

L'agglomération parisienne par le prisme de ses eaux usées

Régis Moilleron & Julien Le Roux

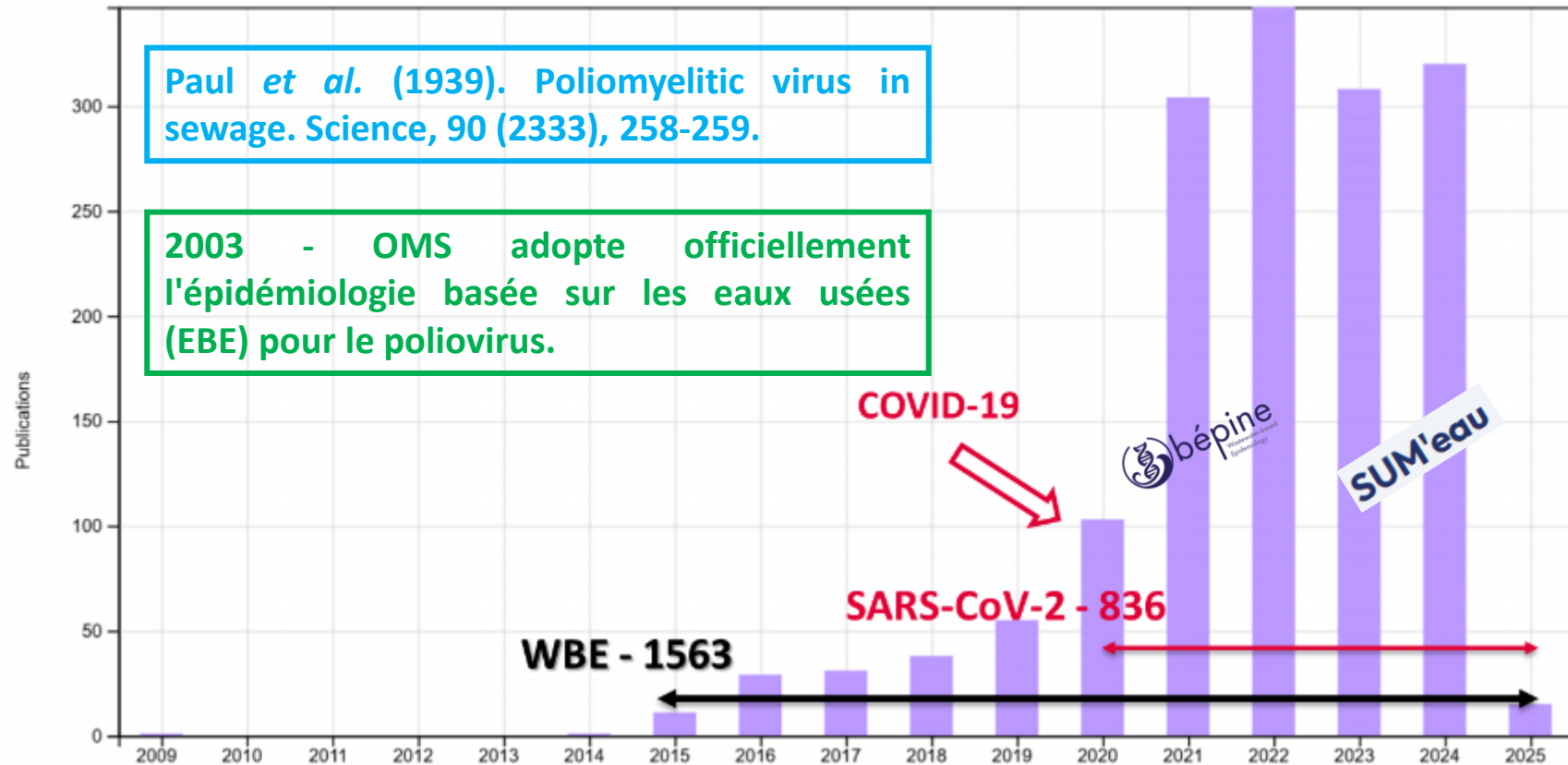


Préambule

Les eaux usées : marqueur de l'exposition ?

Wastewater-based epidemiology (WBE) -> Wastewater-based surveillance

Concept proposé initialement par Daughton (2001) pour les drogues illicites



Daughton (2001) Illicit drugs in municipal sewage. Proposed new nonintrusive tool to heighten public awareness of societal use of illicit abused drugs and their potential for ecological consequences, in: Christian G. Daughton, Tammy L. Jones-Lepp (Editors), Book Pharmaceuticals and Care Products in the Environment, 2001, pp. 348e364

Wastewater-based epidemiology

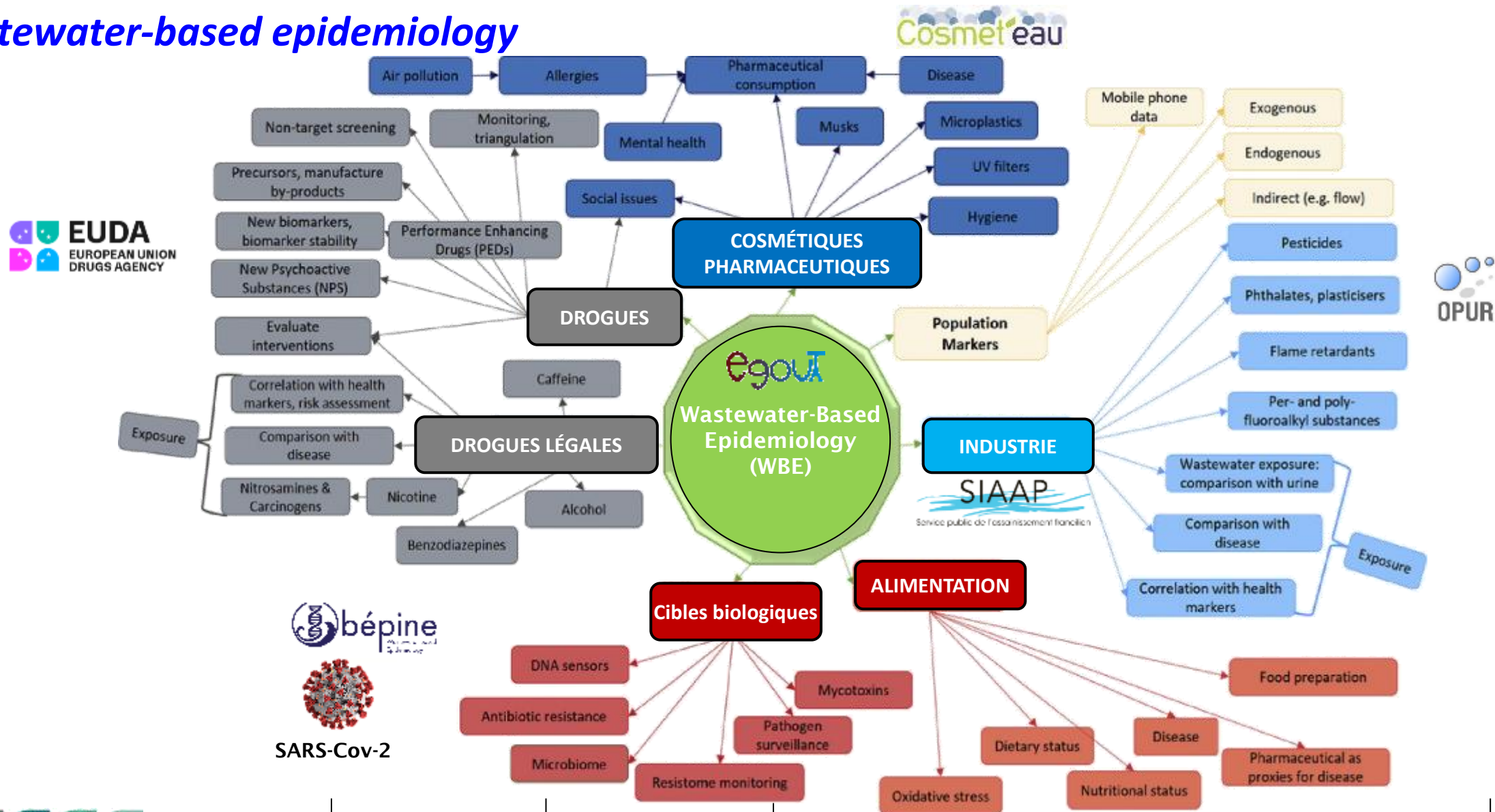
Apports (Choi et al., 2018)

Caractérisation des **eaux usées** pour déterminer la **consommation de produits chimiques** ou **d'agents pathogènes**, ou **l'exposition à ceux-ci**, dans une population donnée :

- **drogues licites** (caféine, alcool, tabac) ou **illicites** (cannabis, amphétamines...)
- **médicaments** (antidépresseurs, antihistaminiques, etc.)
- **produits de soins corporels** (parabènes, filtres UV, biocides)
- **Virus - SARS-CoV-2** dans les eaux usées (Australie, Japon, Amérique du Nord, France : réseau OBEPINE)
- ...

