

ASTEE 96th Annual Conference – June 6 to 9, 2017

Liège, Belgique

Micropolluants & bio-surveillance

l'exemple de la Seine, de l'Escaut et
du projet DIADeM sur la Meuse

ASTEE 96th Annual Conference – June 6 to 9, 2017

Liège, Belgique

Ouverture *side-event*

Micropolluants & bio-surveillance

l'exemple de la Seine,
de l'Escaut et du projet
DIADeM sur la Meuse

Morgane PITEL

Présidente

EPAMA-EPTB Meuse

Brice LALONDE

Ancien Ministre, Président

Académie de l'Eau

Exposé introductif

Micropolluants :

- grandes familles, effets,
- biomarqueurs,
- bio-indicateurs,
- outils de bio-surveillance aquatique

Pierre ROUSSEL

Président

Office International de l'Eau



Les micropolluants

Pierre ROUSSEL

Président de l'Office International
de l'Eau



Merci à Yves Lévi

- A qui j'ai tout emprunté.



La contamination des ressources (1)



- L'eau est le réceptacle de la plupart des déchets.
- Ceux-ci contiennent de plus en plus de molécules pouvant être quasi indestructibles.
- Ainsi les ressources sont contaminées partout.
- Il s'ensuit des risques sanitaires parfois très graves.



La contamination des ressources (2)



- On sait de mieux en mieux détecter les contaminants.
- Mais on en détecte aussi de nouveaux (émergents).
- Sans oublier les métabolites de ces polluants.
- Il en va de même pour la microbiologie.
- La question des risques induits est donc particulièrement complexe.



La qualité de la ressource

- Une nécessité vitale.
- La protection de la ressource et des ouvrages est donc indispensable.
- Même si cela coûte très cher (ne rien faire serait encore plus cher).
- Sans oublier les effets du changement climatique (sécheresses, étiages).



Quantifier les risques

- Mesurer les expositions cumulées aux dangers et les rapprocher des pathologies connues.
- En déduire les risques.
- Opération très complexe, sans oublier les effets environnementaux.
- D'où des batteries d'essais, d'expertises, de publications...



Toujours mieux gérer

- On ne peut plus se cacher derrière « les doses sont trop faibles pour être dangereuses ».
- Il faut donc être très exigeant en termes de valeurs limites de rejet.
- D'où une complexification des STEP, qui doivent extraire beaucoup de molécules « nouvelles » ou « rares ».
- Que l'on ne doit pas non plus retrouver dans les boues.



Pour une prise en compte globale du problème

- Tout le cycle de l'eau est concerné et impactant.
- Du bassin versant au robinet.
- Du robinet au rejet dans le milieu naturel.
- De la ressource à l'irrigation.
- De la ressource à la baignade.
- Etc.



La nécessité de l'action préventive

- C'est la seule voie possible pour les pollutions diffuses (eaux pluviales, pollutions agricoles...).
- C'est la seule voie qui puisse vraiment protéger la ressource.
- C'est une tâche difficile et de longue haleine.



Mais le curatif reste indispensable

- Pour les pollutions concentrées.
- Pour la réutilisation des eaux usées traitées.
- Même s'il ne pourra jamais
« couvrir » l'ensemble du problème.



Merci de votre attention

www.oieau.fr

www.riob.org

DIADeM *le projet*

Un projet transfrontalier sur
le bassin de la Meuse
internationale :

**Développement d'une
approche intégrée pour le
diagnostic de la qualité des
eaux de la Meuse**

Alain GEFFARD

chef de file DIADeM

SEBIO - *Stress Environnementaux et
BIOsurveillance des milieux aquatiques*

Université Reims Champagne-
Ardenne (URCA)

Milieus aquatiques exutoires d'un grand nombre de contaminants en lien avec les activités anthropiques

Les stations d'épuration (STEP)

110 000 substances chimiques sur le marché communautaire.
Dont 3000 substances pharmaceutiques

STEP efficace pour l'élimination de la MO et macro-contaminants :
Résidus pharmaceutiques ?

**Services écosystémiques (Biodiversité, Potabilisation...)
des milieux récepteurs**

**Services écosystémiques (Biodiversité, Potabilisation...)
des milieux récepteurs**



Surveillance « efficace » des masses d'eau

Exposition

Approches analytiques
des contaminants



Effets/impacts

Approches biocénotiques
(diversité, fonction)

Dépasser les limites des approches actuelles

**Services écosystémiques (Biodiversité, Potabilisation...)
des milieux récepteurs**



Surveillance « efficace » des masses d'eau

Exposition

Approches analytiques
des contaminants



Effets/impacts

Approches biocénétiques
(diversité, fonction)

**Développer des indicateurs de toxicité au niveau individuel
prédictifs des effets écologiques (lien exposition-effet)**

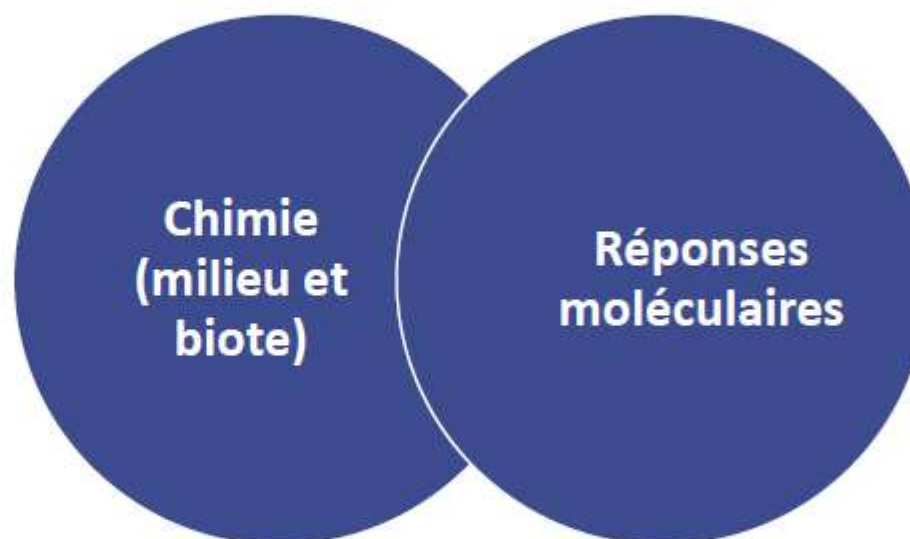
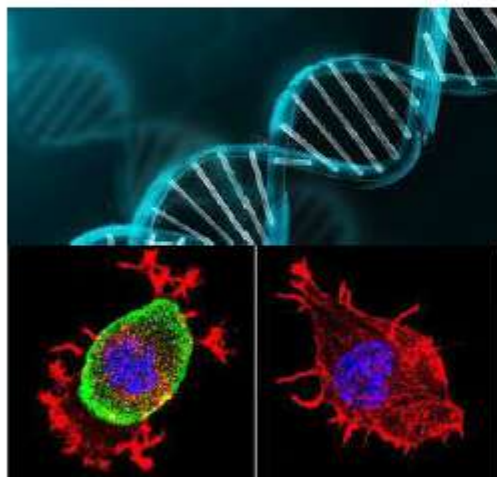


