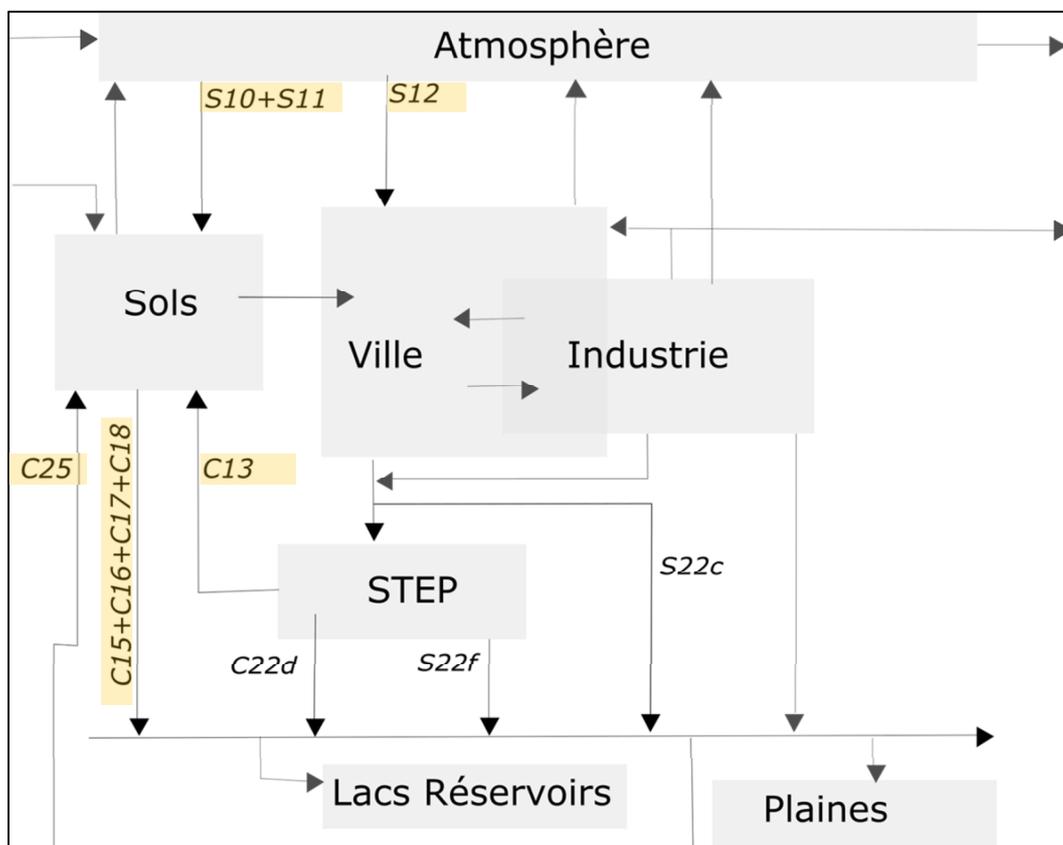


Figure 1 : Schéma des flux environnementaux des micropolluants

2.2 Le cycle « Urbain »

À l'échelle de la zone SIAAP, le cycle « urbain » permet de caractériser la pression anthropique liée au réseau d'assainissement vers le système Seine en considérant :

- les flux transitant dans les réseaux unitaires (**S22b**) jusqu'aux stations d'épurations (**S22e**) et en sortie de station (**S22f**)
- les flux correspondant aux déversoirs d'orages des réseaux unitaires (**C22d**) mais aussi aux eaux pluviales des réseaux séparatifs (**S22c**)
- les flux associés aux boues de station d'épuration incinérées (**C13a**), en entrée et en sortie de compost (**C13b** et **C13d**) et directement épandues sur les sols (**C13c**)
- mais aussi les flux liés au curage des dépôts sédimentés au sein du réseau d'assainissement (**C22i**)

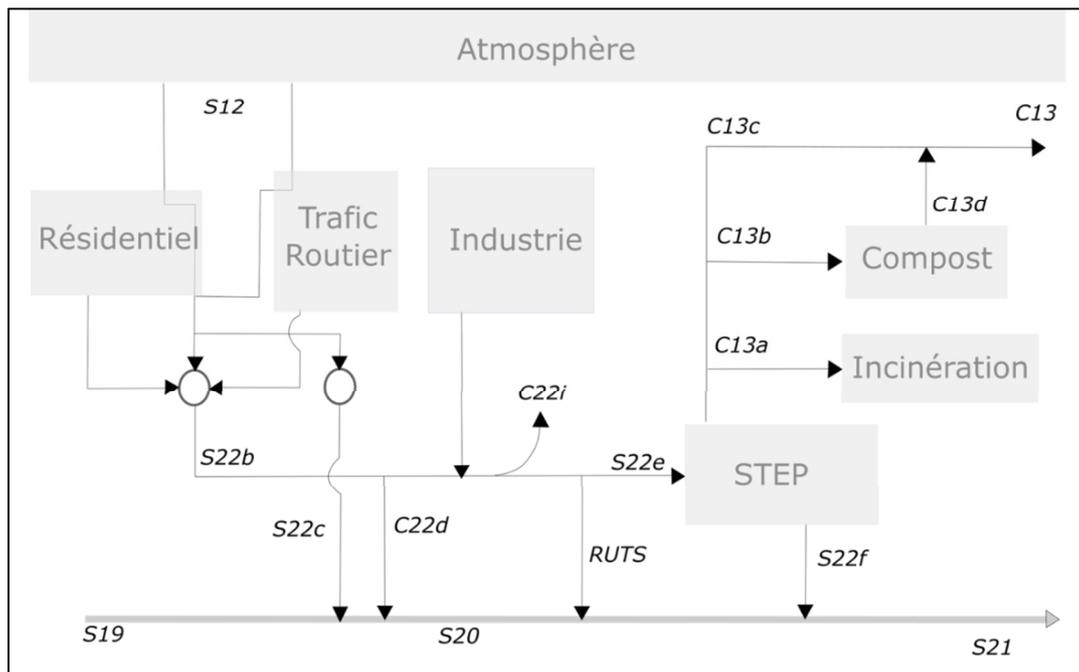


Figure 2 : Schéma des flux urbains des micropolluants

2.3 Constitution de la base de données

La première étape de ce travail a consisté à collecter et agréger les données environnementales et urbaines de plus de 75 études pour constituer une base de données la plus complète pour les 6 familles de polluants organiques dans l'ensemble des compartiments considérés. Les données environnementales proviennent essentiellement des travaux des équipes de chercheurs du PIREN-Seine et englobent plus de 15 ans de recherche (près de 25 ans pour les PCB). En complément de ces travaux, certaines données ont pu être recueillies auprès de différents gestionnaires.

L'expertise sur les flux urbains de micropolluants résulte d'une collaboration forte avec le programme OPUR (Observatoire des Polluants Urbains). À l'instar du PIREN-Seine, OPUR s'intéresse depuis maintenant 10 ans aux flux urbains de nombreux micropolluants organiques rejetés par l'assainissement (Mailler et al. 2013), les réseaux pluviaux (J. Gasperi et al. 2014; Zgheib et al. 2012) ou exportés par les boues de station d'épuration (Mailler et al. 2014).

Un certain nombre de données relatives au réseau d'assainissement, comme les volumes d'eau collectés, traités et rejetés, proviennent des services du SIAAP.

La base de données ainsi constituée regroupe donc plus de 45 études pour le cycle « environnemental » et plus de 30 pour le cycle « urbain », ce qui représente respectivement plus de 1200 et 800 échantillons et concentrations associées. Cependant, il existe une forte disparité entre les différentes familles de micropolluants étudiées ainsi qu'entre les différents compartiments environnementaux et urbains (

Tableau 1).

Ainsi, on constate que si les HAP sont bien documentés pour l'ensemble des compartiments environnementaux ou urbains, les PBDE ou les PFA sont bien moins représentés car plus récemment étudiés dans le cadre du PIREN Seine. Cette disparité apparaît encore plus nettement à l'échelle des eaux urbaines, où de sérieuses lacunes existent notamment sur les eaux résiduaires urbaines en amont des réseaux ou encore sur les dépôts dans les réseaux. Certaines données sont simplement non disponibles pour tous les groupes comme c'est le cas pour les concentrations dans les curages de réseau.

La base de données reflète mal la variabilité spatiale des teneurs en micropolluants dans les sols ou dans les retombées atmosphériques avec notamment des points de prélèvements souvent regroupés autour de Paris. Bien que de très nombreuses données en Seine soient disponibles pour la majorité des familles, il existe très peu de mesures en périodes de crues. Ce dernier point étant très dommageable lorsque l'on considère que l'essentiel des débits liquides et solides (>60%) transitent sur les deux mois de crues en hiver.

Tableau 1 : Répartition du nombre d'études et d'échantillons en fonction des familles de micropolluants et par compartiment du cycle « urbain » et « environnemental »

Cycles	Compartiments	Flux	AP	HAP	PAE	PBDE	PCB	PFA
Cycle « Urbain »	Pluies	S12	4 // 48	4 // 95	4 // 100	4 // 56	10 // 46	1 // 15
	Lessivage	S12e	x	1 // 11	x	x	1 // 11	x
		S12f	x	1 // 21	x	x	x	x
	Boues	C13	1 // 7	1 // 7	4 // 15	x	3 // 77	1 // 7
	Rejets Domestiques	C22a	x	1 // 14	1 // 44	x	x	x
	Réseau Assainissement	S22b	2 // 16	2 // 37	3 // 60	1 // 8	1 // 8	x
		S22c	2 // 16	5 // 82	1 // 14	1 // 22	1 // 27	x
		C22d	2 // 12	1 // 4	2 // 5	x	1 // 3	x
S22e		2 // 16	2 // 13	4 // 57	1 // 6	2 // 73	x	
	S22f	3 // 60	1 // 6	2 // 20	2 // 7	x	x	
Curage	C22i	x	4 // 286	x	x	2 // 48	x	
Industries	E22h	x	x	1 // 133	x	x	x	
Cycle "Environnemental"	Retombées	S10	2 // 12	1 // 6	1 // 6	1 // 6	1 // 6	x
		S11	3 // 41	6 // 204	4 // 53	1 // 29	6 // 170	1 // 14
	Boues	C13	1 // 7	1 // 4	4 // 12	x	3 // 73	1 // 4
	Sols	C15	1 // 3	3 // 28	1 // 3	2 // 15	2 // 9	1 // 1
		C16	2 // 11	3 // 68	1 // 11	2 // 69	2 // 15	1 // 10
		C17	2 // 21	3 // 47	1 // 21	2 // 67	2 // 39	1 // 19
		C18	2 // 2	3 // 25	1 // 2	1 // 1	2 // 11	x
	Rivières	S19	4 // 38	4 // 47	4 // 34	2 // 13	5 // 33	1 // 12
		S20	4 // 15	4 // 55	4 // 70	2 // 31	5 // 35	1 // 26
		S21	4 // 25	4 // 13	4 // 47	1 // 7	5 // 14	1 // 11
Dragage	C25	x	1 // 90	x	x	2 // 102	x	

2.4 Calculs des flux et des stocks

2.4.1 Principe

Dans un premier temps, l'estimation des flux annuels s'appuie sur une approche simplifiée qui consiste à utiliser les concentrations ou teneurs moyennes de micropolluants mesurées dans les différents compartiments et de leur affecter les différents volumes, masses, débits entrant et sortant de ces compartiments.