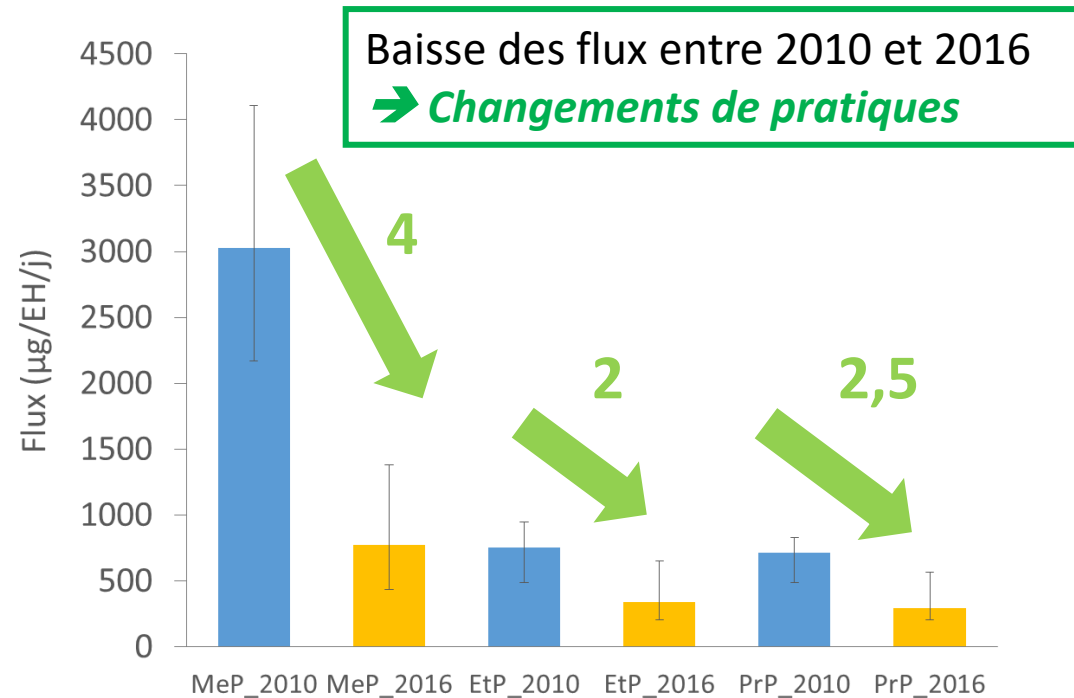
Préambule

Wastewater-based epidemiology



Les eaux usées miroir de nos pratiques

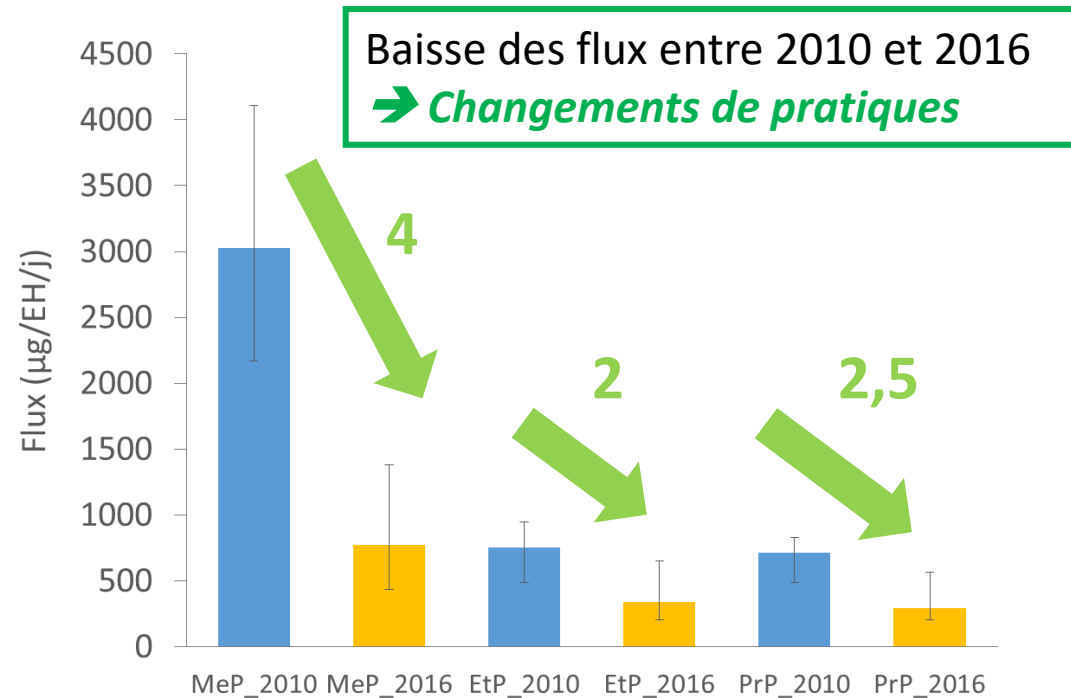
Flux de parabènes dans les eaux usées : 2010 vs. 2016



Flux en parabènes (Geara-Matta, 2012 ; Cosmet'eau 2018)

Les eaux usées miroir de nos pratiques

Flux de parabènes dans les eaux usées : 2010 vs. 2016



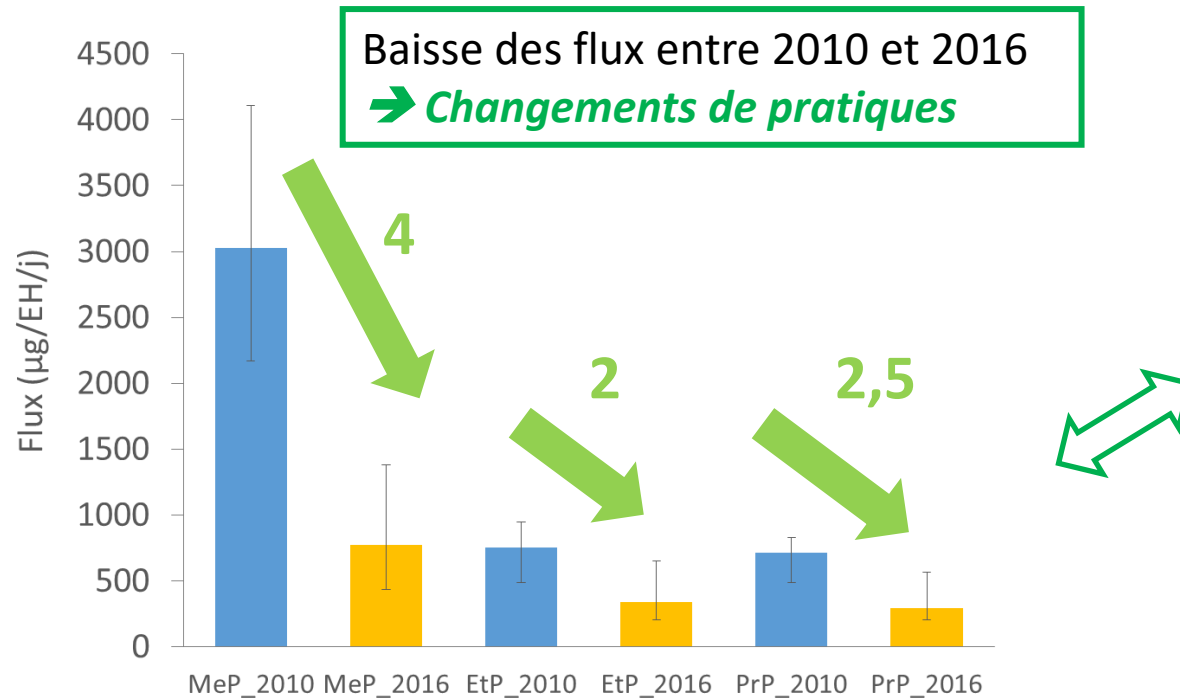
Flux en parabènes (Geara-Matta, 2012 ; Cosmet'eau 2018)

ENVOYÉ
SPECIAL
2005

Lanceurs d'alerte...
Réponse(s) des industriels
→ nouvelles formulations
→ substitution
... aucune action publique

Les eaux usées miroir de nos pratiques

Flux de parabènes dans les eaux usées : 2010 vs. 2016



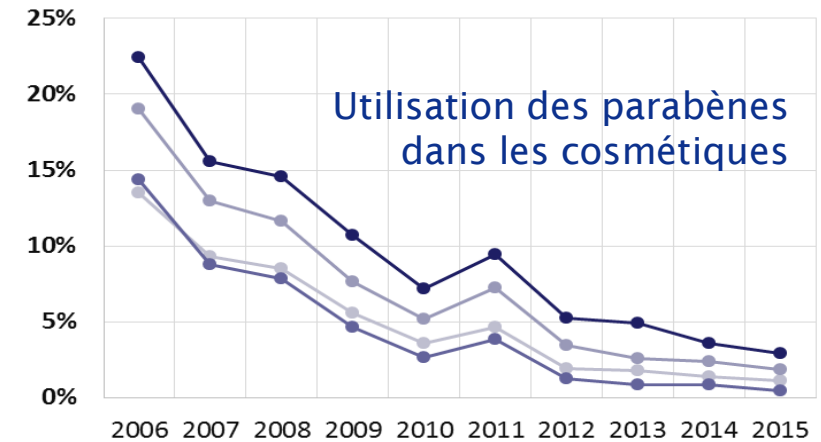
Flux en parabènes (Geara-Matta, 2012 ; Cosmeteau 2018)

ENVOYÉ
SPECIAL
2005

Lanceurs d'alerte...
Réponse(s) des industriels
→ nouvelles formulations
→ substitution
... aucune action publique



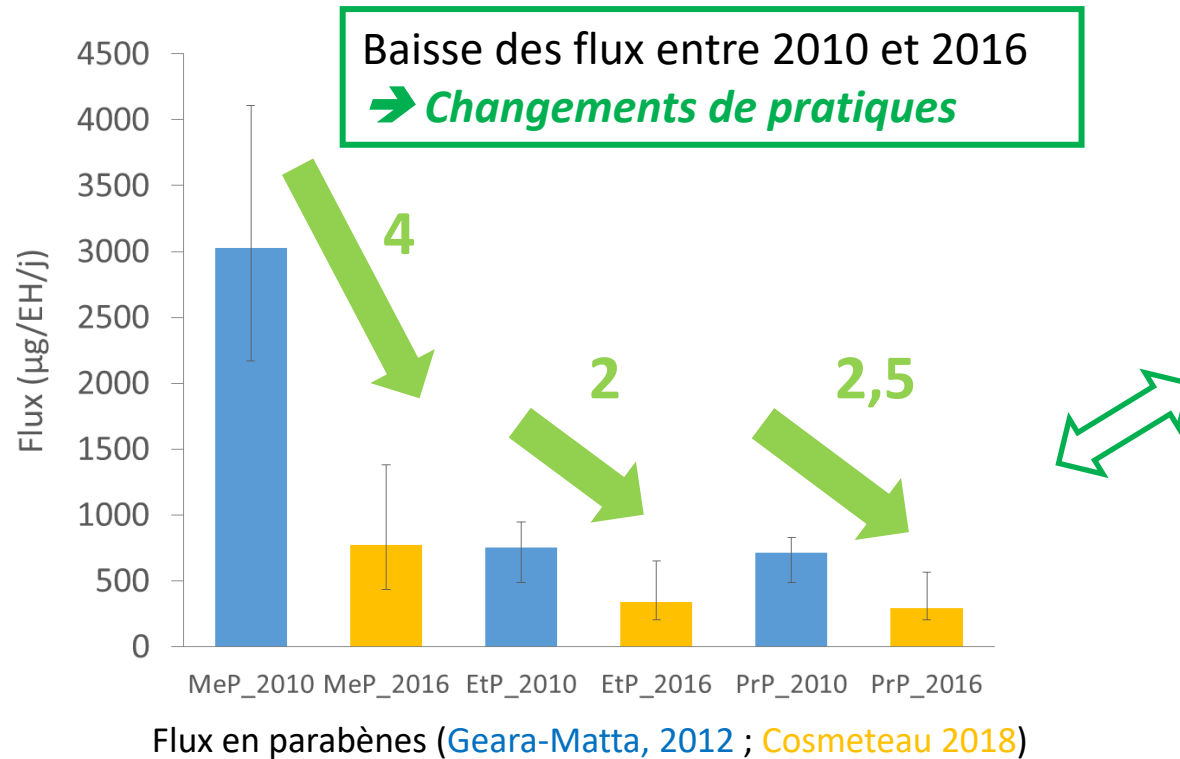
Changement de formulation



Préambule

Les eaux usées miroir de nos pratiques

Flux de parabènes dans les eaux usées : 2010 vs. 2016

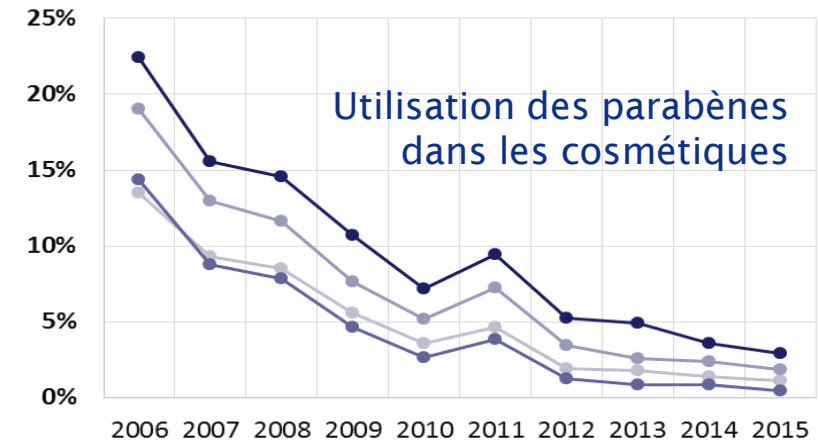


ENVOYÉ
SPECIAL
2005

Lanceurs d'alerte...
Réponse(s) des industriels
→ nouvelles formulations
→ substitution
... aucune action publique