**Développer des réponses sensibles et prédictives pour une
amélioration du diagnostic**

**Chimie (milieu
et biote)**

**Mieux définir la fraction représentant un risque toxique pour les
organismes (fraction biodisponible - bioaccumulable)**

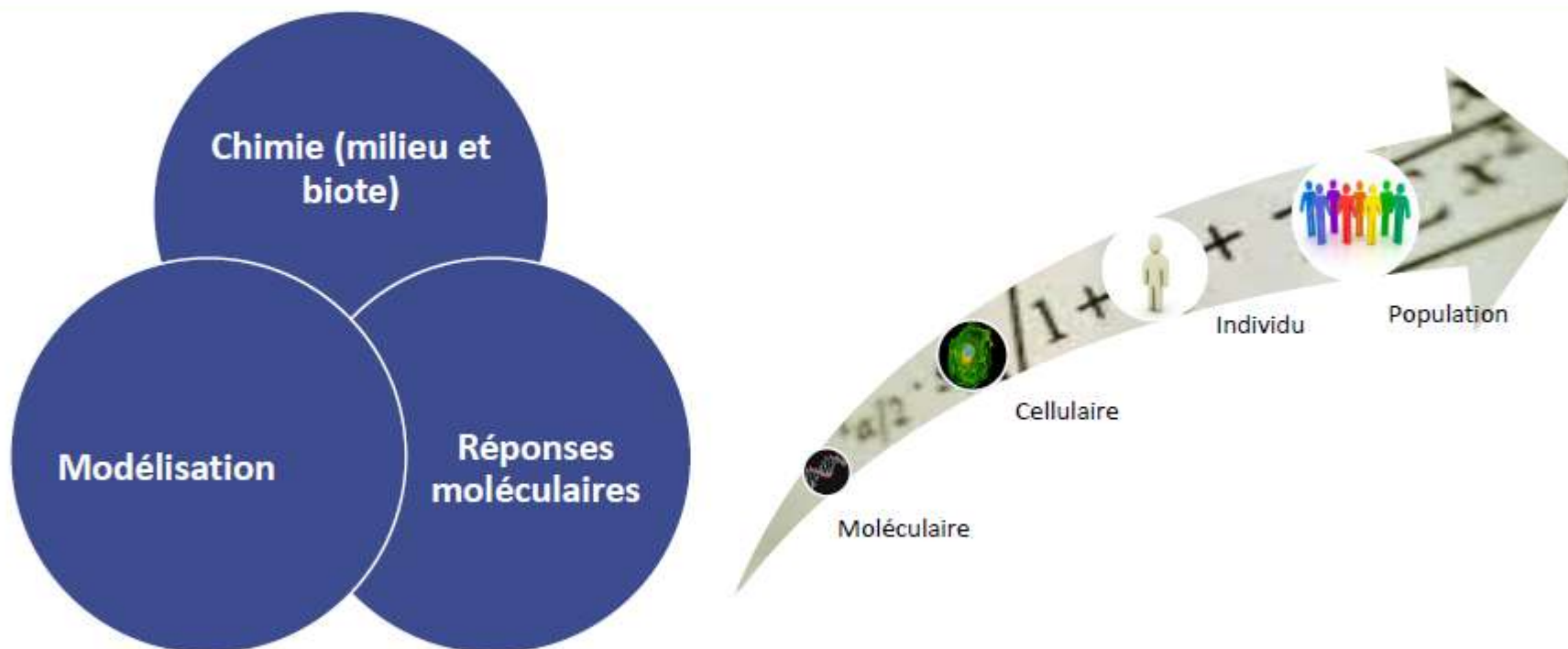
Développer des réponses sensibles et prédictives pour une amélioration du diagnostic



Développement de réponses moléculaires, à fort pouvoir prédictif

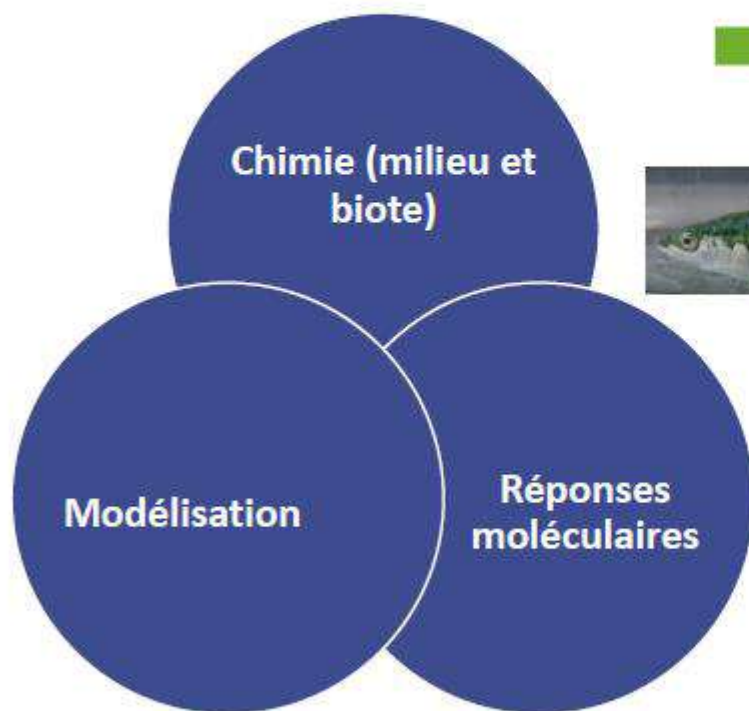


Développer des réponses sensibles et prédictives pour une amélioration du diagnostic



**Etablir les liens entre les niveaux moléculaire et individuel –
populationnel d'intérêt écologique : modélisation**

Développer des réponses sensibles et prédictives pour une amélioration du diagnostic