Dans le cadre de ce travail, les bilans annuels ont été calculés sur l'année 2014 car l'ensemble des paramètres gérés par le SIAAP y sont bien renseignés et que cette année ne présente pas de contexte hydrologique extrême. Pour certaines familles, la première étape du traitement des données nécessite un tri parmi les concentrations disponibles. En effet, les PCB et les PAE présentent une évolution significative des concentrations dans certains compartiments entre les premières mesures datant de 2000 et 2014. Ce n'est pas le cas des HAP qui sont émis de manière relativement constante depuis vingt ans et pour lesquelles les concentrations dans les eaux de surface sont relativement constantes. Pour d'autres familles, comme les AP et les PBDE, les études sont plus récentes et aucune donnée n'a été écartée.

Au sein de chaque famille, tous les composés ne sont pas systématiquement étudiés pour tous les compartiments. Pour les HAP, les PCB et les PBDE les sommes respectives $\Sigma 16\text{HAP}$, $\Sigma 7\text{PCB}$ et $\Sigma 8\text{PBDE}$, classiquement utilisées dans la littérature ont pu être calculées et sont détaillées dans le tableau 2.

Pour les autres familles, des composés spécifiques ont été sélectionnés pour leur intérêt de contaminant, et pour leur bonne représentativité dans les différents compartiments étudiés. Ainsi, pour les PAE, seul le composé DEHP a été considéré, pour les AP, les flux ont été calculés, d'une part pour la somme des NP, OP, NP1EO et NP2EO ($\Sigma 4\text{AP}$) et d'autre part pour le BPA. Les flux de PFA n'ont pu être calculés en raison d'un nombre trop faible de données dans l'ensemble des compartiments.

Tableau 2 : Liste des composés considérés pour les calculs de flux des cinq familles de polluants organiques

Familles	Composés Etudiés
HAP	$\Sigma 16\text{HAP}$: Naphtalène, Acénaphtylène, Acénaphène, Fluorène, Anthracène, Phénanthrène, Fluoranthène, Pyrène, Benzo(a)anthracène, Chrysène, Benzo(a)pyrène, Benzo(b)fluoranthène, Dibenzo(ah)anthracène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(ghi)pérylène, Indeno(1,2,3-cd)pyrène
PCB	$\Sigma 7\text{PCB}$: PCB-28, PCB-52, PCB-101, PCB-138, PCB-153 et PCB-180
PBDE	$\Sigma 8\text{PBDE}$: BDE-28, BDE-47, BDE-100, BDE-99, BDE-100, BDE-153, BDE-154, BDE-183 et BDE-209
AP	$\Sigma 4\text{AP}$: NP, OP, NP1EO, NP2EO
	BPA
PAE	DEHP

2.4.2 Calcul des concentrations moyennes et incertitudes : Méthode « Random »

Le nombre de concentrations disponibles dans les différents compartiments sont très hétérogènes et certains jeux de données ne comprennent pas plus de trois mesures par composé, tandis que d'autres sont beaucoup plus fournis ($n > 80$). Le calcul d'une concentration moyenne sur un grand jeu de données peut ne pas poser de problème, même si on n'intègre pas forcément les valeurs résumées de type « moyennes » ou « médianes » fournies par certaines études et pour lesquelles les données individuelles ne sont pas toujours disponibles. Afin de calculer des concentrations moyennes robustes même sur des petits échantillons on se base sur une méthode statistique de 1000 de tirages aléatoires (bootstrap) parmi le jeu de données, pour en tirer une moyenne et un écart type (**Tableau 3**). Cette méthode permet également de mieux prendre en compte les valeurs résumées puisque le tirage aléatoire est alors réalisé parmi une distribution supposée normale en utilisant la valeur moyenne et son écart type, quand il est fourni, ou éventuellement selon une loi uniforme si seules les valeurs minimales et maximales sont indiquées.

Tableau 3 : Synthèse des moyennes (moy) et des écarts types (ET) calculés avec la méthode « Random » des familles et composés de micropolluants dans l'ensemble des compartiments environnementaux et urbains, x : pas de données disponibles

Compartiments			Flux/stocks concernés	unité	Σ7PCB		DEHP		Σ8PBDE		Σ4AP		BPA		Σ16HAP	
					moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
Seine à Marnay	dissous	S19	ng/l	0,9	0,8	113,3	87,5	0,4	0,51	195,0	78,6	23,4	17,8	18,6	6,6	
	particulaire	S19	µg/g	0,3	0,4	10,4	13,1	0,04	0,04	4,3	10,2	0,3	0,1	2,9	1,7	
Seine à Bougival	dissous	S20	ng/l	1,5	0,6	166,3	208,0	1,4	1,81	207,6	79,9	62,0	41,3	75,3	20,6	
	particulaire	S20	µg/g	0,2	0,1	19,4	16,5	0,06	0,06	1,0	0,8	0,3	0,3	9,4	6,4	
Seine à Triel	dissous	S21	ng/l	2,5	4,3	114,7	106,1	0,33	0,29	272,4	99,2	61,0	35,3	41,3	8,6	
	particulaire	S21	µg/g	0,3	0,3	28,6	19,4	0,08	0,04	1,93	2,6	0,4	0,6	6,2	2,1	
Sédiments Seine	dragage	C25	µg/g	0,1	0,2	7,0	1,2	x	x	0,5	0,3	0,23	0,0	5,9	2,6	
Retombées atmosphériques	Forêts	S10	ng/l	2,3	2,4	473,4	363,9	2,7	2,1	112,0	58,3	21,7	9,2	111,4	17,8	
	agricoles	S11	ng/l	3,8	3,7	1656,6	5046,1	0,6	1,9	194,5	160,4	224,2	290,4	156,5	96,6	
	urbaines	S12	ng/l	12,5	30,2	3570,0	2712,9	6,5	11,8	153,4	71,7	87,2	74,7	278,1	172,3	
Sols	Forêts	stock 10 / C15	ng/g	1,9	2,6	226,8	147,7	1,9	1,1	135,0	74,2	9,8	7,4	918,7	209,7	
	agricoles	stock 11/ C16	ng/g	10,0	14,3	128,2	190,7	2,1	1,5	88,5	36,0	15,3	3,0	570,9	340,3	
	urbains	stock 12/ C17	ng/g	13,4	14,0	177,2	233,5	2,5	3,0	125,9	63,7	4,7	5,7	3427,0	2467,7	
Réseaux Unitaires	Rejets domestiques	C22a	µg/l	0,02	0,01	60,8	71,3	x	x	x	x	x	x	0,62	0,2	
	Amont du réseau	S22b	µg/l	x	x	76,1	31,2	0,05	0,04	10,8	3,7	1,4	0,5	2,13	0,5	
	Entrée de STEP	S22e	µg/l	0,01	0,01	66,3	30,1	0,16	0,10	8,6	7,3	x	x	0,74	0,1	
	Sortie de STEP	S22f	µg/l	x	x	2,40	1,50	0,01	0,01	0,61	1,15	0,07	0,06	0,05	0,02	
	Déversoirs d'orage	C22d	µg/l	0,02	0,01	10,0	4,3	x	x	1,85	0,55	1,5	0,4	1,9	0,2	
	boues STEP	C13	ng/g	1436	2028	16850	21080	0,1	0,2	17900	4200	x	x	4800	400	
	curage réseaux	C22i	ng/g	2,8	6,9	x	x	x	x	x	x	x	x	29460	8240	
Réseau Séparatif	Eaux pluviales	S22c	µg/l	0,4	0,3	21,4	15,5	0,2	0,3	0,9	0,7	0,6	0,5	3,2	0,7	

2.5 Détails des flux calculés

Les paramètres liés aux différents types de surfaces (agricoles, forestières et urbaines) et entrant dans le calcul des flux sont résumés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Superficies, épaisseurs des sols contaminées et taux d'érosion caractéristiques des sols forestiers, agricoles et urbains (Corinne Land Cover 2006, Delmas 2011)

Occupation des sols	Superficie [km ²]	Épaisseur contaminée (cm)	τ érosion [kg.km ⁻² .an ⁻¹]
Agricole	52 630	25	18,4
Forestière	20 320	8	2,0
Urbaine	5 350	8	0,9

2.5.1 Les retombées atmosphériques S10-S11-S12

Les flux S10, S11 et S12 correspondent respectivement aux retombées atmosphériques sur les forêts, les zones agricoles et les zones urbaines. L'approche utilisée ici consiste à multiplier les concentrations mesurées dans les retombées atmosphériques totales, par la hauteur de pluie sur la période considérée et la superficie correspondant aux surfaces forestière, agricole et urbaine (équation n°1).

$$Flux [kg.m^{-2}.an^{-1}] = Concentration [kg.m^{-3}] \times Hauteur [m] \times Surface [m^2] \quad (1)$$

2.5.2 Les stocks dans les sols

Les teneurs en contaminants dans les sols sont un paramètre crucial de leur cycle environnemental. En effet, les sols reçoivent l'essentiel des apports atmosphériques qu'ils stockent en grande partie. Par conséquent, ils deviennent des sources secondaires vers l'atmosphère (par volatilisation) et vers les rivières (par l'érosion et le lessivage). On distingue souvent 3 ou 4 types de sols : les sols agricoles (majoritaires dans le bassin en termes de superficie), les forêts, les sols urbains (minoritaires mais fortement contaminés) et les sols industriels (souvent assimilés aux sols urbains par manque de données et face à l'incapacité de les distinguer).