Changement de formulation

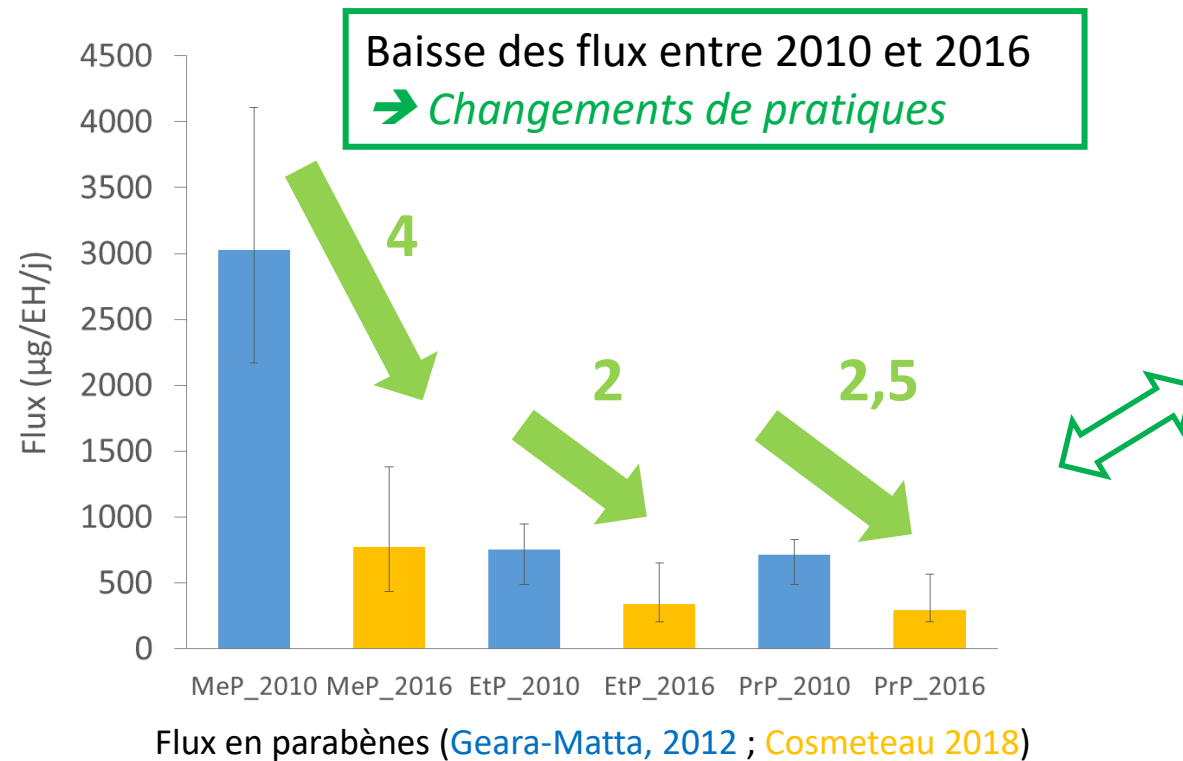


Les pratiques de consommation

- un levier d'action pour la réduction à la source des micropolluants
- Choix éclairé...

Les eaux usées miroir de nos pratiques

Flux de parabènes dans les eaux usées : 2010 vs. 2016

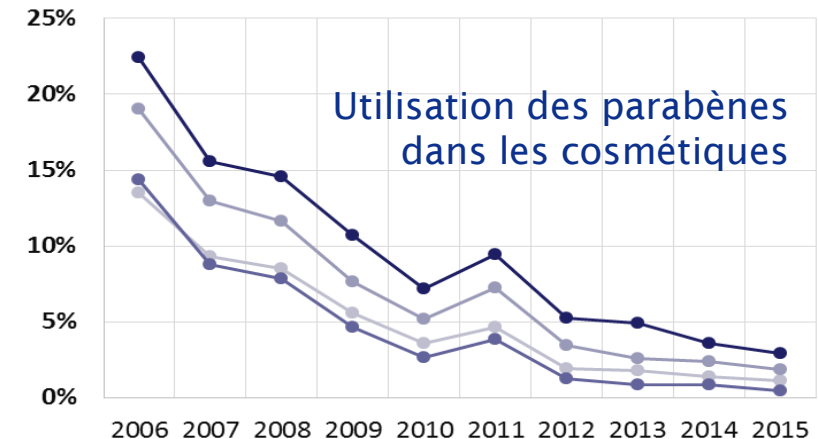


ENVOYÉ
SPECIAL
2005

Lanceurs d'alerte...
Réponse(s) des industriels
→ nouvelles formulations
→ substitution
... aucune action publique

11/03/2026

Changement de formulation



Les pratiques de consommation

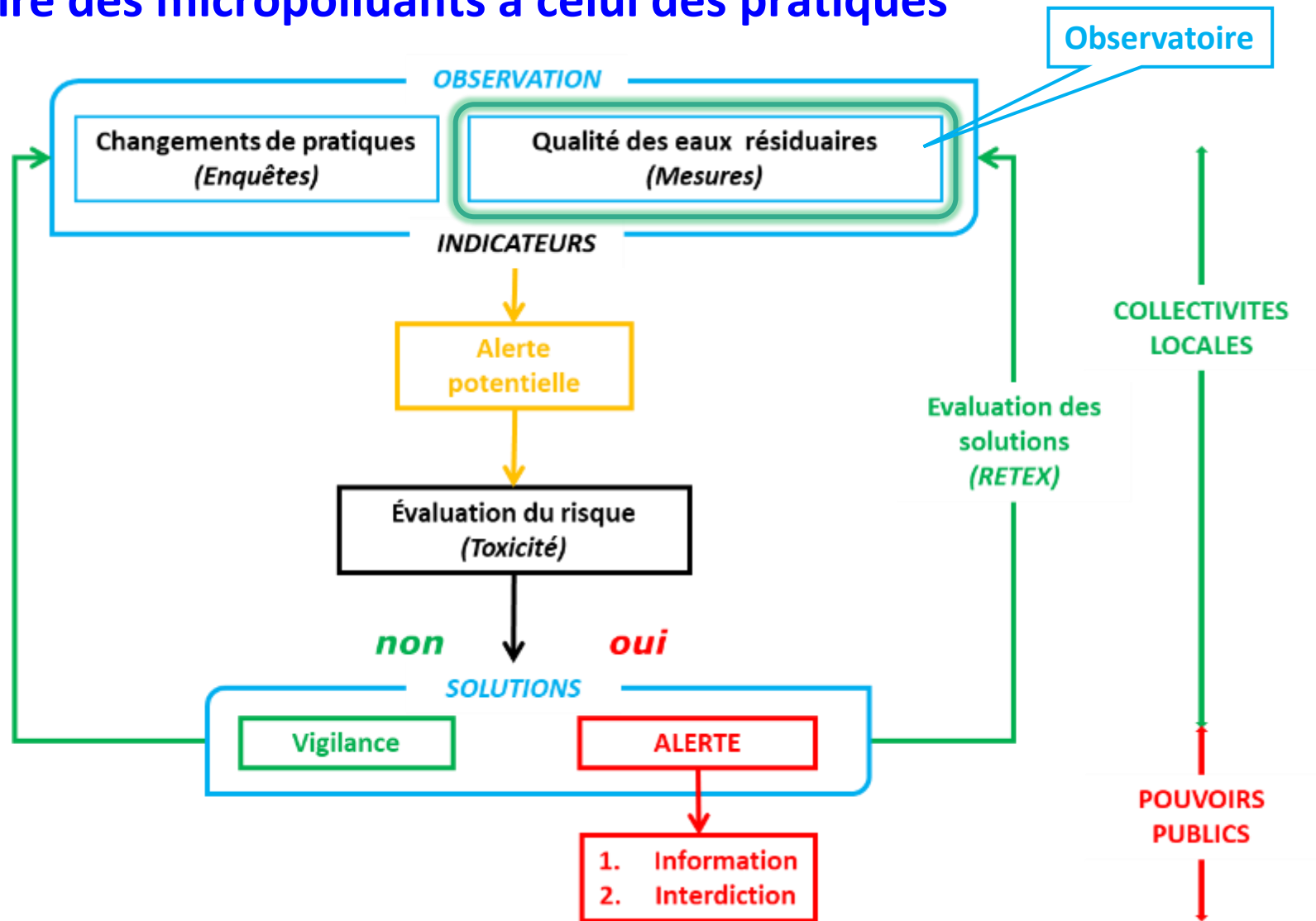
- un levier d'action pour la réduction à la source des micropolluants
- Choix éclairé...

Mais...