Approche plurispécifique

(espèces représentatives des hydrosystèmes de l'interrégion)

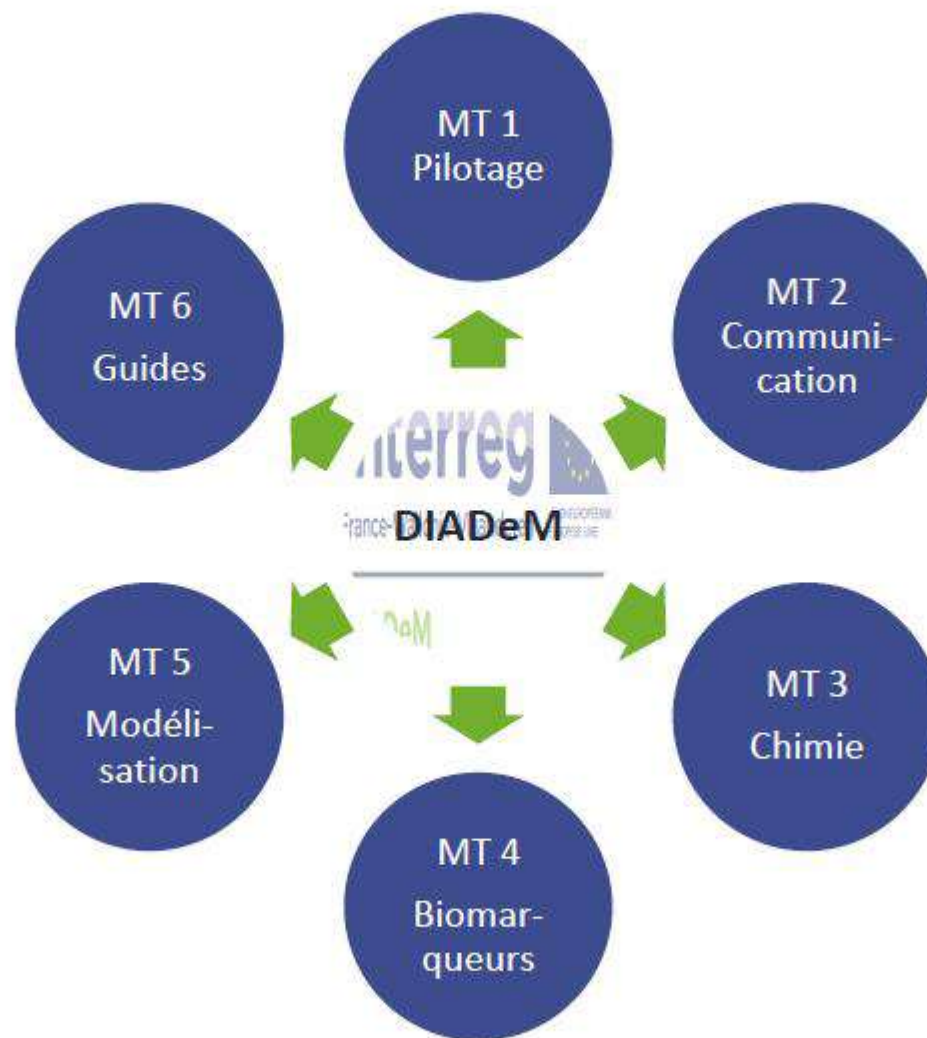


Approche active



Micropolluants & bio-surveillance

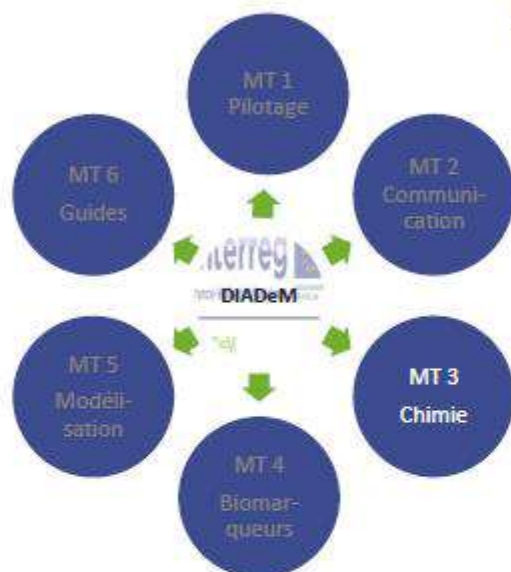
la Seine, l'Escaut et le projet DIADeM sur la Meuse



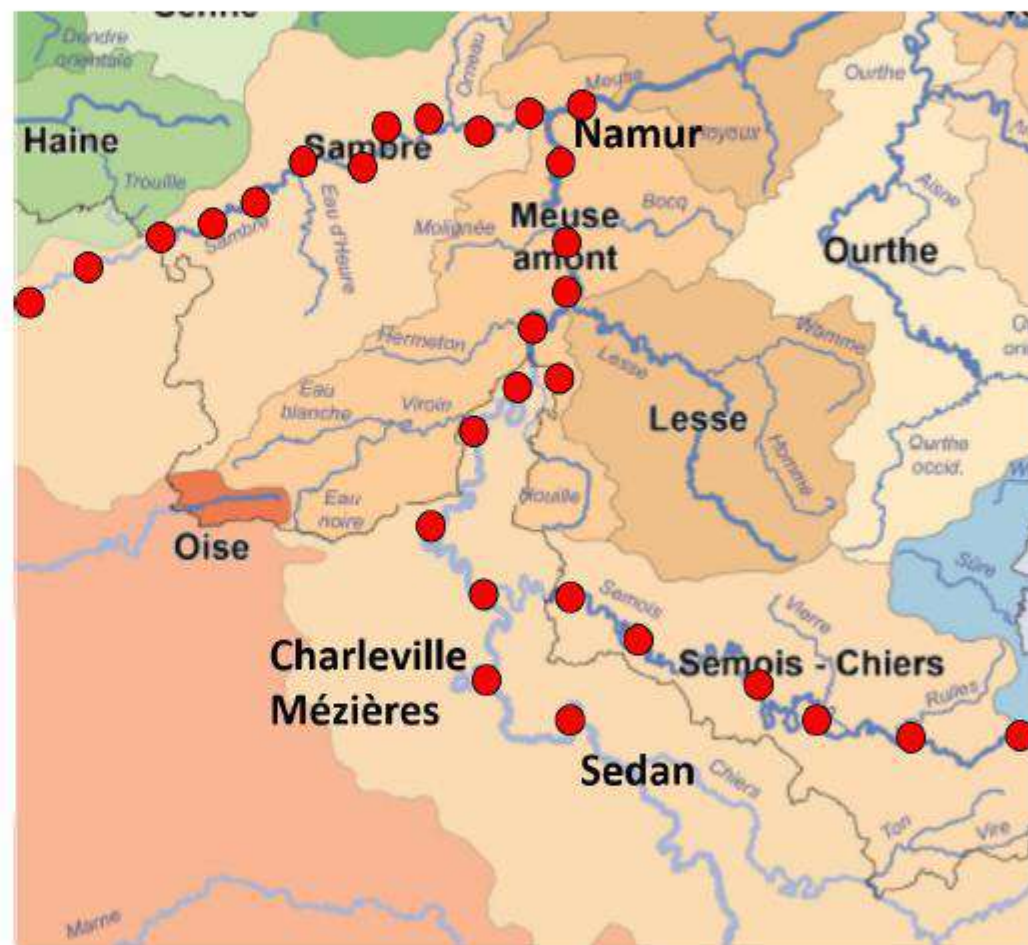
Alain GEFARD – chef de file DIADeM
Université de Reims Champagne-Ardenne, SEBIO
07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège

 #ASTEE2017

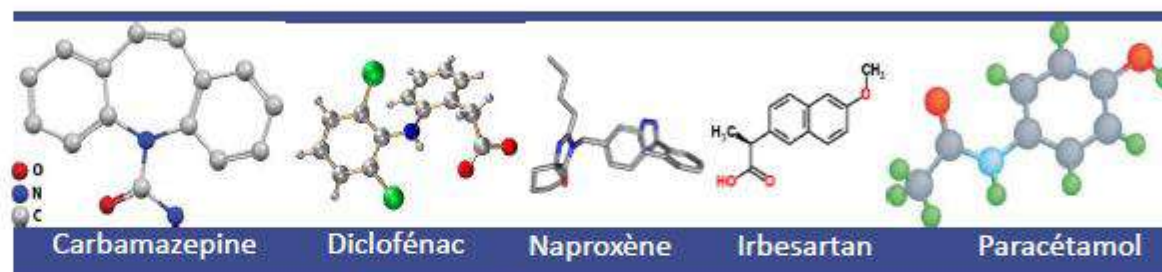
MT 3 : Analyse chimiques



Cartographie de la contamination en résidus médicamenteux sur 34 sites du BV de la Meuse (zone INTERREG, 6 prélèvements sur 1 an)



MT 3 : Analyses chimiques, focus sur 5 molécules



Psychotrope

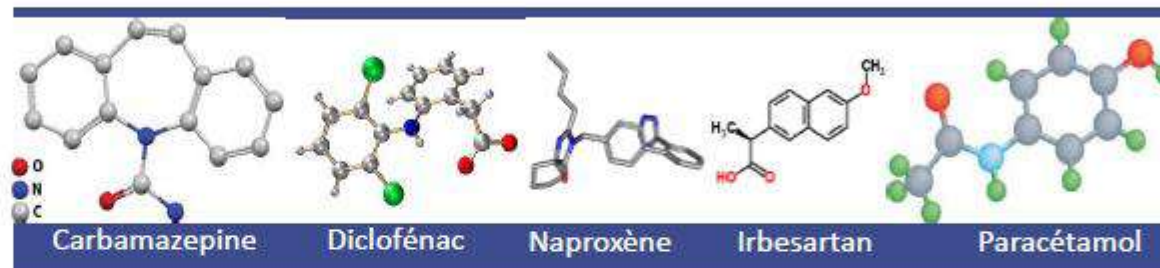
Anti-inflammatoire
non stéroïdien

Anti-
hypertenseur

Antalgique
antipyrétique

- Choix vis-à-vis de leur mode d'action et de leur occurrence dans les milieux naturels
- Etude de leur comportement entre fractions eau et sédiment

MT 3 : Analyses chimiques focus sur 5 molécules



- Eco-Toxicité d'un mélange de ces molécules sur les organismes aquatiques en conditions contrôlées de laboratoire ou écosystémiques

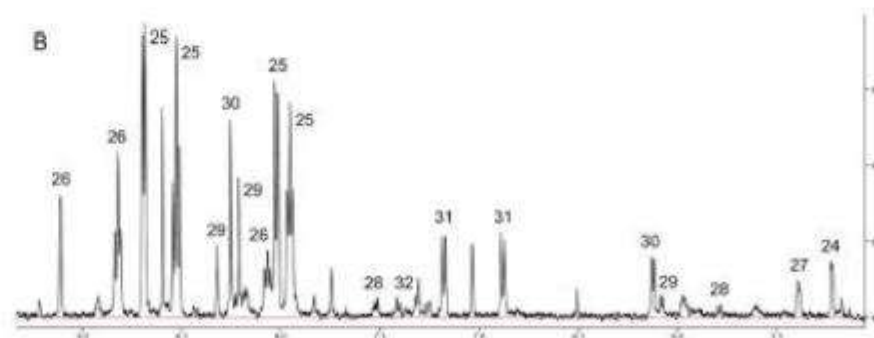
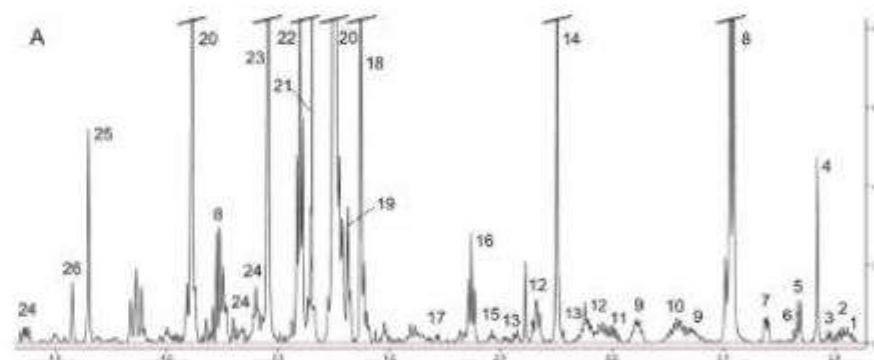
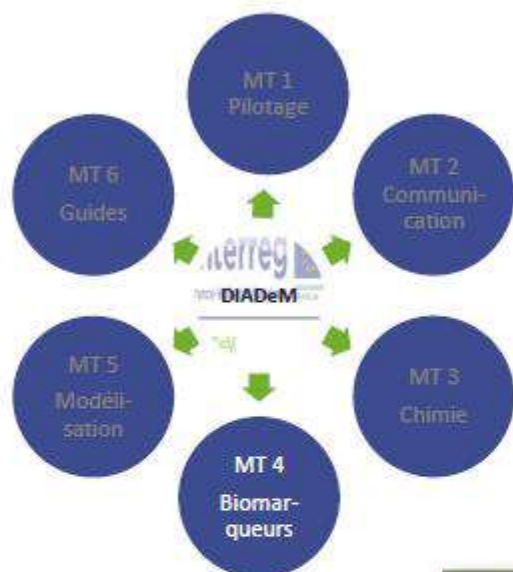