Il apparaît donc nécessaire de tenir compte de leur utilisation puisque qu'en fonction de celle-ci les sources de contaminants ne seront pas les mêmes et les épaisseurs concernées peuvent varier (**Tableau 4**). De manière générale, les études sur les teneurs dans les sols se concentrent sur la surface en s'appuyant sur le principe que les contaminants hydrophobes ne migrent que très faiblement en profondeur. Pour les études du PIREN-Seine, les échantillons de sols ont été collectés sur les 8-10 premiers centimètres. Pour les sols non perturbés, c'est cette valeur qui sera utilisée comme épaisseur. Pour les sols agricoles, le labour peut entraîner les micropolluants plus en profondeur. Avec un labour annuel, on considère une concentration homogène sur toute la couche de sol travaillée. Une profondeur de labour moyenne de 25 cm a été utilisée pour les calculs de stock dans les sols agricoles du bassin de la Seine. Enfin, la densité du sol peut être prise égale à 1350 kg.m⁻³, ce qui correspond à un sol sec contenant environ 2% de carbone organique, représentatif des sols agricoles

Les stocks de micropolluants dans les sols peuvent être calculés en multipliant les teneurs mesurés dans les différents types de sols par le volume de sol contaminé (équation n°2).

$$Stock [kg.m^{-2}] = Teneurs [kg.kg^{-1}] \times épaisseur [m] \times Surface [m^2] \times densité [kg.m^{-3}] \quad (2)$$

2.5.3 Érosion des sols : C15-C16-C17-C18

Les flux C15, C16, C17 et C18 représentent respectivement l'érosion depuis les zones forestières, agricoles, urbaines et industrielles. Les deux derniers étant difficiles à distinguer ont été fusionnés. L'érosion est un paramètre complexe à appréhender car très variable spatialement. Cependant les flux de micropolluants apportés aux rivières par l'érosion peuvent être calculés grâce à l'équation n°3 en utilisant les taux d'érosion spécifiques à chaque type de sols (Delmas 2011, **Tableau 4**) :

$$Flux [kg.an^{-1}] = FE \times concentration [kg.kg^{-1}] \times \tau_{\text{érosion}} [kg.km^{-2}.an^{-1}] \times Surface [km^2] \quad (3)$$

2.5.4 Flux en Seine : S19 – S20 – S21

Les flux S19, S20 et S21 correspondent aux flux en Seine à l'amont de Paris (S19), à l'aval de Paris (S20) et à l'aval de Paris et des rejets de Seine Aval (S21). Parmi le grand nombre de mesures réalisées sur la Seine et disponible dans la base de données, les calculs de ces flux ont exclusivement utilisé les données des sites ateliers de Marnay, Bougival et Triel-sur-Seine. Ces 3 stations sont suivies dans le cadre du PIREN-Seine et les concentrations en HAP, PCB, PBDE, AP et PAE sont disponibles pour la phase dissoute et particulaire. Les données relatives à ces 3 sites ont été préférées à d'autres car les prélèvements ont été réalisés de manière synchrone entre les 3 sites ce qui facilite la comparaison des flux d'amont en aval.

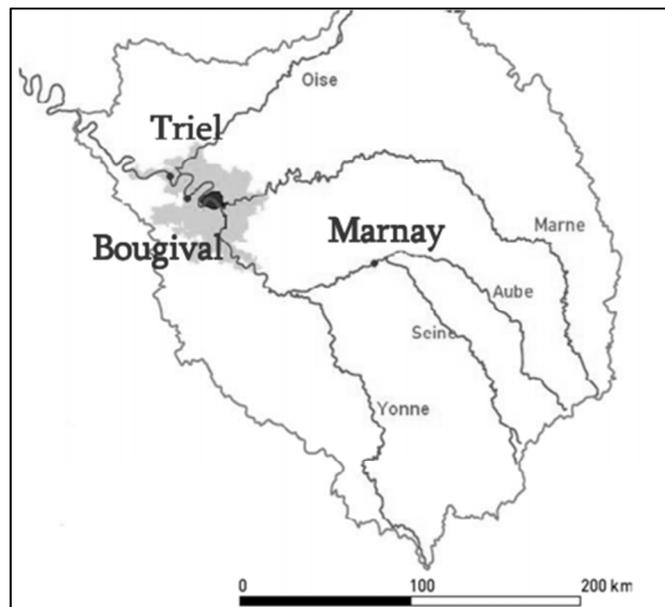


Figure 3 : Bassin versant de la Seine et localisation des 3 sites ateliers de Marnay, Bougival et Triel-sur-Seine

La distribution des polluants entre les phases dissoute et particulaire dépend de leur propriété physico-chimiques. Certains très hydrophobes (ex : PBDE) sont fortement liés aux matières en suspension (MES), quand d'autres, plus hydrophiles (ex : BPA) sont associés à la phase dissoute. Pour les autres composés, les comportements sont intermédiaires. L'estimation des flux de micropolluants en Seine nécessite donc une bonne quantification des flux aqueux et de MES. Les relations log10 Débit / log10 MES établies à partir de stations proches de celles de Triel (**Figure 4**), Marnay et Bougival ont permis de calculer un flux aqueux et un flux solide sur ces 3 stations pour l'année 2014 (

Tableau 5).

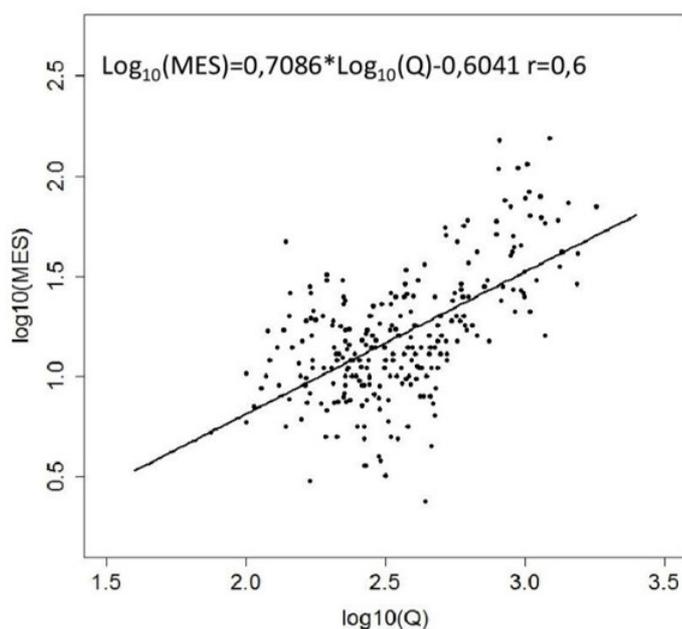


Figure 4 : Relations entre le log10 du débit de la Seine (calculée comme étant la somme des débits mesurés sur la Seine à Austerlitz et sur l'Oise à Creil) et le log10 des concentrations en matières en suspension (MES) à Triel-sur-Seine (Données AESN et SNS)

Tableau 5 : Flux d'eau et de matières en suspensions calculés à Marnay, Bougival et Triel-sur-Seine

Stations (année 2014)	Flux aqueux [m ³ /an]	Flux MES [kg/an]
Marnay	2,95.10 ⁹	1,39.10 ⁸
Bougival	1,02.10 ¹⁰	2,68.10 ⁸
Triel-sur-Seine	1,37.10 ¹⁰	3,08.10 ⁸

Les flux de micropolluants en Seine peuvent être calculés grâce à l'équation n°4, en affectant au flux de chacune des deux fractions, la concentration moyenne mesurée aux différents sites.

$$Flux [kg.an^{-1}] = Conc_{part} [\mu g.g^{-1}] \times Q_{MES} [kg.an^{-1}] + Conc_{diss} [ng.L^{-1}] \times Q_{aq} [m^3.an^{-1}] \quad (4)$$

2.5.5 Le dragage : C25

Les services des voies navigables Françaises (VNF) procèdent au curage des fonds de la Seine et de ses affluents. Les sédiments ainsi retirés sont analysés et sont soit stockés pour les plus contaminés, soit valorisés pour l'épandage agricole (6%) ou le régalage des berges (21%) pour les moins contaminés. Les flux de micropolluants liés au dragage peuvent donc être facilement estimés en multipliant les concentrations en micropolluants dans les sédiments par la masse de matière draguée (équation n°5).

$$\text{Flux}[\text{kg.an}^{-1}] = \text{Conc}[\text{kg.kg}^{-1}] \times \text{masse}[\text{kg.an}^{-1}] \quad (5)$$

Les concentrations utilisées dans ce travail sont soit, celles mesurées directement dans les matériaux dragués (HAP, PCB) soit celles mesurées dans les sédiments en place (PAE, AP).

Les masses de sédiments sont calculées (**Tableau 6**) à partir des volumes dragués mesurés par VNF, en considérant 70% de matières sèches en moyenne (VNF) et une masse volumique pour les sédiments secs de $1\,350\text{ kg.m}^{-3}$ (estimation pour un sol avec 2 % de matière organique) et une masse volumique des sédiments dragués de $1\,245\text{ kg.m}^{-3}$.