- *Etat de référence postérieur au changement de pratique (2010) !*
- *Besoin d'un observatoire*

Vers un observatoire des pratiques

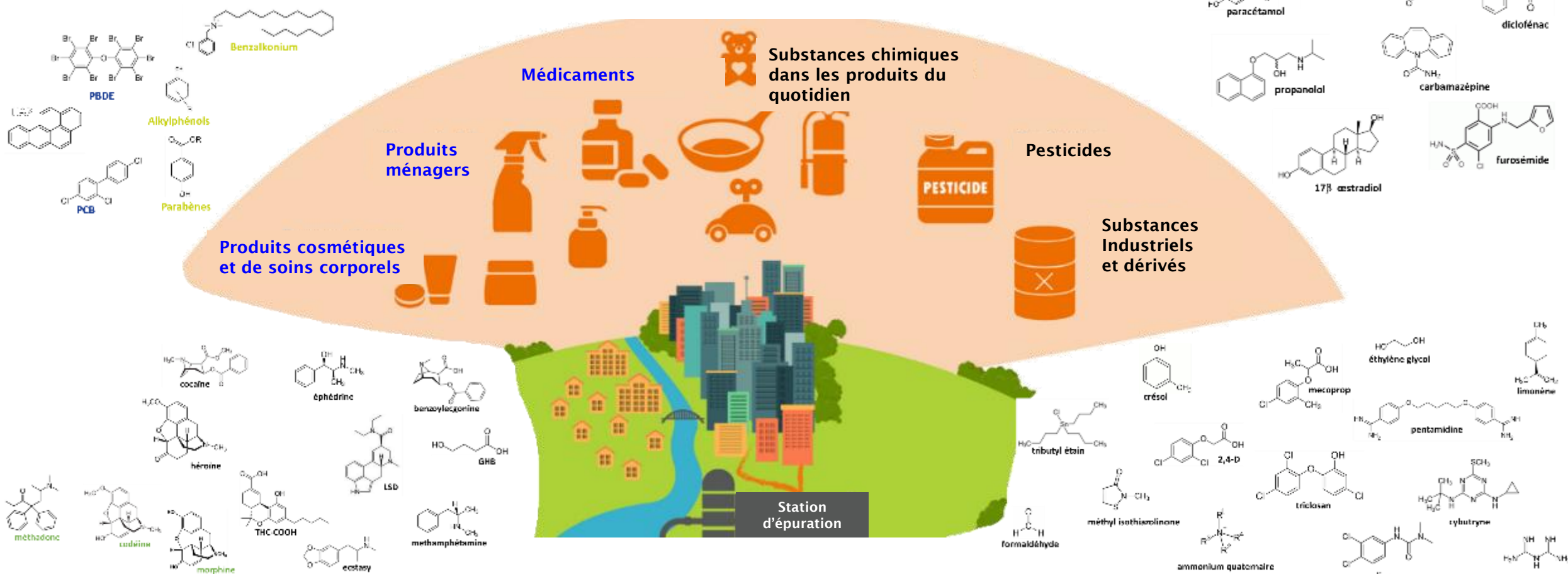
De l'observatoire des micropolluants à celui des pratiques



Vers un observatoire des pratiques

Origines des micropolluants en milieu urbain

Un *large éventail* de sources... une *diversité* de *familles chimiques* aux *propriétés physico-chimiques différentes*



Adapté de Undeman *et al.* (2022) Micropollutants in urban wastewater: large-scale emission estimates and analysis of measured concentrations in the Baltic Sea catchment. Marine Pollution Bulletin 178 (2022): 113559.

Vers un observatoire des pratiques

Origines des micropolluants en milieu urbain

Des sources... diversifiées

PRODUITS PHARMACEUTIQUES



DROGUES ILLÉGALES



ADDITIFS DES PLASTIQUES



MÉTAUX LOURDS



PRODUITS DE SOINS CORPORELS



EDULCORANTS



BIOCIDES ET PESTICIDES



HYDROCARBURES
AROMATIQUES
POLYCYCLIQUES

DÉTERGENTS



AGENTS COMPLEXANTS



RETARDATEURS DE FLAMME



SUBSTANCES À EFFET
HORMONAL



INHIBITEURS DE CORROSION



PRODUITS DÉPERLANTS



POLLUANTS
ORGANIQUES
PERSISTANTS



Vers un observatoire des pratiques

Micropolluants en milieu urbain

Leur suivi dans les eaux usées

- Deux approches possibles

**+100 000 substances
micropolluants de l'eau**



**26865 enregistrées
sur marché européen**

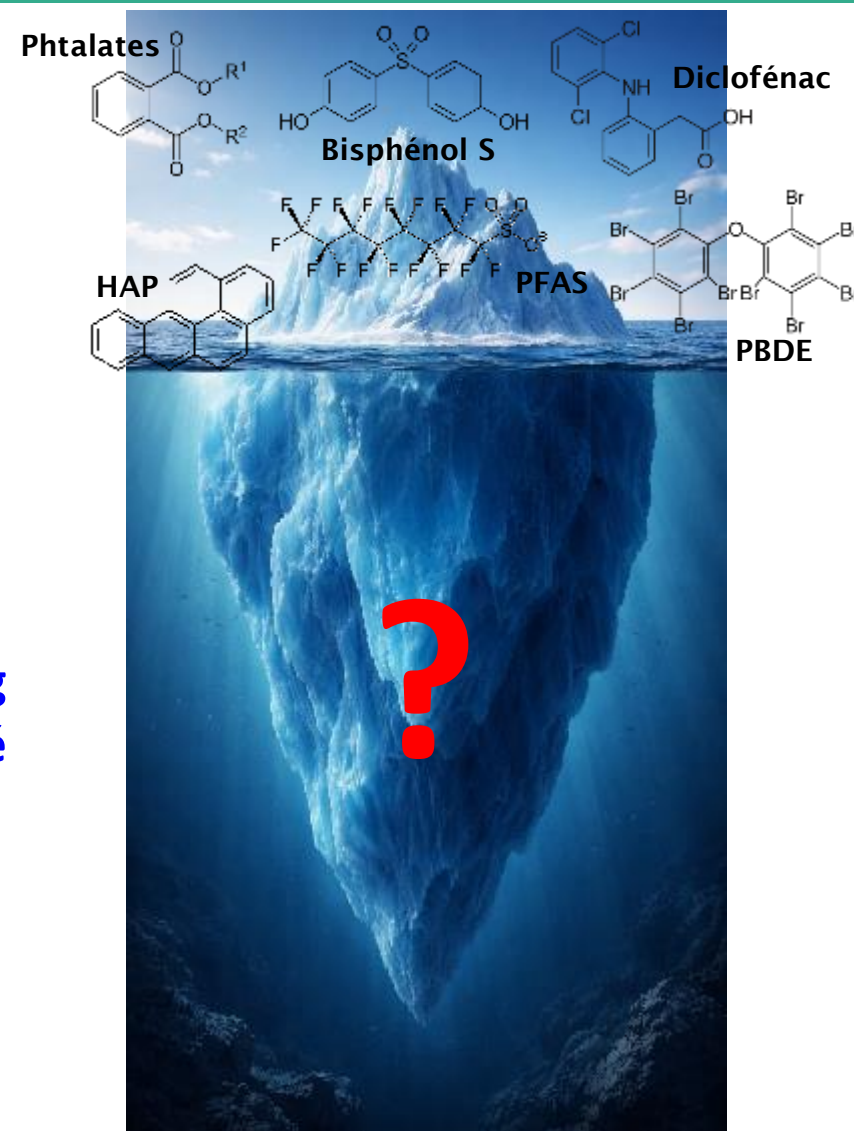


Screening
ciblé

Screening
non-ciblé

Par spectrométrie de masse
haute résolution (HRMS)

Identification de composés
émergents ?
Tendances temporelles ?



Iceberg @ChatGPT

Vers un observatoire des pratiques

Observatoire de la ville

Présentation

- Créer en **2020** pour **10 ans** (SIAAP)
- Deux matrices suivies mensuellement

- **Eaux usées** (Clichy)
- **Boues** (Seine Aval)

- **Screening ciblé**

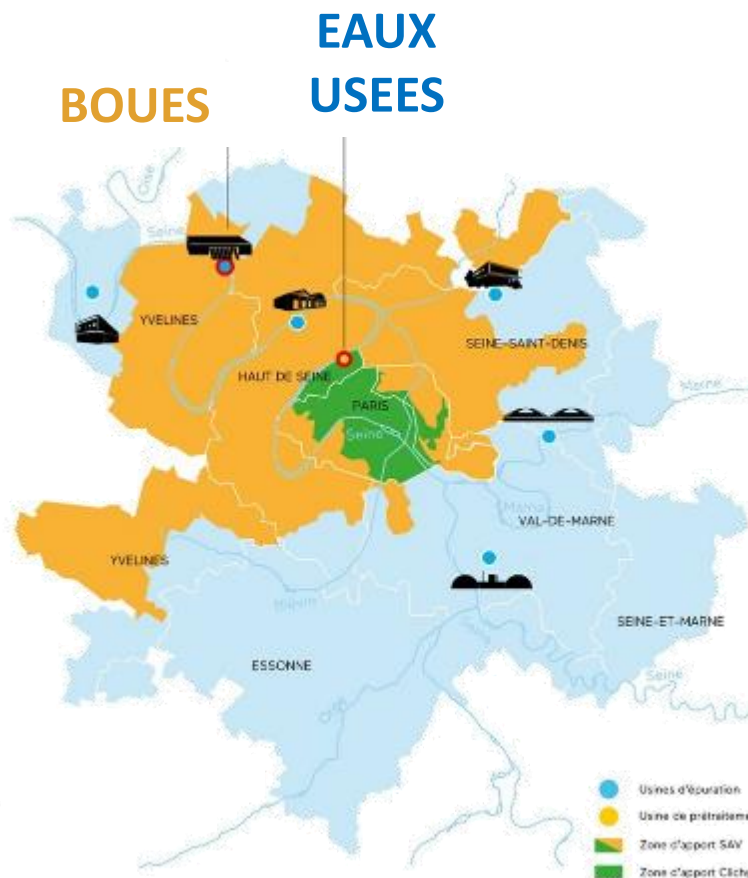
- **Micropolluants** (x 65)
 - Pesticides
 - Biocides
 - Produits de soins corporels
 - ...

- **Pathogènes** (x 7)
- **Virus** (x 15)

- **Screening non-ciblé**

- **Echantillothèque**

Laboratoires
accrédités



Publications

Viveros, M. L., Azimi, S., Vulliet, E., Le Roux, J., Moilleron, R., & Rocher, V. (2022). Long-term observation of the end-of-treatment sludge quality from a Parisian WWTP treating wastewater from 6.5 M inhabitants [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6724911>

Viveros, M. L., Azimi, S., Vulliet, E., Le Roux, J., Moilleron, R., & Rocher, V. (2022). Long-term observation of the wastewater from the Parisian conurbation [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6725353>

Viveros, M. L., Azimi, S., Vulliet, E., Le Roux, J., Moilleron, R., & Rocher, V. (2023). OBSERVER LA VILLE PAR LE PRISME DES EAUX USEES Présentation de l'Observatoire mis en œuvre par le SIAAP en Ile de France. TSM. Techniques Sciences Méthodes–Génie urbain, génie rural, 4, 13-19