Alain GEFARD – chef de file DIADeM
Université de Reims Champagne-Ardenne, SEBIO
07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège

#ASTEE2017

MT 4 : Analyses biologiques

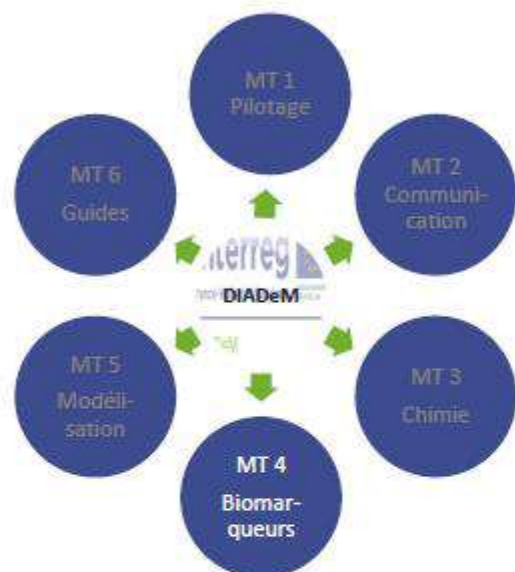
- Développement d'approche globale : profil métabolomique (métabolisme)



Capello et al., 2017 Ecotoxicology and Environmental Safety

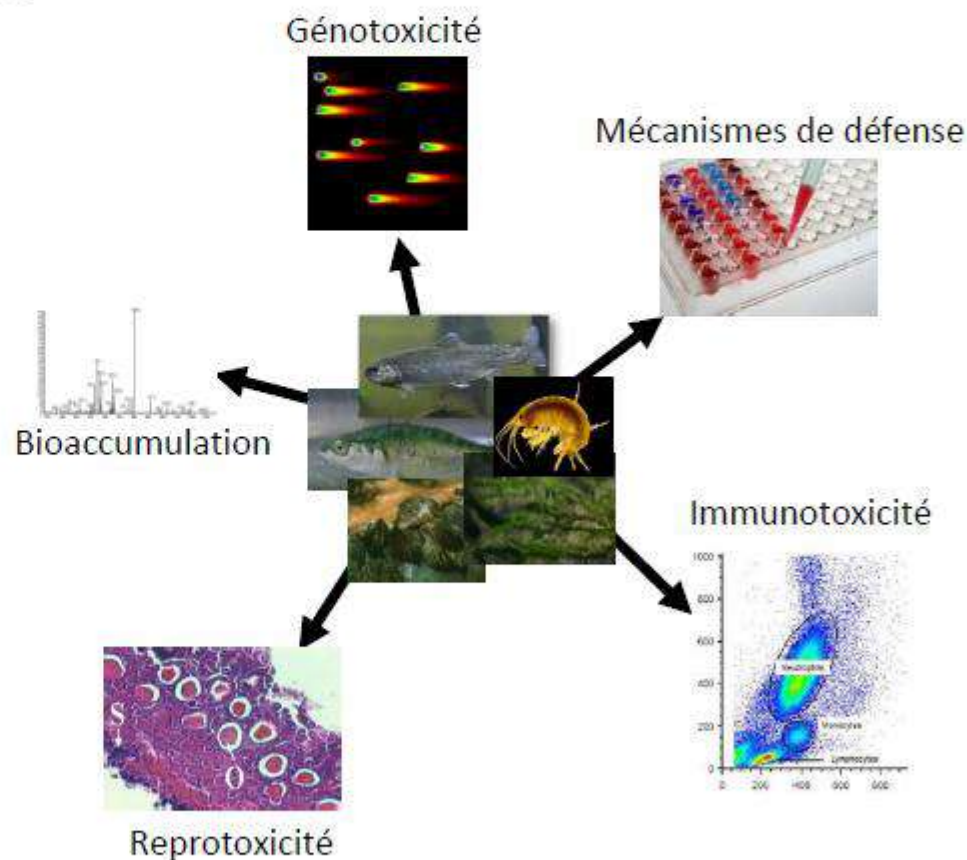
Alain GEFARD – chef de file DIADeM
Université de Reims Champagne-Ardenne, SEBIO
07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège

#ASTEE2017



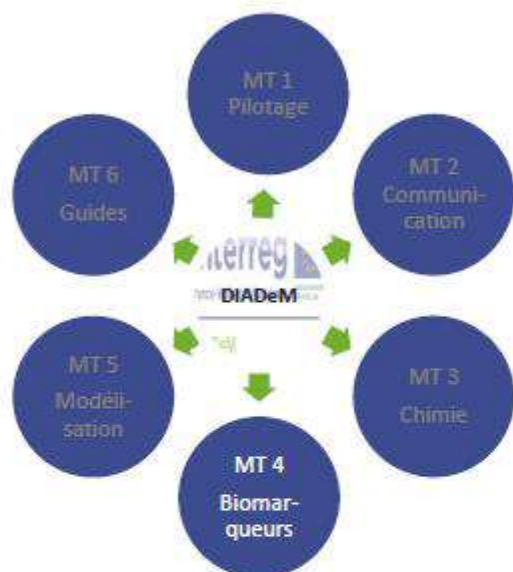
MT 4 : Analyses biologiques

- Approche ciblée

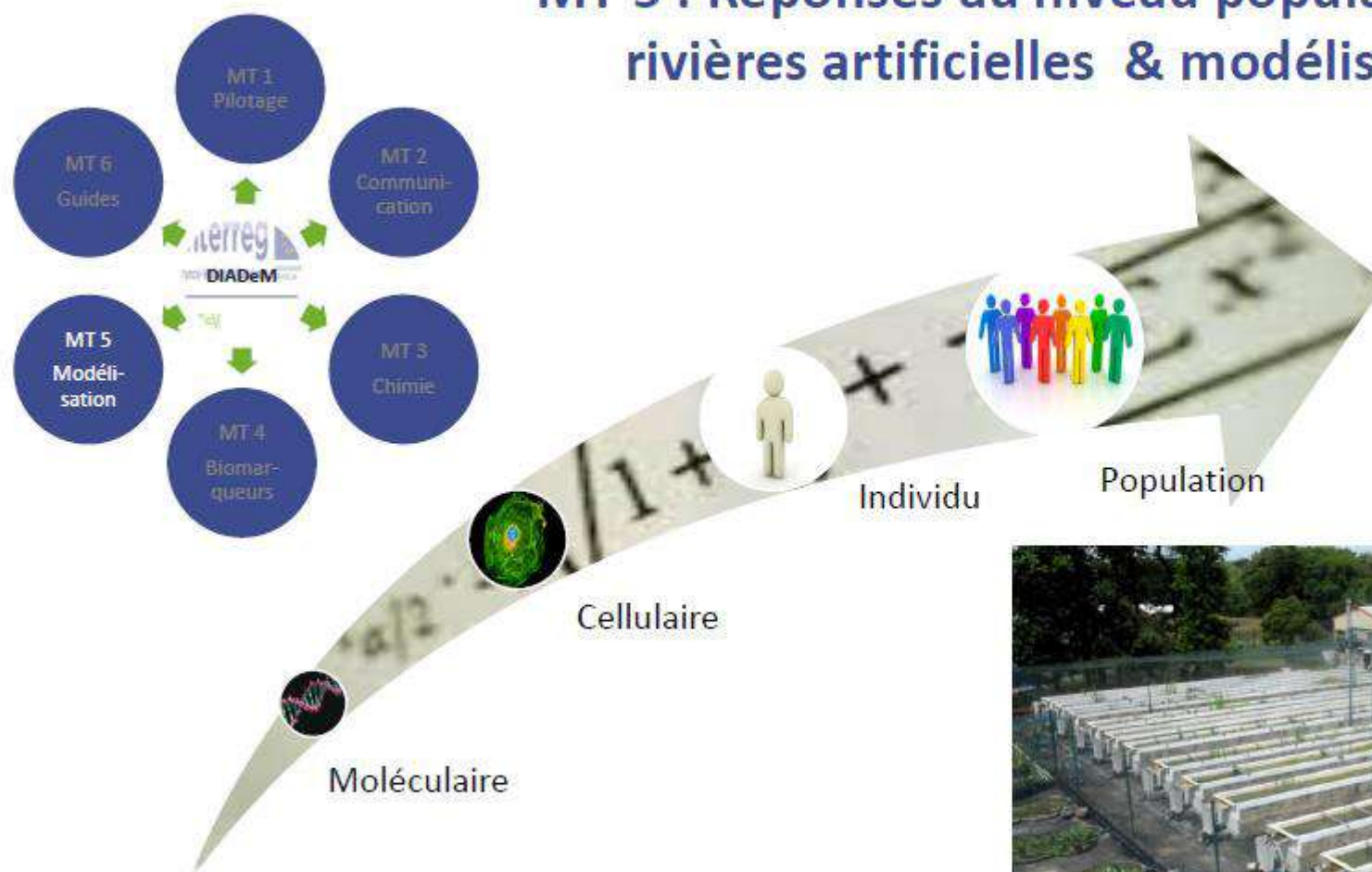


MT 4 : Analyses biologiques

- Application sur le terrain, encadrement : amont –aval de 4 STEPS



MT 5 : Réponses au niveau populationnel : rivières artificielles & modélisation

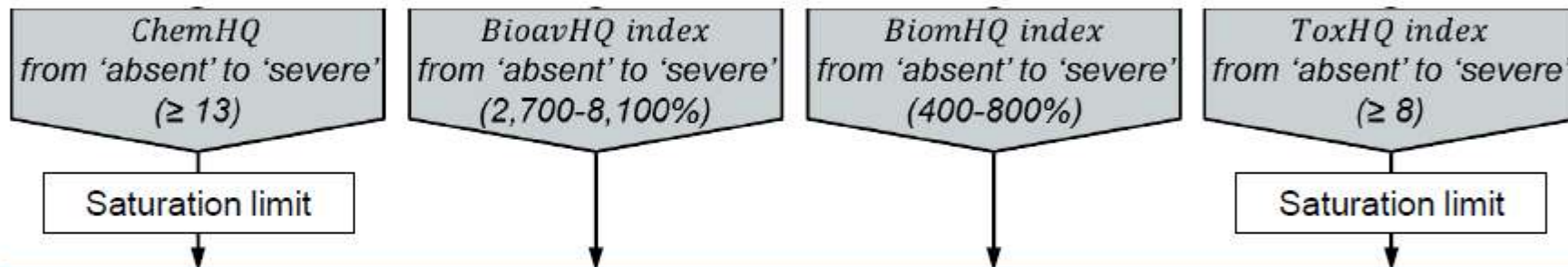


Alain GEFARD – chef de file DIADeM
Université de Reims Champagne-Ardenne, SEBIO
07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège

 #ASTEE2017

MT 6 : Transfert pour les acteurs de l'eau

- Guides méthodologiques (caging, mesure de biomarqueurs...)
- Développement d'une approche poids de l'évidence



Normalization step:

$$NormHQ(i) = \frac{HQ(i) - MinHQ}{MaxHQ - MinHQ}$$

Normalization to a common scale

Weighting step:

$$NormHQ_w(i) = NormHQ(i) \times Weight(i)$$

Weight(i):
 BioavHQ/BiomHQ $\rightarrow \times 1.2$
 ChemHQ/ToxHQ $\rightarrow \times 1$

Integration in a global WOE index and Class of Hazard attribution:

$$WOE index = \frac{\sum_i NormHQ_w(i)}{\sum MaxHQ} \times 100$$

Normalization to 100%

$WOE index \leq 10\%$	$\rightarrow$	Absent
$10\% < WOE index \leq 25\%$	$\rightarrow$	Slight
$25\% < WOE index \leq 45\%$	$\rightarrow$	Moderate
$45\% < WOE index \leq 70\%$	$\rightarrow$	Major
$70\% < WOE index \leq 100\%$	$\rightarrow$	Severe

Micropolluants & bio-surveillance

la Seine, l'Escaut et le projet DIADeM sur la Meuse



8 partenaires opérateurs

7 partenaires associés



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

www.interregdiadem.fr

Remerciements : Avec le soutien du Fonds européen de développement régional

Alain GEFARD – chef de file DIADeM
Université de Reims Champagne-Ardenne, SEBIO
07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège

#ASTEE2017

DIADeM – *Analyse du Biote*

Analyse chimique du Biote

**Développement d'une
approche intégrée pour le
diagnostic de la qualité des
eaux de la Meuse**

Christelle ROBERT

CER Groupe, DIADeM

Département Santé

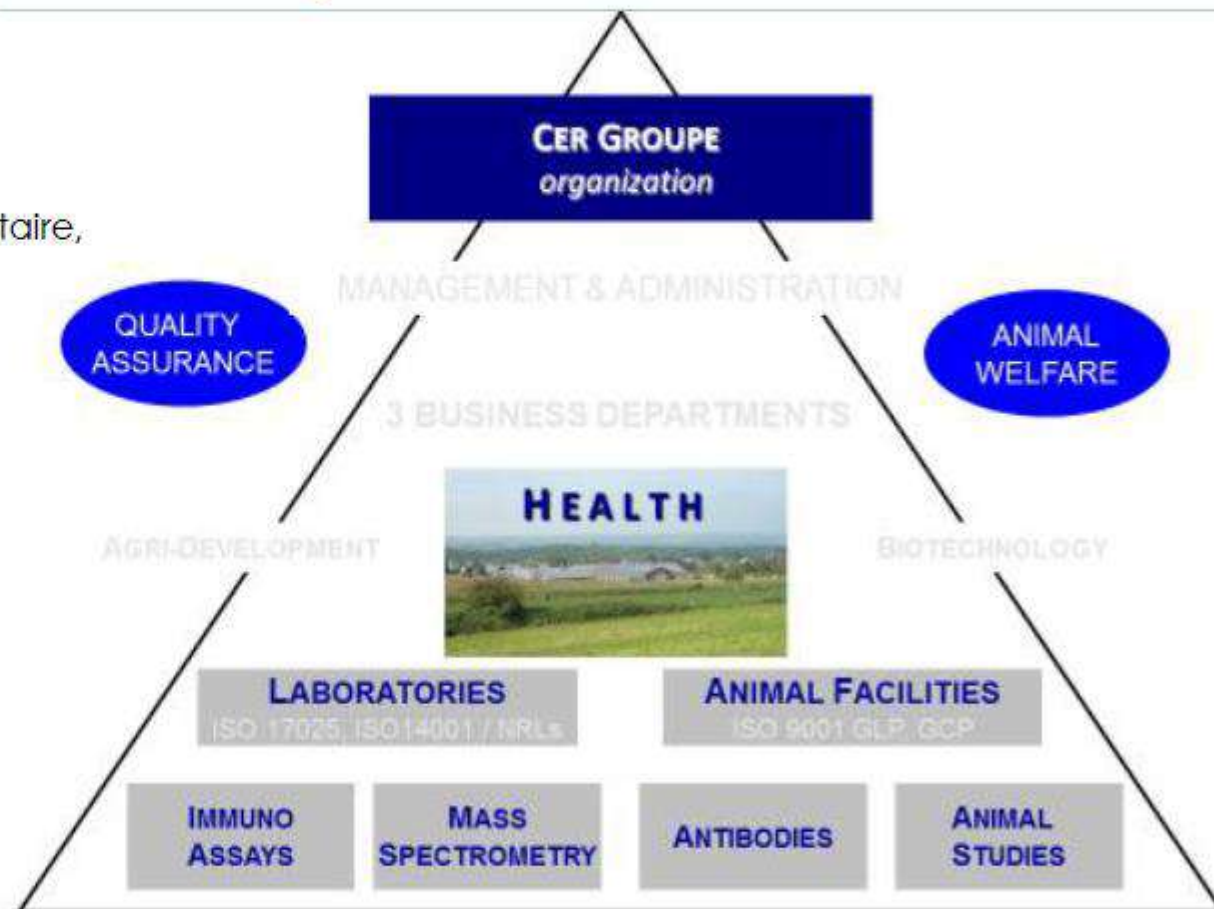


I. Expertise du CER-Groupe (Département Santé)

- Centre de recherche agréée (Belgique)

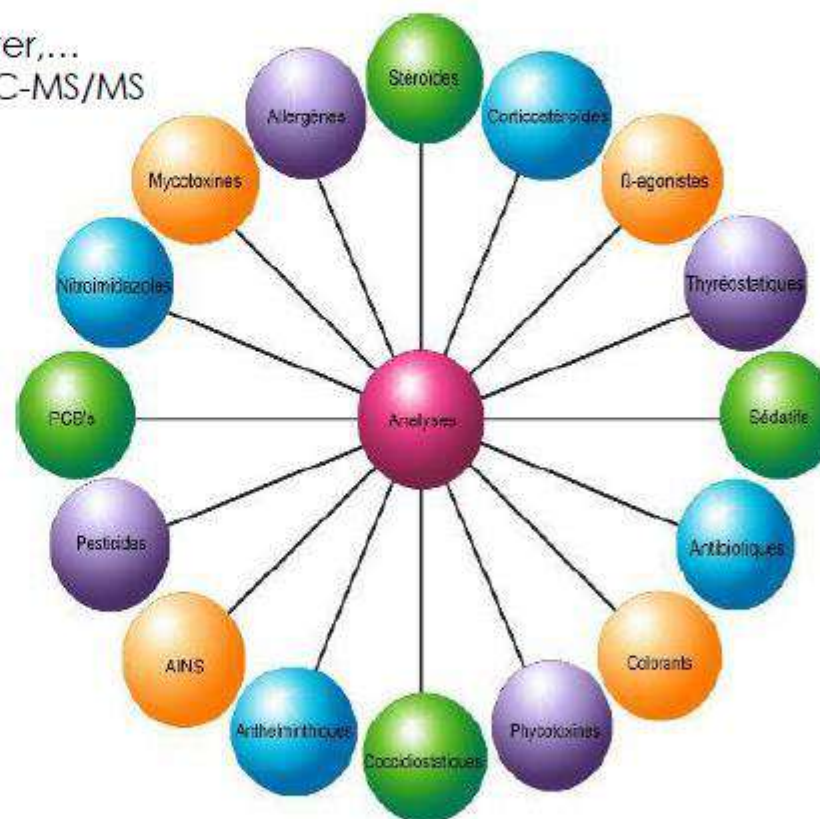
- Services
- Produits
- Recherche

Dans les domaines vétérinaire, sécurité alimentaire, biotech et biomedical



I. Expertise du CER-Groupe (Département Santé)

- Techniques Analytiques
 - Immunological : RIA, ELISA, BIOSENSOR, Flow Cytometer,...
 - Physico-chemical : (U)HPLC-MS/MS, GC-MS/MS, APGC-MS/MS
- Analyses de routine réalisées
- Matrices étudiées :
 - Aliments
 - Tissus animaux
 - Eaux
 - Préparations médicaments
 - Produits d'excrétion
 -
- Accréditation des méthodes selon ISO 17025
- NRL Chemistry, 96/23 & marine biotoxins (partenariat ILVO) (2013-2016; 2017?)