Tableau 6 : Volumes dragués en 2014 (source VNF) et masses correspondantes de sédiments

	Volume [m ³]	Masse [t]
Dragage	195 536	245 000
Epandage agricole (6%)	11 560	15 000
Régalage des berges (21%)	41 058	51 000

2.4.1 Flux collectés et émis par le SIAAP : S22b-S22c –C22d-S22e-S22f-C22i

À l'échelle de l'agglomération Parisienne, les eaux résiduaires urbaines sont traitées par le réseau SIAAP qui est découpé en trois zones : les réseaux unitaires, les réseaux séparatifs et les réseaux mixtes (**Figure 5**) :

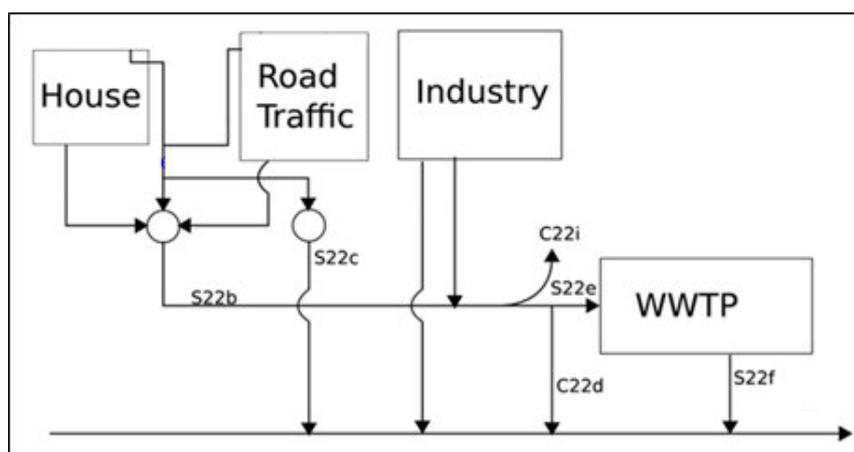


Figure 5 : Zoom de la figure 2 des flux collectés et émis par le système d'assainissement

Pour calculer ces différents flux, les mesures de concentrations disponibles pour ces différents tronçons de réseaux ont été multipliées par les volumes correspondants (équation n°6, **Tableau 7**) :

$$Flux [kg.an^{-1}] = Conc [kg.m^{-3}] \times Volume [m^3.an^{-1}] \quad (6)$$

Tableau 7 : Volumes gérés par le SIAAP en 2014

Type d'effluents	Flux correspondants	Débit [Mm ³ .an ⁻¹]
Volume collecté	S22b	911
Volume traité	S22e, S22f	897
Rejets pluviaux sans traitement (Réseau unitaire)	C22d	13,8
Rejets pluviaux sans traitement (Réseau séparatif)	S22c	95
Rejets unitaires sans traitement (RUTS)	RUTS	20,5

2.4.2 Les rejets de boues de STEP : C13 (a,b,c,d)

En plus des effluents liquides en sortie de STEP (C13), les boues d'épuration constituent un autre vecteur de micropolluants vers l'environnement dont la voie d'exposition diffère selon leur mode de gestion. Il existe 4 traitements sur les boues en fonction de leur niveau de contamination :

- la valorisation énergétique et la mise en décharge (C13a) pour les boues très contaminées, qui conduisent à la destruction des boues. Même si le rendement n'est pas de 100%, on considère que l'élimination des polluants est complète.
- l'épandage des boues (C13c)
- le compostage (C13b) qui consiste à faire subir aux boues une étape de digestion supplémentaire où les polluants continuent à être dégradés avant de les épandre (C13d).

Par ailleurs, les teneurs en micropolluants en sortie de compost ne sont pas mesurées et il n'est donc pas possible de calculer ce flux C13d. Les autres flux sont calculés grâce à l'équation n°7. Les masses de boues utilisées par mode de gestion sont résumées dans le tableau 7.

$$Flux_{boues} [kg.an^{-1}] = Teneur [kg.kg^{-1}] \times Masse [kg.an^{-1}] \quad (7)$$

Tableau 8 : Masses de boues gérées par le SIAAP en 2014

Type de gestion	Flux	Masse [t MS.an ⁻¹]
Boues collectées	C13	112 400
Boues valorisées + mises en décharge	C13a	$4,58.10^4 + 8,64.10^4$
Boues compostées	C13b	$2,67.10^4$
Boues épandues	C13c	$3,13.10^4$

3 Résultats de l'approche simplifiée pour le calcul des flux

Les différents résultats issus de cette approche simplifiée permettent d'appréhender les ordres de grandeurs des différents flux et stocks de ces micropolluants. Ces résultats préliminaires sont résumés sous la forme des cycles « urbain » et « environnemental » (Figure 6 à 11) et présentent des schémas très contrastés entre les différents groupes de contaminants.

3.1 Les stocks dans les sols

Les HAP sont les composés les plus abondants dans les sols du bassin avec des teneurs de l'ordre de 10^4 tonnes, suivis des AP et le DEHP (10^3 tonnes), les PCB et le BPA (10^2 tonnes) et les PBDE (10^1 tonnes) reflétant les différences dans les sources d'émissions et/ou de comportement au sein de ce réservoir. Pour tous les composés, les apports principaux à ces sols proviennent des retombées atmosphériques. Les apports par épandages de boues d'épuration (C13) ou de sédiments de dragage (C25), quand ils ont pu être calculés y sont bien inférieurs.

3.2 Retombées atmosphériques

Le DEHP est le composé le plus abondant dans les retombées atmosphériques actuelles avec des concentrations de plusieurs $\mu\text{g.L}^{-1}$ au-dessus des zones agricoles et urbaines tandis que les concentrations des autres composés varient du ng.L^{-1} ($\Sigma 7\text{PCB}$, $\Sigma 8\text{PBDE}$) à la centaine de ng.L^{-1} ($\Sigma 4\text{AP}$, BPA, **Tableau 3**). Pour les AP, les PBDE et le BPA, les concentrations apparaissent homogènes sur l'ensemble du bassin alors que les concentrations de PCB et de DEHP semblent être maximales au-dessus des zones urbaines. Ces tendances sont cependant à prendre avec précaution compte tenu de la proximité des points de prélèvements « agricoles » avec Paris.

3.3 Flux en Seine et principales sources

Les flux les plus importants en aval de la Seine concernent le DEHP avec 10 t.an^{-1} puis les AP et les HAP représentant respectivement plus de 4 t.an^{-1} et 2 t.an^{-1} (**Tableau 9**). Le DEHP et les HAP sont majoritairement transportés par les particules tandis que pour les AP c'est la phase dissoute qui semble majoritaire (**Tableau 9**). Les flux de PBDE sont les plus faibles et sont de l'ordre de 30 kg.an^{-1} . L'érosion des sols en amont du bassin, semble être la principale source de contamination de la Seine pour les HAP. Au contraire, pour le DEHP, les AP et le BPA, les eaux résiduaires et pluviales urbaines semblent constituer une source importante vers le système Seine. Enfin, pour les PBDE et les PCB, l'érosion et les rejets urbains semblent contribuer à parts égales aux flux en Seine.

Tableau 9 : Flux dissous et particulaires en Seine, calculés à l'amont de Paris (S19), à l'aval de Paris (S20) et à l'aval des rejets SIAAP (S21)

kg.an ⁻¹	$\Sigma 4\text{AP}$		BPA		DEHP		$\Sigma 8\text{PBDE}$		$\Sigma 7\text{PCB}$		$\Sigma 16\text{HAP}$	
	Flux	ET	Flux	ET	Flux	ET	Flux	ET	Flux	ET	Flux	ET
S19 d	580	230	69	53	330	260	1	2	3	2	29	14
S19 p	600	140	35	15	1 400	1 800	6	6	38	54	8	12
S19 total	1 180	370	104	68	1 730	2 060	7	7	41	56	37	26
S20 d	2 100	820	630	420	1 700	2 100	14	18	15	6	811	535
S20 p	270	210	72	83	5 200	4 400	16	16	56	27	2 092	1 450
S20 total	2 370	1 030	702	503	6 900	6 500	30	34	71	33	2 903	1 984
S21 d	3 700	1 400	830	480	1 600	1 500	5	4	34	58	423	106
S21 p	590	800	120	190	8 700	5 900	24	12	89	95	1 915	1 291
S21 total	4 290	2 200	950	670	10 300	7 400	29	16	123	153	2 337	1 396