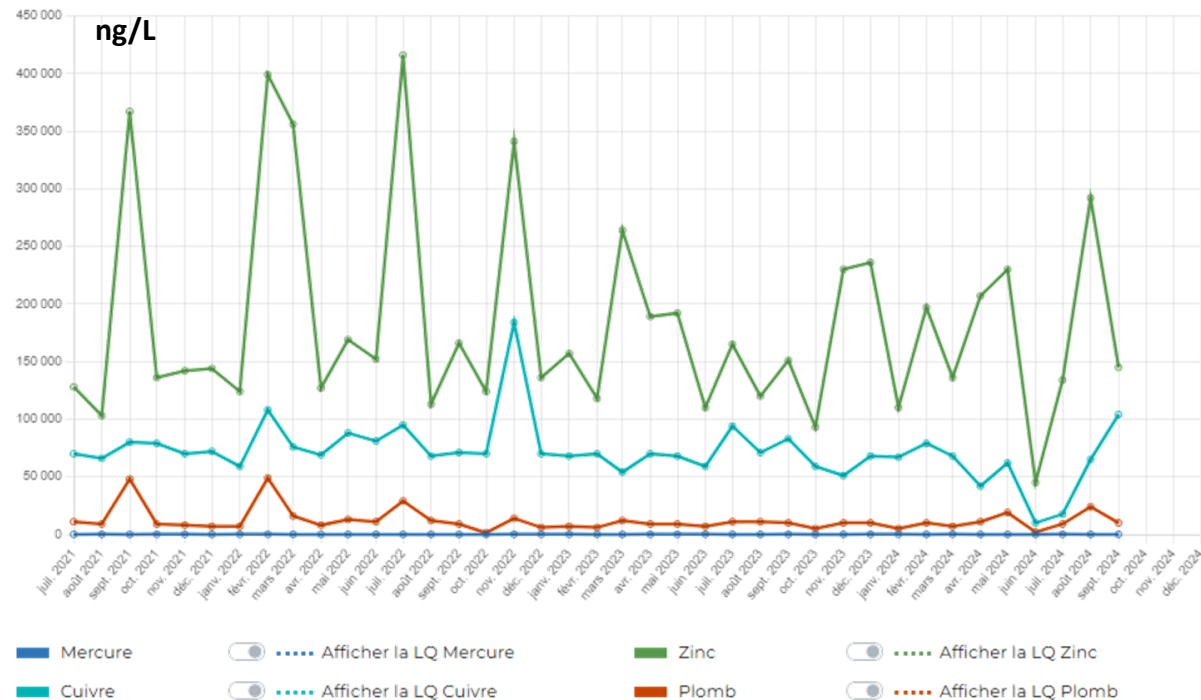
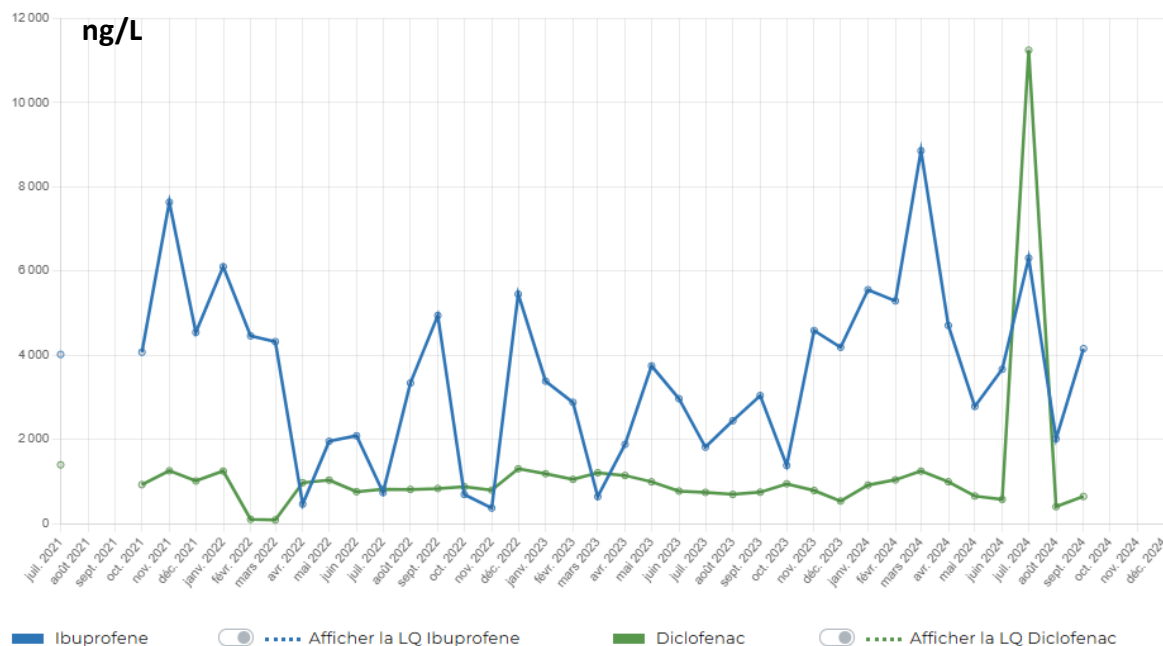
Cluzel, N., Thiebault, T., Maday, Y., Maréchal, V., Naji, A., Almayrac, J.-L., Le Roux, J., Vulliet, E., Moilleron, R., Guerin S., Rocher, V. (2026). Long-term monitoring through a wastewater based Observatory to model urban population dynamics and health indicators, Science of the Total Environment, *acceptée*.

Vers un observatoire des pratiques

Observatoire de la ville

Les données

- En accès libre : <https://inneauvation.fr/decouvrir-inneauvation/observatoires-environnementaux/observatoire-ville>

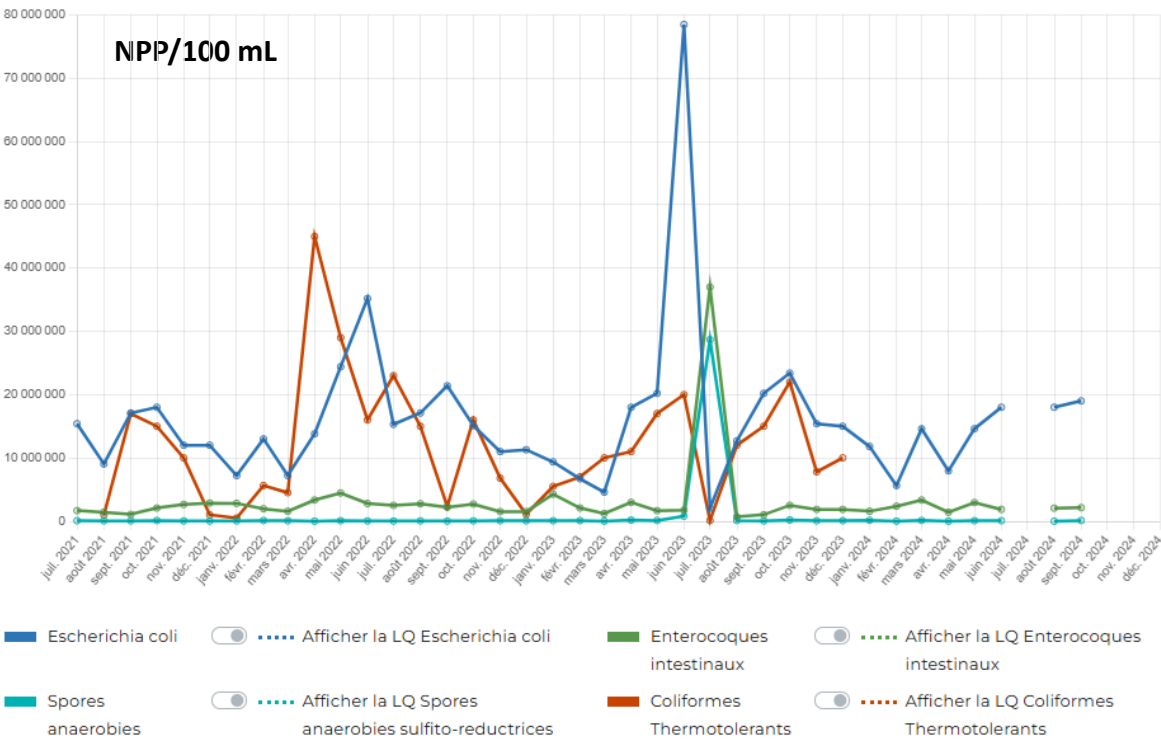
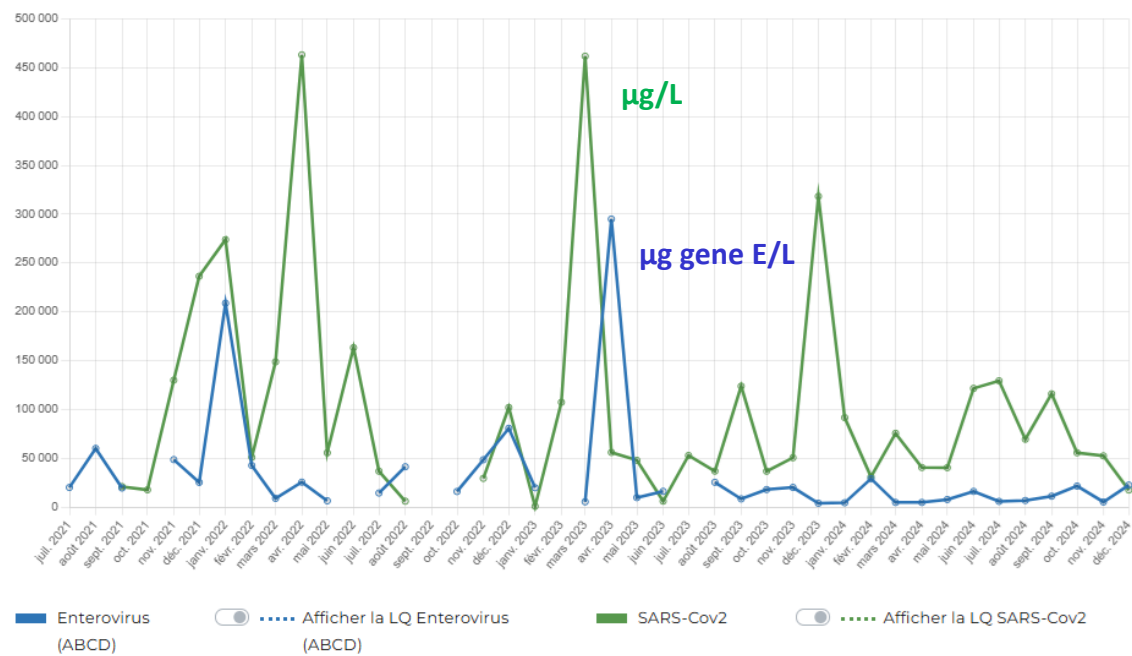


Vers un observatoire des pratiques

Observatoire de la ville

Les données

- En accès libre : <https://inneauvation.fr/decouvrir-inneauvation/observatoires-environnementaux/observatoire-ville>



De la mesure des concentrations à l'exposition environnementale

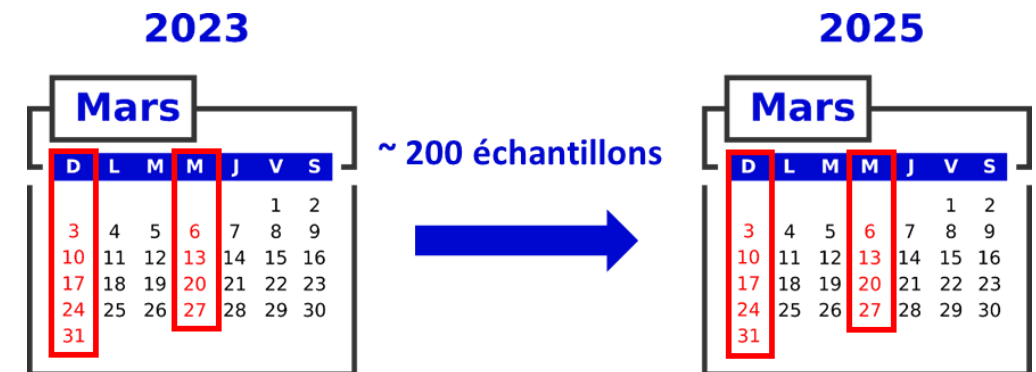
Thèse G. Bernier-Turpin

Objectif

Mise en place d'un observatoire des pratiques de consommation, basé sur les mesures réalisées dans les eaux usées **mais...** à une fréquence d'échantillonnage plus élevée

Stratégie

- Fréquence bi-hebdomadaire sur 2 ans
- ➔ Variabilité hebdomadaire et saisonnière
- Prélèvement asservi au débit pour former un échantillon composite sur 24h



De la mesure des concentrations à l'exposition environnementale

Thèse G. Bernier-Turpin

Les molécules suivies

Analyses ciblées → Quantification

Produits pharmaceutiques (32 composés)

→ Proxy des pathologies associées (maladies cardiovasculaires, antidépresseurs, AINS, etc.)

Substances illicites (15 composés)

→ Cocaïne, cannabis, diverses drogues de synthèses

« *Consommations diverses* » (27 composés)

→ Alcool, café, tabac

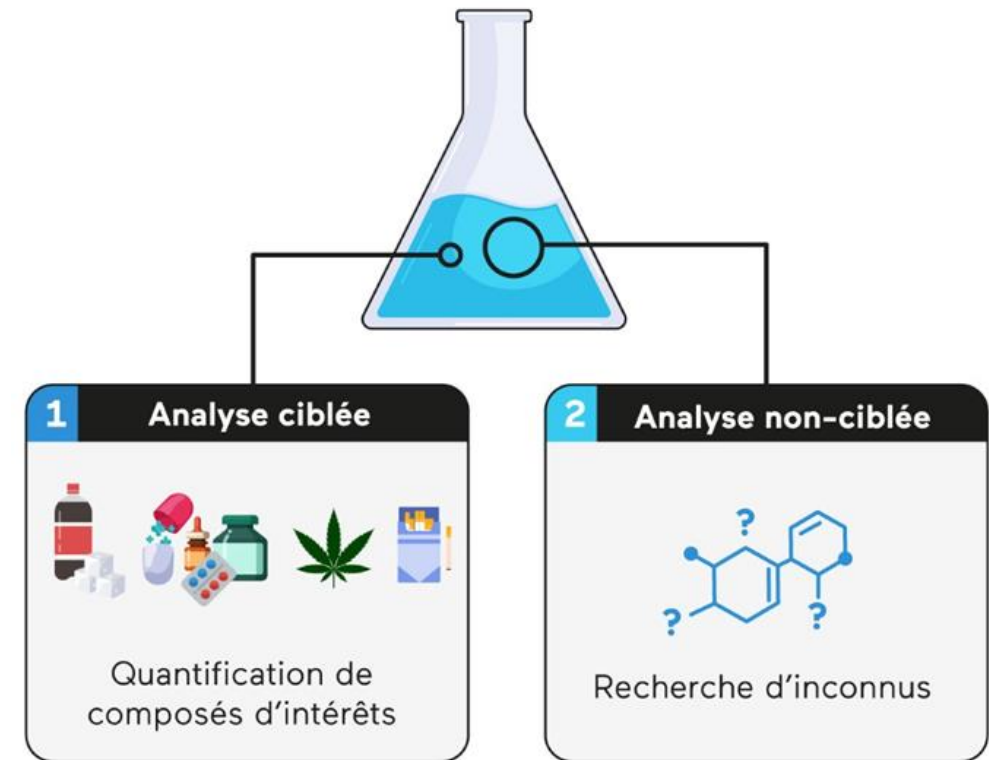
→ Edulcorants

→ Marqueurs du bol alimentaire (fibres, vitamines...)

→ **Pas de marqueurs viraux**

Analyses non-ciblées → Identification

Une seule méthode analytique !



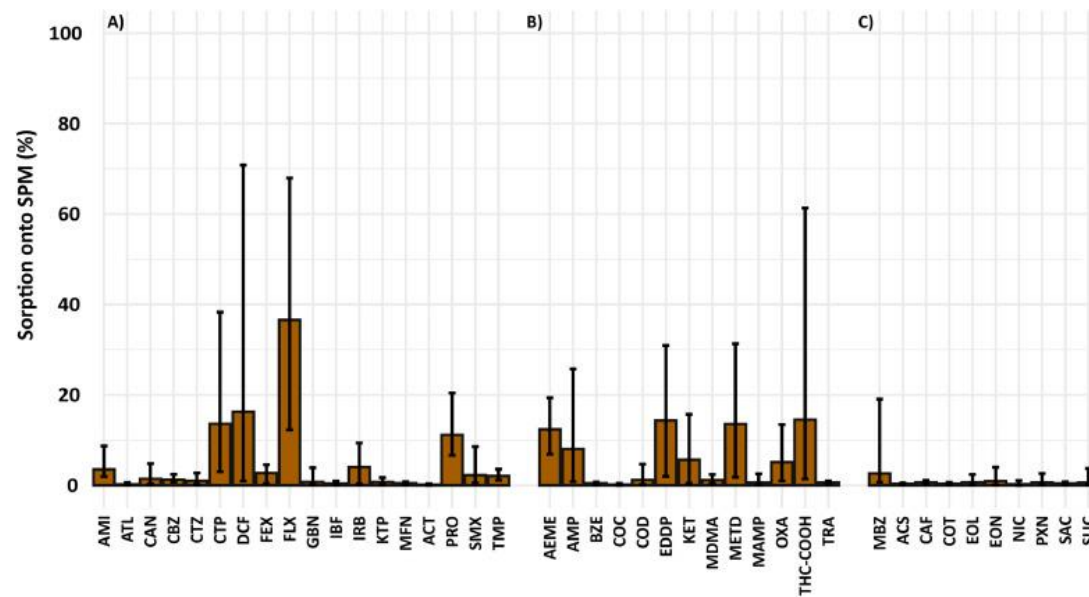
© SIAAP, Capsule 2 min pour découvrir

De la mesure des concentrations à l'exposition environnementale

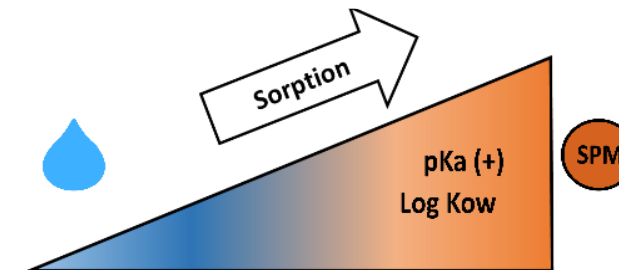
Thèse G. Bernier-Turpin – Résultats

Répartition Dissous – Particulaire dans les MES (n = 58)

Teneur dans les MES (n = 58)



$$\% = \frac{\text{Particulaire}}{\text{Dissous} + \text{Particulaire}}$$



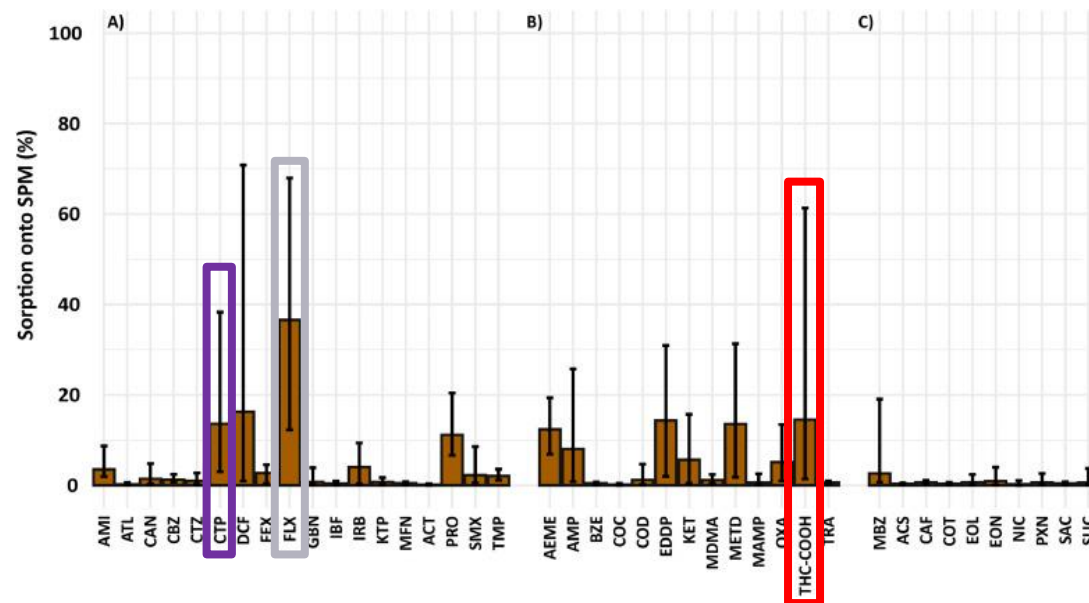
- L'affinité reste **modérée (< 5%)** pour la plupart des composés → Propriétés plutôt **hydrophiles**

De la mesure des concentrations à l'exposition environnementale

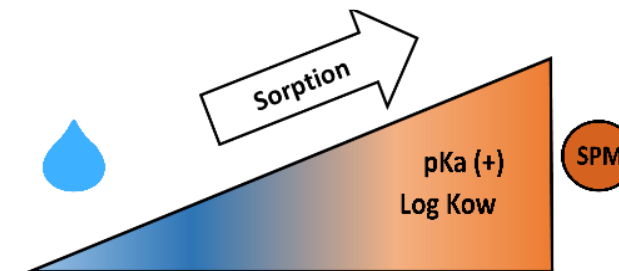
Thèse G. Bernier-Turpin – Résultats

Répartition Dissous – Particulaire dans les MES (n = 58)