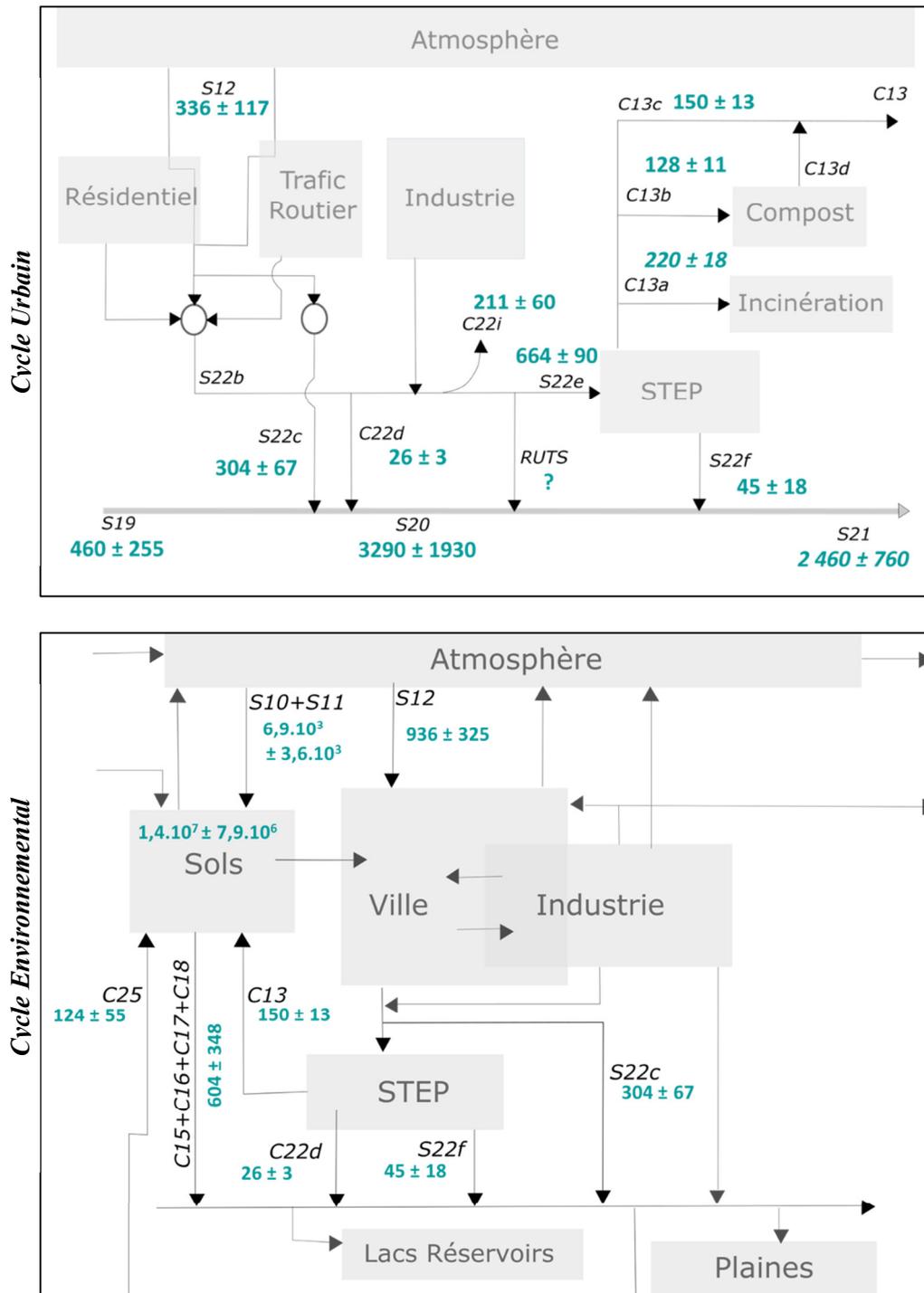


Figure 6 : Cycles « urbain » et « environnemental » des $\Sigma 16HAP$ (flux en $kg.an^{-1}$ et stocks en kg) calculés pour l'année 2014

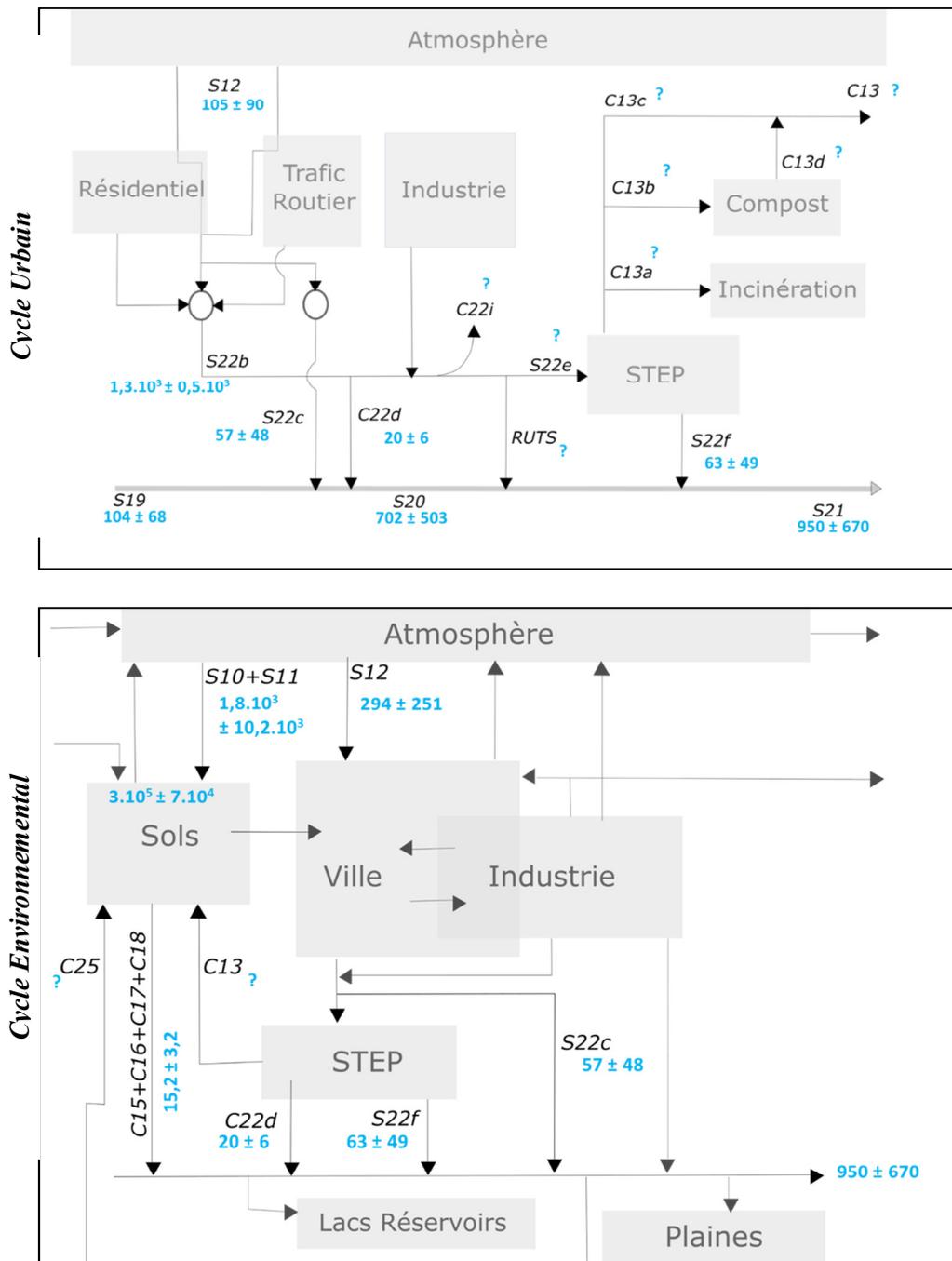


Figure 7 : Cycles « urbain » et « environnemental » du BPA (flux en $\text{kg}\cdot\text{an}^{-1}$ et stocks en kg) calculés pour l'année 2014

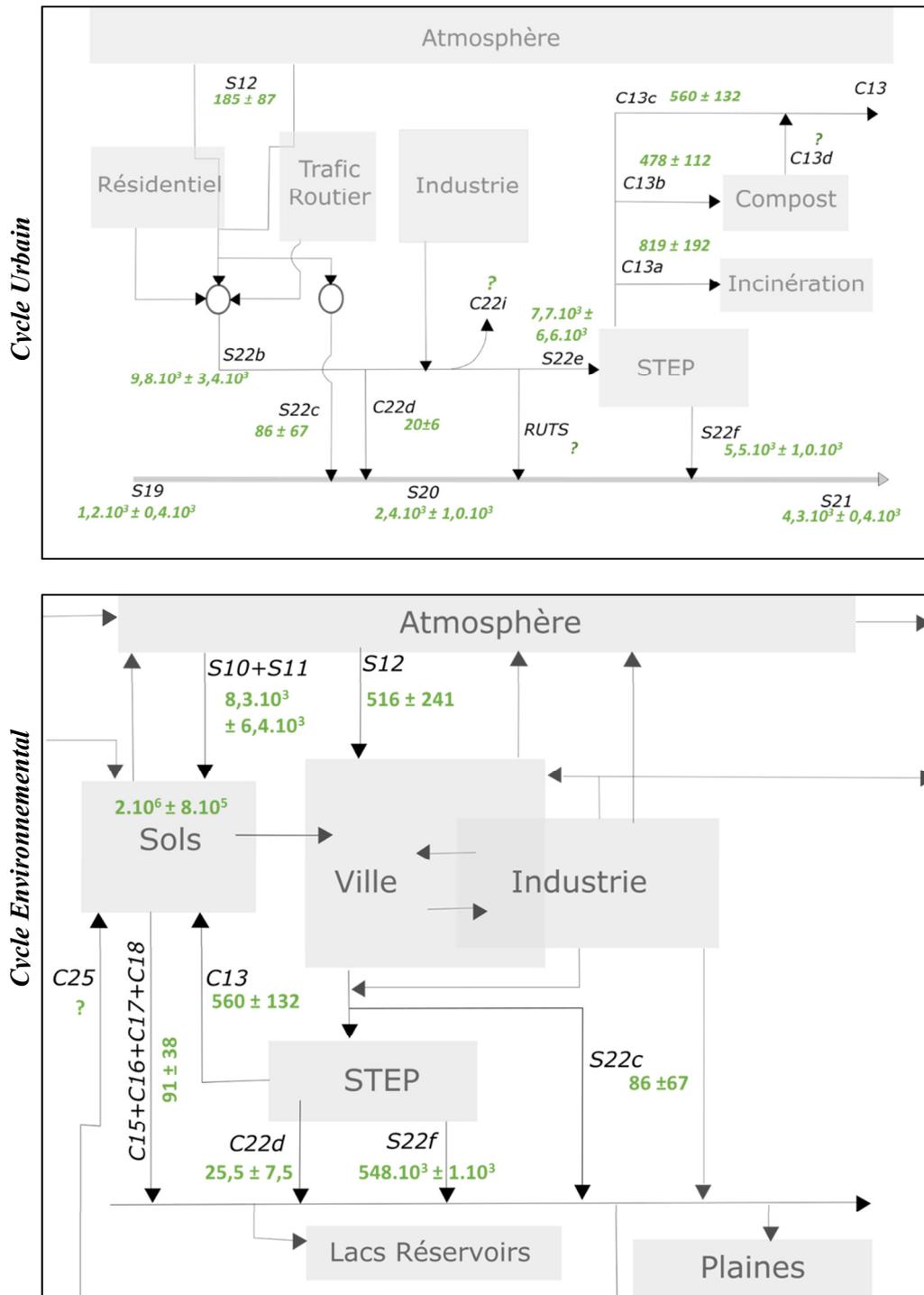


Figure 8 : Cycles « urbain » et « environnemental » des Σ4AP (flux en $kg.an^{-1}$ et stocks en kg) calculés pour l'année 2014