Teneur dans les MES (n = 58)



$$\% = \frac{\text{Particulaire}}{\text{Dissous} + \text{Particulaire}}$$



Bernier-Turpin et al., 2025

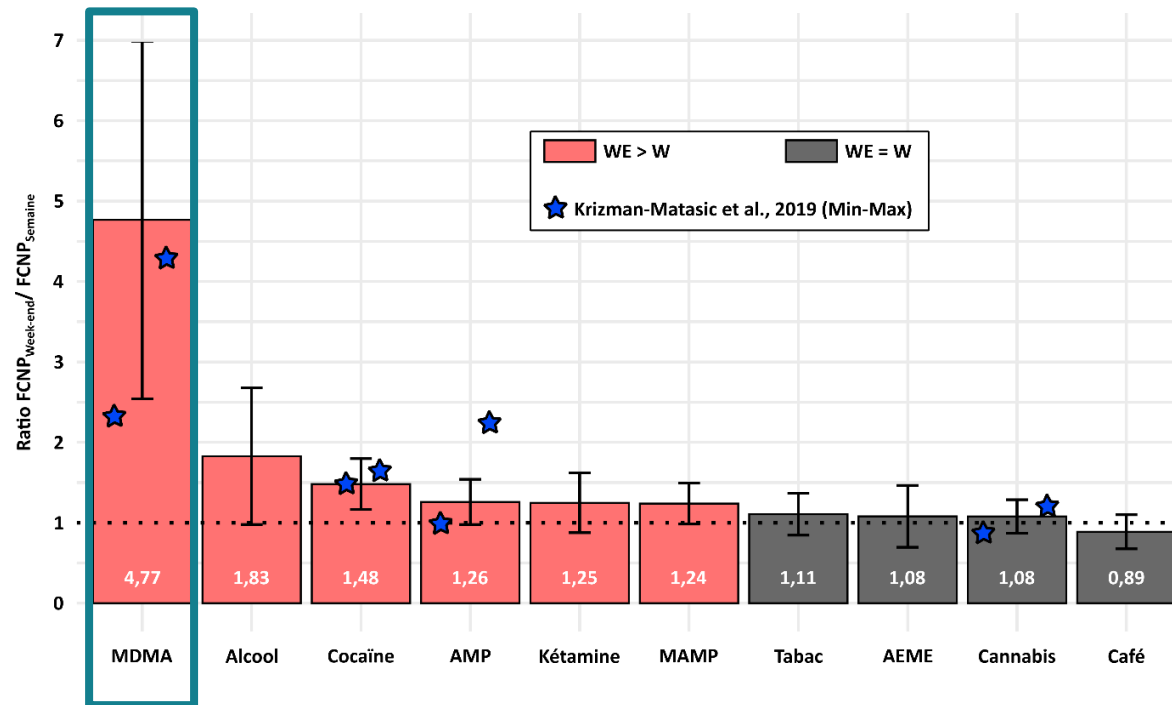
- L'affinité reste **modérée (< 5%)** pour la plupart des composés → Propriétés plutôt **hydrophiles**
- Non-négligeable pour certains composés plus **hydrophobes** ou **positivement chargés**

Conclusion : prise en compte du **% particulaire (médian)** dans l'estimation des usages

De la mesure des concentrations à l'exposition environnementale

Thèse G. Bernier-Turpin – Résultats

Usages liés aux substances illicites : apports de la WBE

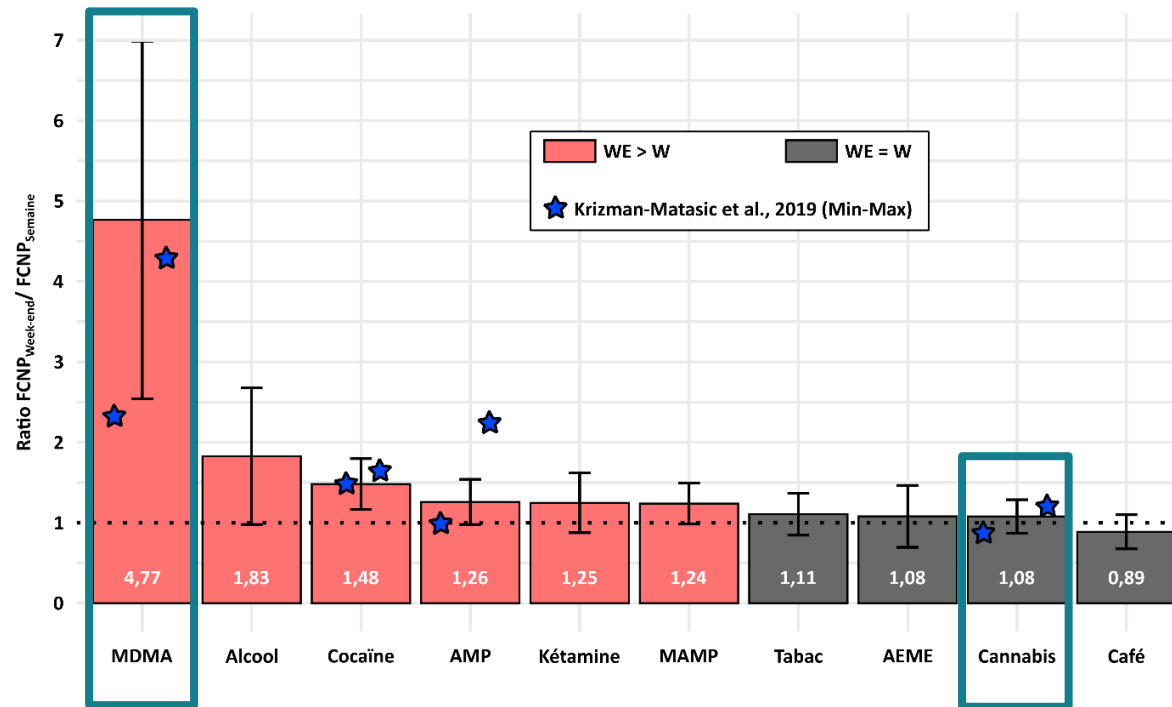


MDMA : usage plus prononcé le week-end → Pratique récréative

De la mesure des concentrations à l'exposition environnementale

Thèse G. Bernier-Turpin – Résultats

Usages liés aux substances illicites : apports de la WBE



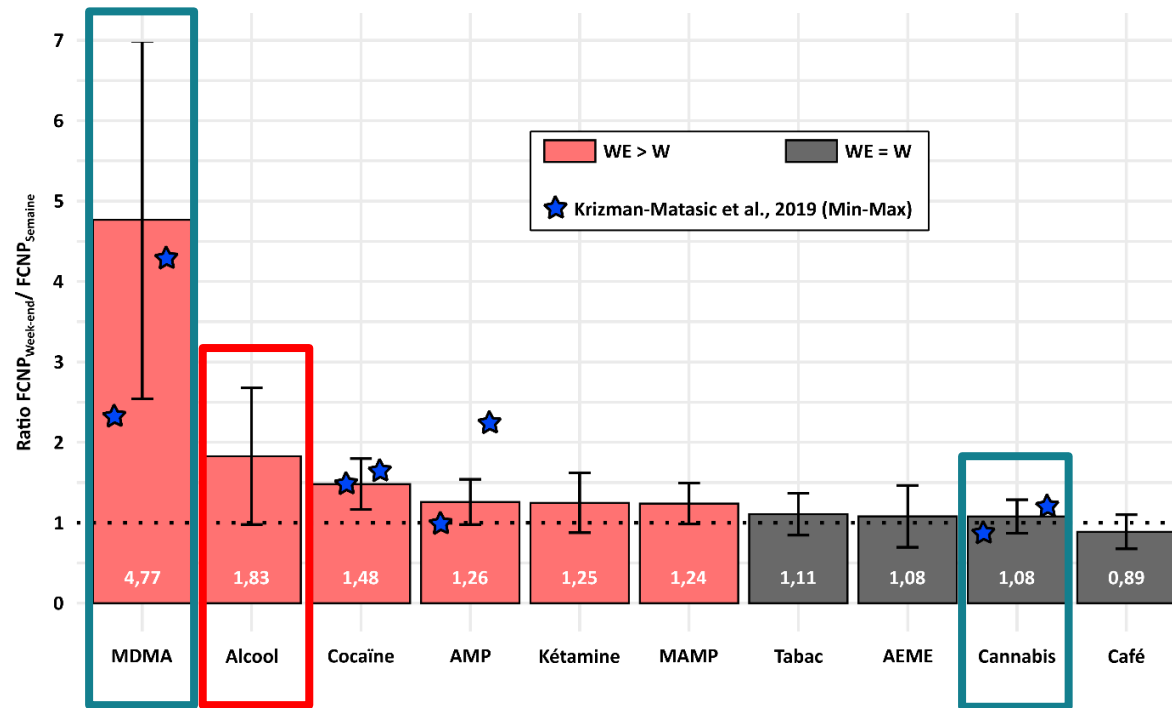
MDMA : usage plus prononcé le week-end → Pratique récréative

Cannabis : usage stable → Pratique ancrée dans le quotidien

De la mesure des concentrations à l'exposition environnementale

Thèse G. Bernier-Turpin – Résultats

Usages liés aux substances illicites : apports de la WBE



MDMA : usage plus prononcé le week-end → Pratique récréative

Cannabis : usage stable → Pratique ancrée dans le quotidien

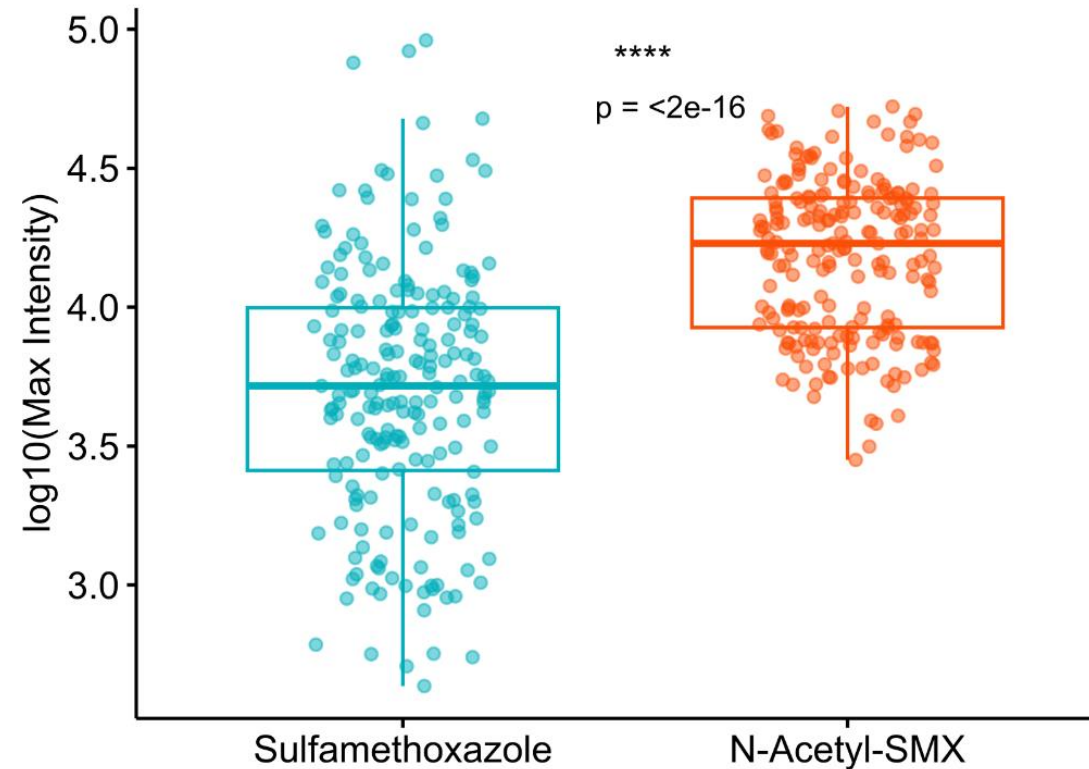
Pas exclusif aux substances illicites : **consommation d'alcool**