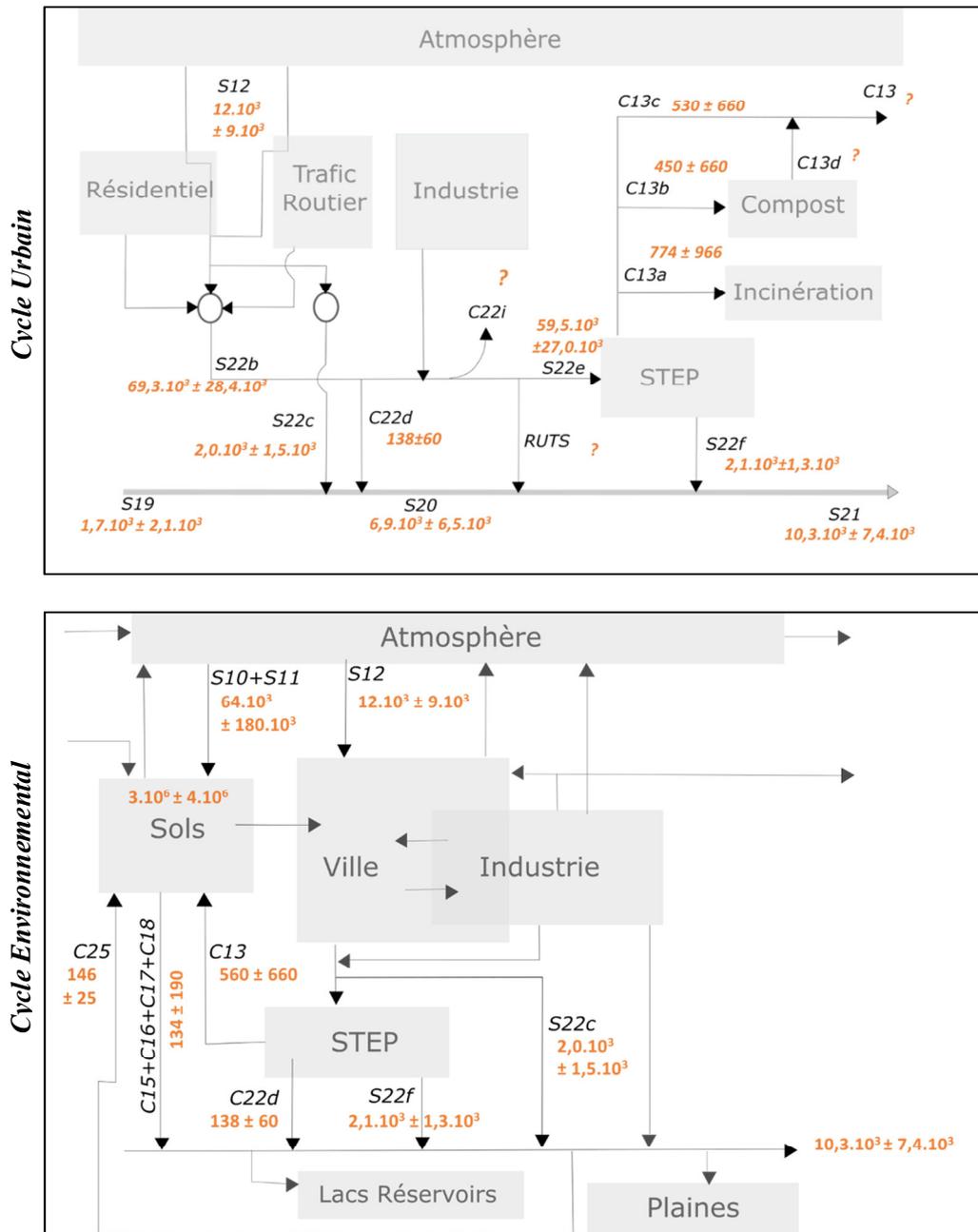


Figure 9 : Cycles « urbain » et « environnemental » du DEHP (flux en $kg \cdot an^{-1}$ et stocks en kg) calculés pour l'année 2014

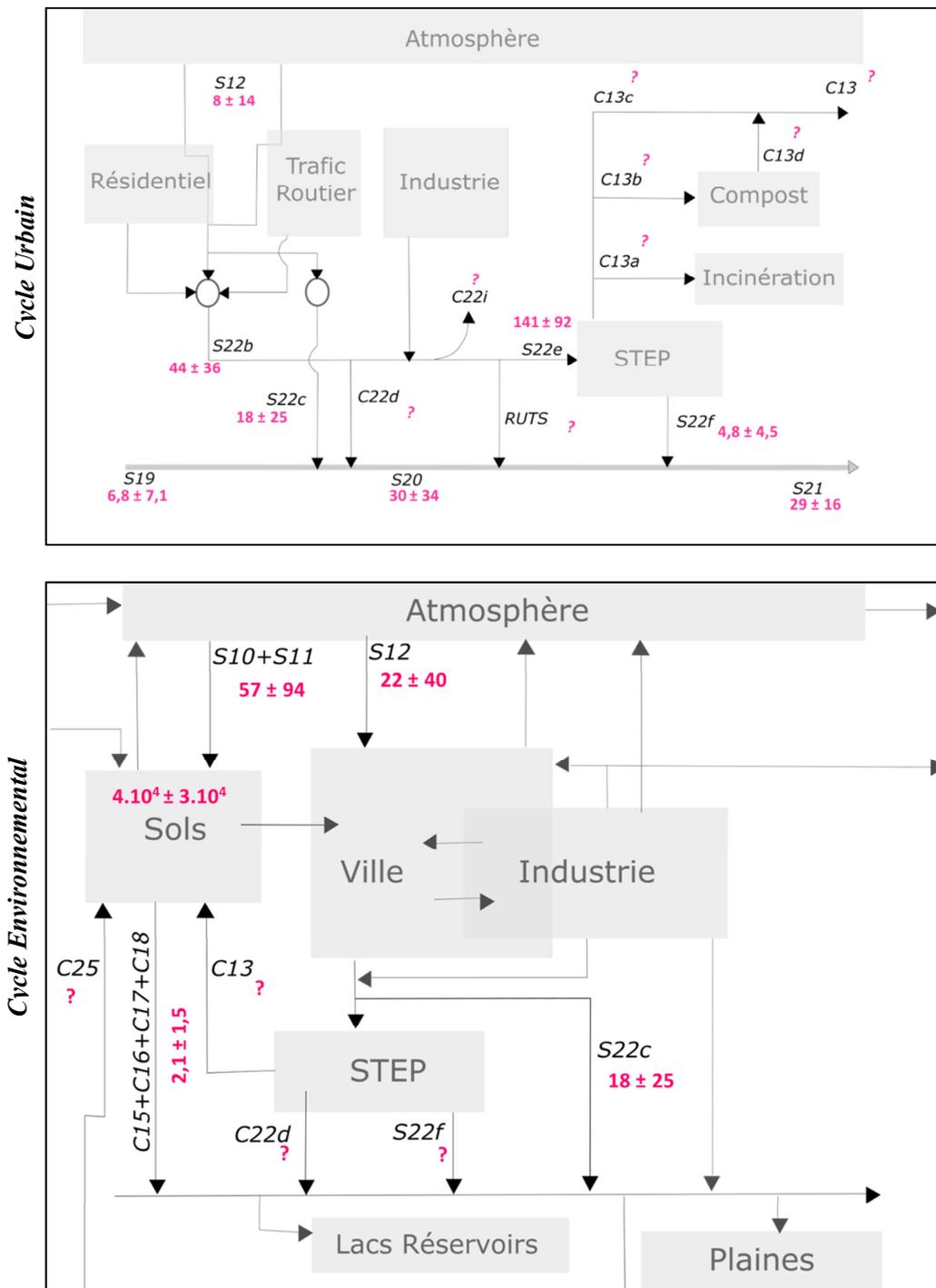


Figure 10 : Cycles « urbain » et « environnemental » des Σ8PBDE (flux en $\text{kg}\cdot\text{an}^{-1}$ et stocks en kg) pour l'année 2014

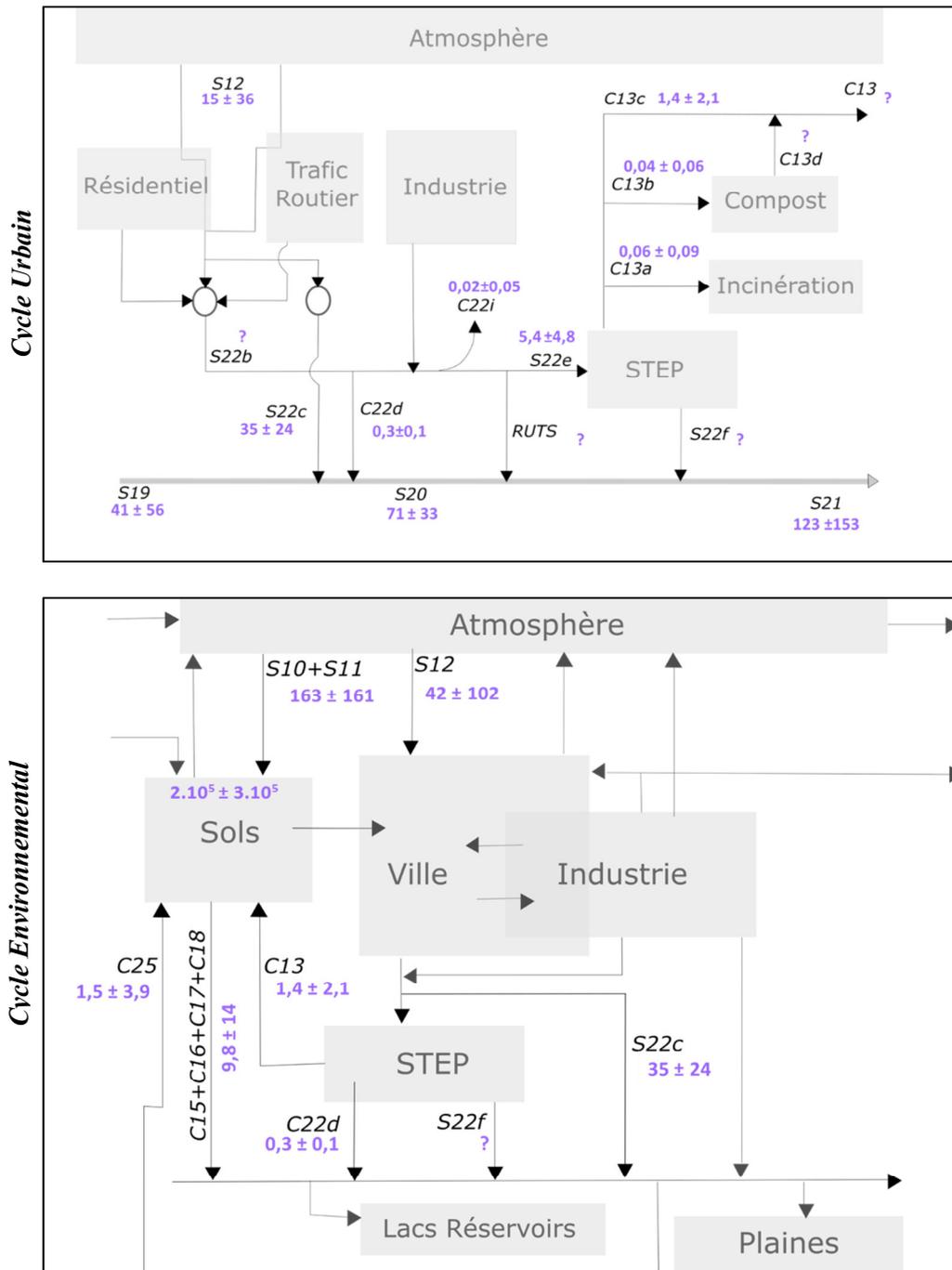


Figure 11 : Cycles « urbain » et « environnemental » des Σ7PCB (flux en kg.an⁻¹ et stocks en kg) pour l'année 2014

3.4 Discussion sur les incertitudes

Bien que ces calculs de flux moyens permettent d'observer les ordres de grandeurs des différents flux pour une même famille ou entre composés, les importants écarts-types qui leur sont associés ne permettent de quantifier précisément les différentes sources de contaminants vers le système Seine ou encore, d'étudier la dynamique de ces polluants.

Les écarts types associés aux flux dans ces bilans sont exclusivement calculés à partir des écarts types liées aux mesures de concentrations. Ils reflètent alors la forte variabilité des concentrations de ces polluants dans les différents compartiments qui peuvent s'expliquer par des conditions météorologiques et hydrologiques différentes mais aussi par la localisation géographique des points de prélèvements dont ces calculs préliminaires ne tiennent pas compte. Un travail supplémentaire doit être réalisé afin d'améliorer la précision de ces flux en intégrant également la variabilité spatiale et temporelle des paramètres extérieurs entrant dans ces calculs (surfaces, volumes d'eaux collectées, épaisseur des sols, etc...).

4 Voies d'améliorations des calculs de flux

La réduction des incertitudes associées aux calculs de flux nécessite une bonne connaissance des comportements de ces composés au sein des différents compartiments. Cette partie s'attache à présenter les pistes de travail pour améliorer les calculs de flux et réduire leur incertitude quand cela s'avère possible.

4.1 Compléter la base de données des concentrations

La première nécessité pour améliorer la connaissance des cycles environnementaux et urbains des polluants consiste à compléter la base de données des concentrations actuellement disponibles (**Tableau 10**). Ainsi les boues de STEP ainsi que les sédiments de rivières apparaissent comme étant les compartiments les moins bien renseignés pour la majorité des composés étudiés. Par ailleurs, les flux liés à l'épandage des boues sur les sols (C13) qui sont présentés dans les cycles «urbains» et «environnementaux» ne tiennent pas compte des volumes de boues qui sont épandus après une phase de compost. En effet, les concentrations en polluants de ces boues en sortie de compost, ainsi que les volumes correspondants ne sont pas disponibles et restent à définir. Par ailleurs, un important travail reste à fournir pour compléter les lacunes des concentrations des PFA notamment au sein du cycle «urbain».

Tableau 10 : Synthèse sur les concentrations disponibles et à compléter pour le calcul des flux.
M : concentrations mesurées et déjà disponibles, X : concentrations non mesurées dans le compartiment associé au flux considéré, E : concentrations non mesurées mais pouvant être « estimées » grâce à d'autres mesures.

Compartiments	Flux	Σ16HAP	BPA	Σ4 AP	DEHP	Σ8PBDE	Σ7PCB	PFA
Boues d'épuration	C13b, C13c	M	X	M	M	X	M	M
Boues après compost	C13d	M	X	X	X	X	X	X
Amont réseau Unitaire	S22b	M	M	M	M	M	E	X
Déversoir d'orage	C22d	M	M	M	M	X	M	X
Entrées de STEP	S22e	M	E	M	M	M	M	X
Sortie de STEP	S22f	M	M	M	M	M	X	X
Dépôts curés	C22i	M	X	X	X	X	M	X
Sédiments dragués	C25	M	X	X	E	X	M	X

Si la plupart de ces mesures sont absolument nécessaires aux calculs des différents flux, certaines approximations peuvent en offrir une première estimation. S'il n'existe pas de mesures de BPA en entrée de STEP (S22e), les concentrations mesurées à l'amont du réseau (S22b) peuvent être utilisées en première approximation. Dans les sédiments issus du dragage, seuls les PCB et les HAP ont été mesurés. Dans un premier temps, il est possible d'approcher ces concentrations à partir des mesures réalisées dans les sédiments en rivières lorsqu'elles existent. C'est ce qui a pu être fait ici pour le calcul du flux de DEHP, des AP et du BPA correspondant à l'épandage de sédiments (C25).

4.2 Prise en compte de la variabilité spatiale

Les flux calculés dans ce travail résultent de valeurs moyennes qui ne tiennent pas compte ni de la répartition géographique des points de mesures, ni de la variabilité spatiale des différents paramètres entrants dans les calculs.

4.2.1 Stocks dans les sols

La densité et la profondeur « active » des sols capable de stocker des polluants sont approchées dans ces premiers calculs, cependant, de nombreuses précisions peuvent y être apportées. Dans les zones urbaines, les sols imperméabilisés ne représentent pas un réservoir de polluants et devraient être retirés des calculs à l'échelle de la zone SIAAP mais aussi à celle du bassin de la Seine. Dans les zones agricoles, l'épaisseur « utile » a été choisie à 25 cm, il faudrait cependant distinguer les parties labourées des zones non perturbées. Pour les HAP en particulier, il serait à priori nécessaire de prendre en compte les stocks spécifiquement liés au réseau routier et localisés le long de celui-ci.

4.2.2 Hétérogénéité des retombées atmosphériques

À l'échelle du bassin de la Seine, il faudra tenir compte de la distribution des concentrations de polluants dans les retombées atmosphériques et également de la représentativité spatiale des points de prélèvements. Cette discrétisation spatiale pourrait nécessiter des prélèvements supplémentaires afin de couvrir le bassin de la Seine. D'autre part, les flux de polluants liés aux retombées atmosphériques ont été calculés à partir d'une hauteur de pluie moyenne à l'échelle du bassin de la Seine, il s'avère alors nécessaire de tenir compte de l'hétérogénéité des hauteurs d'eau dans le bassin.

4.2.3 Extrapolation des paramètres du réseau SIAAP à l'échelle du Bassin

Dans les résultats préliminaires présentés dans ce rapport, les flux urbains à l'échelle du SIAAP ont été extrapolés à l'ensemble du bassin de la Seine. Le réseau SIAAP collecte les émissions de 9 millions de Franciliens tandis que les rejets du reste de la population du bassin de la Seine sont collectés par des structures plus petites. En extrapolant les concentrations mesurées dans les différents effluents du SIAAP à l'ensemble du bassin, les flux urbains sont sous-estimés à l'échelle du bassin de la Seine. Des mesures de concentrations dans ces autres structures ou l'accès à ces données de concentrations souvent confidentielles, ainsi que des volumes d'eaux traités, de boues épandues, apparaissent donc nécessaires pour calculer les différents flux urbains à l'échelle du Bassin de la Seine.

4.3 Prise en compte de la variabilité temporelle

Les concentrations moyennes annuelles utilisées dans cette approche simplifiée ne prennent pas en compte la dynamique temporelle des polluants entre et au sein des différents réservoirs. Parmi les points abordés dans cette partie, un travail important doit être entrepris afin de mieux caractériser les flux et la dynamique des polluants en Seine.

4.3.1 Seine en crue

L'estimation des flux de micropolluants en Seine nécessite une bonne quantification des flux de MES en Seine et la connaissance des dynamiques de ces contaminations. Si le premier point a pu être établi avec plus ou moins de précision selon les stations, le second est particulièrement délicat car il existe très peu de données de concentrations en micropolluants en périodes de crues. Or ce paramètre est crucial car plus de 60% des débits d'eau et particulaires transitent sur les deux mois de crues en hiver. Une erreur même faible sur ces concentrations peut modifier grandement les résultats finaux.

La caractérisation des concentrations de polluants en période de crue apparaît donc essentielle à la caractérisation des dynamiques environnementales de contaminants et à l'identification des voies de transferts. En effet, un polluant émis de manière continue par les STEP verrait sa concentration chuter dans la Seine lors de la crue par effet de dilution par des apports supplémentaires d'eau et de sédiments. Inversement, un polluant issu des sols via l'érosion aurait une concentration constante tout au long de l'année ou variant avec les concentrations en MES.

4.3.2 Saisonnalité des retombées atmosphériques

Les calculs présentés dans ce rapport ne tiennent pas compte de la période à laquelle les prélèvements ont été réalisés et s'appuient sur une hauteur d'eau annuelle sans tenir compte de la saisonnalité des retombées atmosphériques. Pour les HAP, les études montrent une saisonnalité importante des concentrations avec notamment des retombées plus importantes en hiver dues aux émissions en hausse avec le chauffage domestique. En revanche, pour le DEHP, la variabilité intra-saisonnière s'avère être supérieure à la variabilité inter-saisonnières. La prise en compte de la variabilité temporelle des retombées atmosphérique risque donc d'introduire une erreur supplémentaire pour ce composé. La dynamique saisonnière des autres molécules reste à investiguer.