Vers un observatoire des pratiques

Observatoire de la ville

*Les données d'analyses non-ciblées : recherche de **produits de dégradation** / **métabolites***

Signaux du
sulfaméthoxazole et de son
PT (N-acetyl-
sulfaméthoxazole) dans
276 échantillons d'eaux
usées brutes issus de
l'Observatoire de la Ville

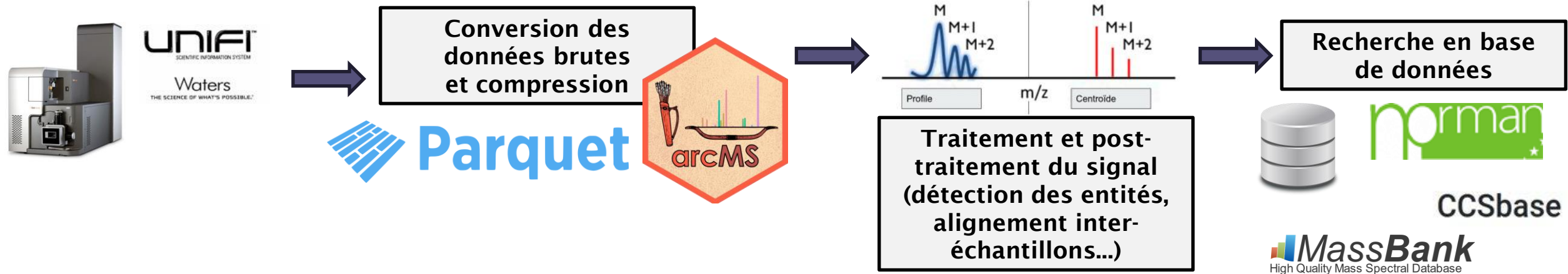


Mais **différentes ionisations**
= intensités **pas** directement
comparables

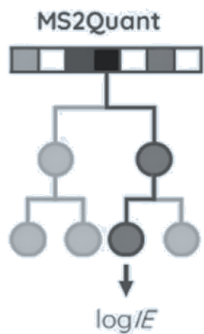
Vers un observatoire des pratiques

Observatoire de la ville

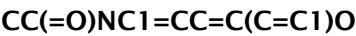
Les données d'analyses non-ciblées : Développement d'outils informatiques (thèse J. Sade)



Estimation de l'efficacité d'ionisation et quantification de la concentration : MS2Quant (Sepman et al. 2023, Analytical Chemistry)



Code SMILES des molécules :



Identification

Matching_Molecule	csc	Matching_Adduct	Matching_Formula	Matching_SMI
Amisulpride	187	[M+H] ⁺	C17H27N3O4S	CCN1CCCC1CNC(=O)c1ccc(S(=O)(=O)CC)c1
Atenolol	163.6	[M+H] ⁺	C14H22N2O3	CC(C)NCC(=O)COC1CCC(C(N)=O)CC1
Caffeine	139.1	[M+H] ⁺	C8H10N4O2	Cn1c(=O)c2c(ncn2C)n(C)c1=O
Carbamazepine	150.2	[M+H] ⁺	C15H12N2O	NC(=O)N1c2cccc2C=CC2CCCC21
Clarithromycin	264.3	[M+H] ⁺	C38H69NO13	CC[C@H]1OC(=O)[C@H](C)[C@H](O)[C@H]2
Diclofenac	161	[M+H] ⁺	C14H11Cl2NO2	O=C(O)Cc1cccc1Nc1c(Cl)cccc1Cl
Irbesartan	202.3	[M+H] ⁺	C25H28N6O	CCCCC1=NC2(CCCC2)C(=O)N1Cc1ccc(-c2cc
Ketoprofen	172.2	[M+K] ⁺	C16H14O3	CC(C(=O)O)c1cccc(C(=O)c2cccc2)c1
Lidocaine	156.6	[M+H] ⁺	C14H22N2O	CCN(CC)CC(=O)Nc1c(C)cccc1C
Naproxen	149.7	[M+H] ⁺	C14H14O3	COc1ccc2cc([C@H](C)C(=O)O)ccc2c1
Sulfadiazine	151	[M+H] ⁺	C10H10N4O2S	Nc1ccc(S(=O)(=O)Nc2nccn2)cc1
Sulfamethoxazole	152.1	[M+H] ⁺	C10H11N3O3S	Cc1cc(NS(=O)(=O)c2ccc(N)cc2)no1
Trimethoprim	166.8	[M+H] ⁺	C14H18N4O3	COc1cc(Cc2cnc(N)nc2N)cc(OC)c1OC

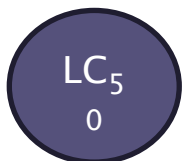
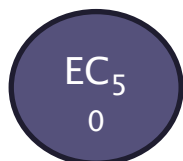
Vers un observatoire des pratiques

Observatoire de la ville

Les données d'analyses non-ciblées : bases de données de “suspects” à rechercher



- Masses exactes (m/z)
- Catégorie de la molécule
- Toxicité associée à la molécule (EC50, LC50 48h et 96h)



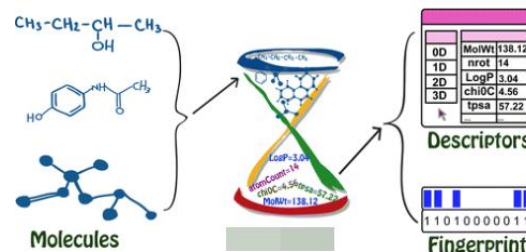
70k composés environnementaux

CCSbase



- CCS expérimentales
- CCS prédites

+



+



- Spectres MS/MS
2k molécules avec spectres

Niveau 1 : 146 composés
Niveau 2 : 2K composés

Vers un observatoire des pratiques

Observatoire de la ville

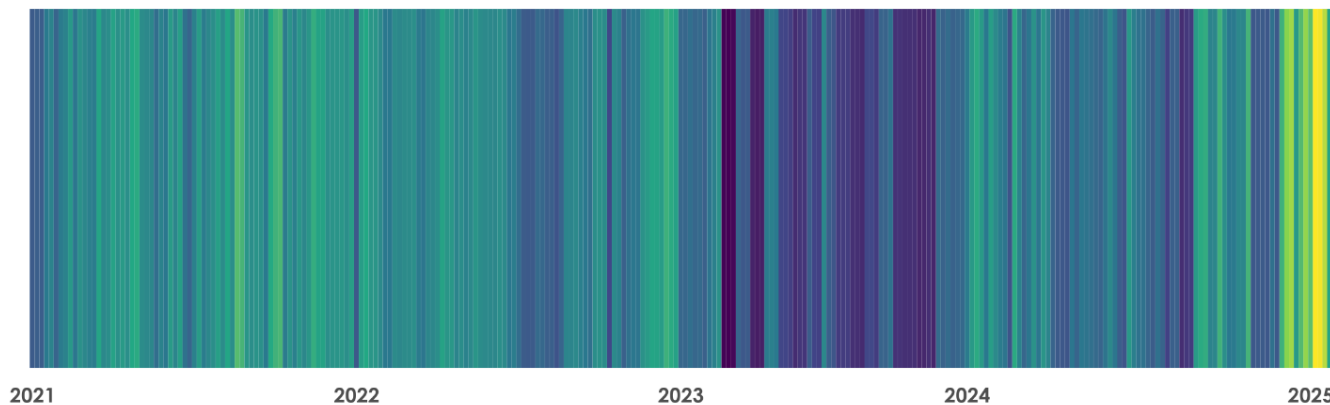
*Les données d'analyses non-ciblées : outils de recherche et de **visualisation rapides***

 **Parquet**

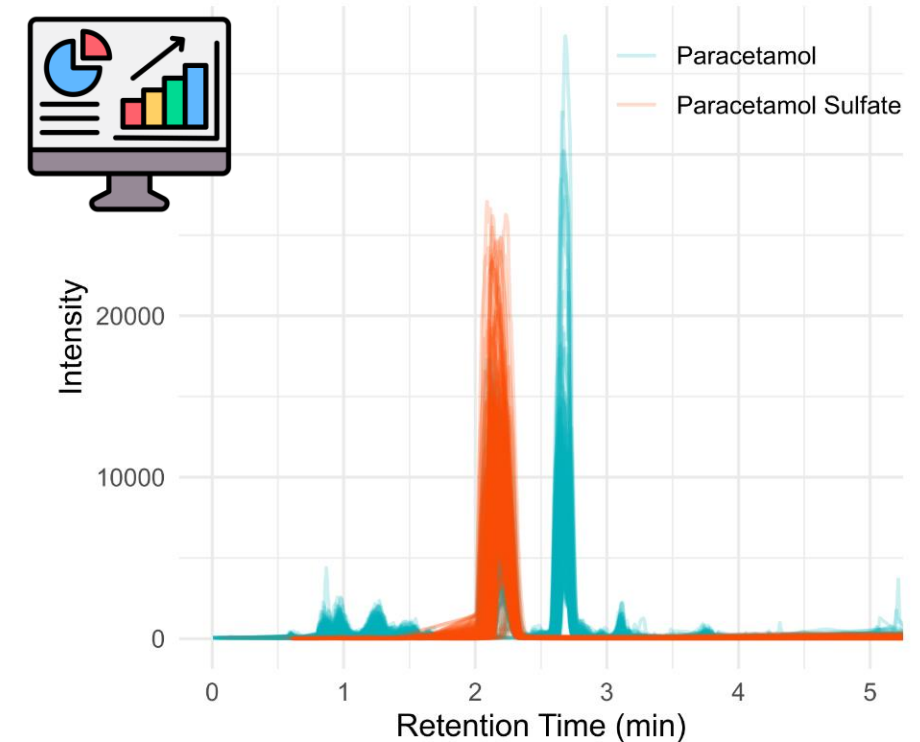
Base de **données
brutes** sur serveur



Accès rapide, en ligne,
recherches dans multiples
échantillons simultanés



Evolution de l'intensité du paracétamol (2021-2025)



Requêtes "live" et
tableaux de bord interactifs

Conclusion

Les eaux usées...

Comme reflet de nos pratiques et de nos expositions

Sans aucun doute ! Outil de surveillance et d'anticipation

- *Wastewater-based epidemiology* (drogues, produits pharmaceutiques, virus...)
 - Biomarqueurs : étendre à d'autres secteurs
- Projets de recherche – couplage avec les SHS
 - Cosmet'eau
 - ANR EGOUT, PEPR WHAOU

Institutions (suivi réglementaire)

- à la traîne
 - Logistique lourde
 - Coûts (d'échantillonnage, d'analyse, d'archivage des échantillons...)
- ... sauf en présence de forçage extérieur (crise du COVID-19)

Outil de gestion

- Pour les décideurs
 - Proposer de nouvelles politiques publiques en santé publique ou en environnement (traitement centralisé vs. réduction à la source)

Vérifier l'efficacité de des politiques publiques → besoin d'un état de référence

*Show me your wastewater and
I will tell you who you are*