4.3.3 Temps secs/temps de pluie dans le réseau d'assainissement

Les flux de polluants entrants en STEP ont été calculés sans distinction entre les mesures en temps sec et les mesures en temps de pluies. En temps de pluie, les débits entrants en STEP sont légèrement supérieurs, mais la majorité des eaux sont rejetées directement sans traitement via les déversoirs d'orages (RUTP). Ces différences temps secs/temps pluies ne devraient donc pas représenter des variations très importantes de flux de polluants en entrée de STEP mais il est possible de calculer plus finement le cycle urbain à partir des volumes collectés en temps sec et en temps de pluie et des concentrations mesurées respectivement à l'entrée du réseau et dans les RUTP (équation n°8).

$$Flux = C_1 \times Volume_{TEMPSSEC} + C_2 \times Volume_{TEMPSPLUIE} \quad (8)$$

Avec :

- Débit de temps sec : 2 200 000 m³.j⁻¹ pendant 208 jours
- Débit de temps de pluie : 2 800 000 m³.j⁻¹ pendant 157 jours
- C1, la concentration mesurée en temps sec dans les réseaux
- C2 la concentration mesurée dans les eaux de déversoir d'orage.

Cependant, cette méthode ne tient pas compte des importants mécanismes d'érosion et de remise en suspension des contaminants au sein même du réseau en cas d'augmentation du débit. Ce calcul renseignera toutefois sur la limite basse de ce flux S22e.

D'autre part, comme pour le calcul des flux entrants en STEP, il peut être intéressant de distinguer les rejets de STEP en temps sec et en temps de pluie, notamment car les temps de séjours et donc les taux d'abattelements sont réduits lorsque les débits augmentent.

4.4 Processus de dégradation

La dernière partie de ce travail consistera à calculer les flux associés aux mécanismes de dégradations des micropolluants opérant au sein des différents réservoirs. Ainsi les mécanismes de photo-dégradation dans l'atmosphère, ou de biodégradation dans les sols, les rivières ou encore les grands lacs réservoirs seront étudiés et quantifiés. Toutefois, ces calculs s'avèrent complexes car les données permettant d'appréhender ces phénomènes dans l'environnement sont très rares.

5 Conclusions et perspectives

La collecte et la synthèse d'un grand nombre d'études réalisées sur le bassin de la Seine ont permis de dessiner les flux de 5 familles de polluants à l'échelle du Bassin de la Seine et de la zone SIAAP. Les premiers résultats ont été obtenus grâce à une approche simplifiée utilisant des moyennes annuelles, à la fois des concentrations de polluants dans les différents compartiments environnementaux et urbains mais aussi des différents paramètres reliant ces réservoirs entre eux : hauteur de pluies, surfaces agricoles, volumes transitant dans les réseaux d'assainissement. S'il reste de nombreuses voies d'amélioration pour le calcul de ces flux, comme une meilleure prise en compte des variabilités spatio-temporelles à la fois des concentrations en polluants mais des différents paramètres extérieurs, ce premier travail permet d'observer les ordres de grandeurs des concentrations mais surtout des flux de ces contaminants d'identifier les principales sources émettrices vers le système Seine pour chacun des groupes ou composés étudiés. Aussi, un bilan sur l'état des connaissances des concentrations dans les différents réservoirs a pu être établi et pourra servir de base de réflexion pour les prochains projets d'étude portant sur les micropolluants dans le bassin de la Seine.

Étant donné la très grande variabilité des concentrations pour certains composés au sein d'un réservoir (exemple du DEHP dans l'atmosphère), il est possible que la justesse d'un calcul de flux ne puisse être appréciée en se basant uniquement sur des écart-types liés à ces concentrations. C'est pourquoi, un système supplémentaire de « note de confiance » sera mis en place. Une note sera donc attribuée aux données entrant dans le calcul d'un flux suivant différents paramètres :

- Le nombre d'échantillons : plus il est faible plus la note sera basse qui pourra compenser un écart type faible calculé sur un petit nombre de données ;
- Le nombre d'études et leur cohérence : cette note augmentera avec le nombre d'études faites par des personnes différentes, dont les méthodes d'échantillonnage et d'analyse sont comparables ;
- Les méthodes d'échantillonnage, conditionnement et analyse : on pourrait par exemple critiquer une méthode de dosage de composés volatils sur des sols séchés longtemps à l'air libre ou à l'étuve ou des dosages fait sur un très faible volume d'échantillon ;
- La représentativité spatiale des échantillons : c'est le cas par exemple des retombées atmosphériques et des sols ;
- La qualité des paramètres extérieurs qui peuvent être mesurés ou estimés, comme c'est le cas pour les volumes collectés par le SIAAP.

La dernière partie de ce travail sera de comparer les flux ainsi calculés à ceux évalués par les chercheurs de l'INERIS pour le DEHP et le NP.

Bibliographie

- Cladière, Mathieu, Johnny Gasperi, Catherine Lorgeoux, Céline Bonhomme, Vincent Rocher, and Bruno Tassin. 2012. 'Alkylphenolic Compounds and Bisphenol A Contamination within a Heavily Urbanized Area: Case Study of Paris'. *Environmental Science and Pollution Research* 20 (5): 2973–83. doi:10.1007/s11356-012-1220-6.
- Dargnat, C., M. Blanchard, M. Chevreuil, and M. J. Teil. 2009. 'Occurrence of Phthalate Esters in the Seine River Estuary (France)'. *Hydrological Processes* 23 (8): 1192–1201. doi:10.1002/hyp.7245.
- Delmas, Magalie. 2011. *Origine Des Exports de Sédiments Fluviaux : Prise En Compte de L'hétérogénéité Spatiale Des Versants*. Paris 6. <http://www.theses.fr/2011PA066077>.
- Gasperi, J., C. Sebastian, V. Ruban, M. Delamain, S. Percot, L. Wiest, C. Mirande, et al. 2014. 'Micropollutants in Urban Stormwater: Occurrence, Concentrations, and Atmospheric Contributions for a Wide Range of Contaminants in Three French Catchments'. *Environmental Science and Pollution Research* 21 (8): 5267–81. doi:10.1007/s11356-013-2396-0.
- Gasperi, Johnny, C. Lorgeoux, R. Moilleron, M.-C. Gromaire, and Ghassan Chebbo. 2009. 'Settling Velocity Grading of Particle Bound PAHs: Case of Wet Weather Flows within Combined Sewer Systems'. *Journal of Environmental Engineering* 135 (11): 1155–1160.
- Gateuille, David, Olivier Evrard, Irène Lefevre, Elodie Moreau-Guigon, Fabrice Alliot, Marc Chevreuil, and Jean-Marie Mouchel. 2014. 'Mass Balance and Decontamination Times of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Rural Nested Catchments of an Early Industrialized Region (Seine River Basin, France)'. *Science of The Total Environment* 470–471: 608–17. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.10.009.
- Labadie, Pierre, and Marc Chevreuil. 2011. 'Partitioning Behaviour of Perfluorinated Alkyl Contaminants between Water, Sediment and Fish in the Orge River (Nearby Paris, France)'. *Environmental Pollution* 159 (2): 391–97. doi:10.1016/j.envpol.2010.10.039.
- Mailler, R., J. Gasperi, G. Chebbo, and V. Rocher. 2014. 'Priority and Emerging Pollutants in Sewage Sludge and Fate during Sludge Treatment'. *Waste Management* 34 (7): 1217–26. doi:10.1016/j.wasman.2014.03.028.
- Mailler, R., J. Gasperi, V. Rocher, S. Gilbert-Pawlik, D. Geara-Matta, R. Moilleron, and G. Chebbo. 2013. 'Biofiltration vs Conventional Activated Sludge Plants: What about Priority and Emerging Pollutants Removal?' *Environmental Science and Pollution Research* 21 (8): 5379–90. doi:10.1007/s11356-013-2388-0.
- Meybeck, Michel, Laurence Lestel, Philippe Bonté, Régis Moilleron, Jean Louis Colin, Olivier Rousselot, Daniel Hervé, Claire de Pontevès, Cécile Grosbois, and Daniel R. Thévenot. 2007. 'Historical Perspective of Heavy Metals Contamination (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) in the Seine River Basin (France) Following a DPSIR Approach (1950–2005)'. *Science of The Total Environment, Human activity and material fluxes in a regional river basin: the Seine River watershed* Seine Special Issue, 375 (1–3): 204–31. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.017.
- Motelay-Massei, A., D. Ollivon, B. Garban, M. J. Teil, M. Blanchard, and M. Chevreuil. 2004. 'Distribution and Spatial Trends of PAHs and PCBs in Soils in the Seine River Basin, France'. *Chemosphere* 55 (4): 555–65. doi:10.1016/j.chemosphere.2003.11.054.
- Muresan, B., C. Lorgeoux, J. Gasperi, and R. Moilleron. 2010. 'Fate and Spatial Variations of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Deposition within a Heavily Urbanized Area: Case of Paris (France)'. *Water Science & Technology* 62 (4): 822. doi:10.2166/wst.2010.931.

- Teil, Marie-Jeanne, Martine Blanchard, Cendrine Dargnat, Karen Larcher-Tiphagne, and Marc Chevreuil. 2007. 'Occurrence of Phthalate Diesters in Rivers of the Paris District (France)'. *Hydrological Processes* 21 (18): 2515–25. doi:10.1002/hyp.6484.
- Thévenot, Daniel R., Régis Moilleron, Laurence Lestel, Marie-Christine Gromaire, Vincent Rocher, Philippe Cambier, Philippe Bonté, Jean-Louis Colin, Claire de Pontevès, and Michel Meybeck. 2007. 'Critical Budget of Metal Sources and Pathways in the Seine River Basin (1994–2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn'. *Science of The Total Environment* 375 (1–3): 180–203. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.008.
- Tlili, Khawla. 2011. 'Contamination de L'environnement Francilien Par Les Ethers de Biphényle Polybromés (PBDE) : Impact Sur La Qualité de L'atmosphère et Des Écosystèmes Aquatiques'.
- Tran, Bich Chau, Marie Jeanne Teil, Martine Blanchard, Fabrice Alliot, and Marc Chevreuil. 2015. 'BPA and Phthalate Fate in a Sewage Network and an Elementary River of France. Influence of Hydroclimatic Conditions'. *Chemosphere* 119: 43–51. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.04.036.
- Zgheib, Sally, Régis Moilleron, and Ghassan Chebbo. 2012. 'Priority Pollutants in Urban Stormwater: Part 1 – Case of Separate Storm Sewers'. *Water Research* 46 (20): 6683–92. doi:10.1016/j.watres.2011.12.012.