II. Implication dans le projet



Recherche et devenir de molécules pharmaceutiques dans différentes matrices :

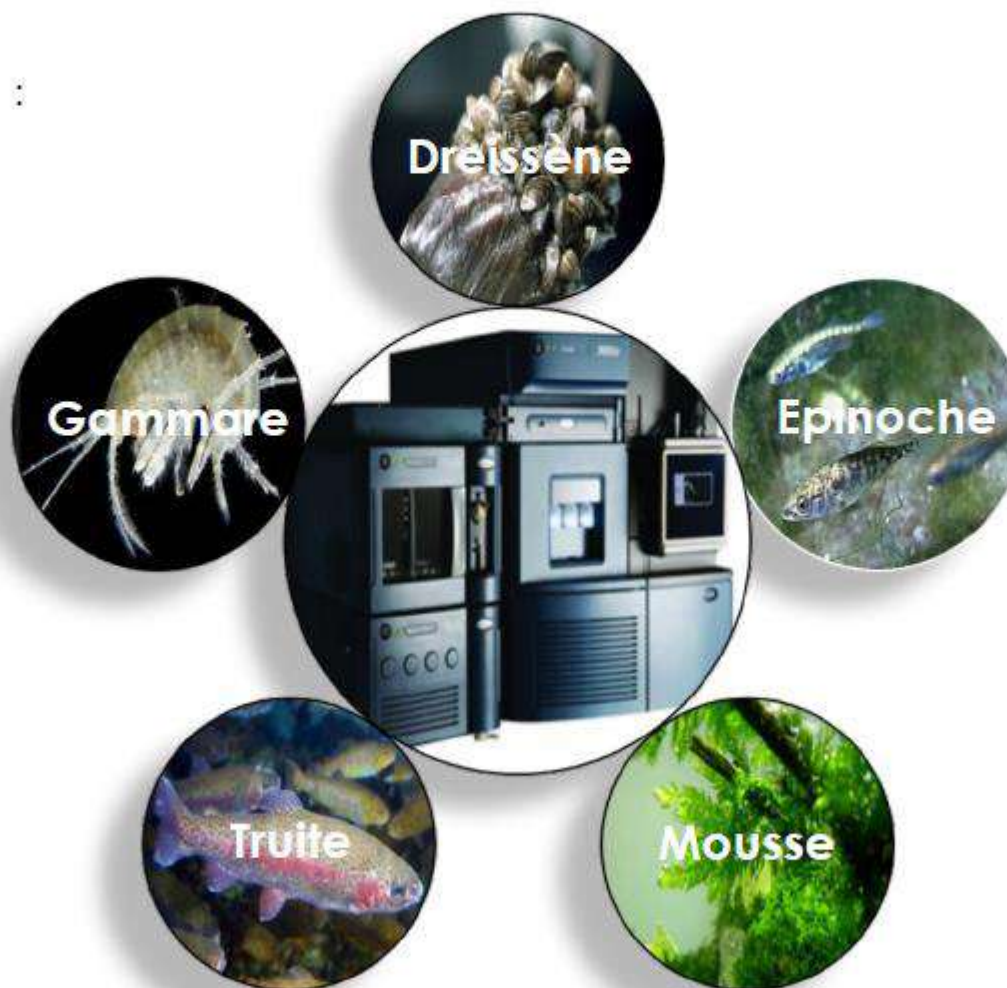
- Eau : cartographie de la contamination des masses d'eau (SWDE)
- Transfert et dégradation dans l'environnement (URCA)
- **Biote : capacité d'accumulation (CER-Groupe)**

Micropolluants & bio-surveillance

la Seine, l'Escaut et le projet DIADeM sur la Meuse

III. Objectifs

- Etudes ciblées :
 - 5 organismes aquatiques :



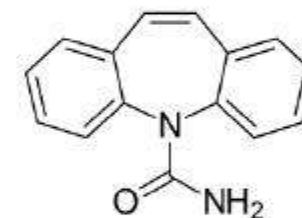
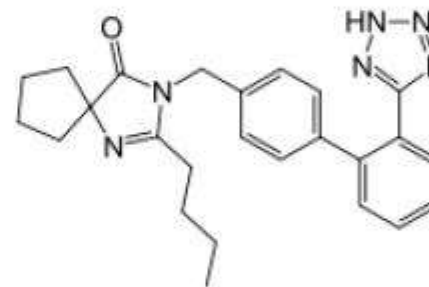
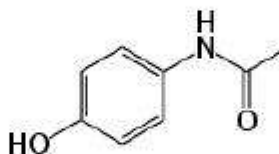
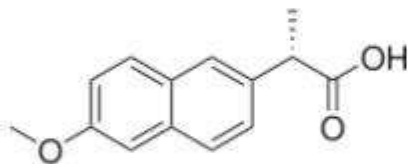
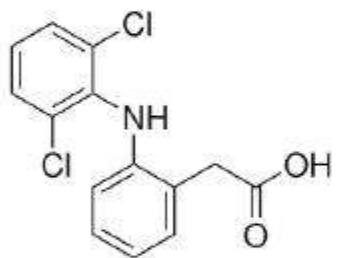
Christelle ROBERT, DIADeM
CER Groupe

07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège

 #ASTEE2017

III. Objectifs

- Etudes ciblées :
 - 5 contaminants : le diclofénac et le naproxène, (anti-inflammatoire non stéroïdien), le paracétamol (analgésique), l'irbesartan (antihypertenseur) et la carbamazépine (neuroleptique)



III. Objectifs

- 3 types d'expérimentation
 - Aquariums artificiellement contaminés
 - Rivières artificielles également contaminées (INERIS)
 - Rivières naturelles (encagement sur 4-5 sites d'étude en amont et en aval des stations d'épurations)
- Détermination de l'évolution de la teneur en contaminant au cours du temps
- Evaluation le facteur de bioconcentration et/ou bioaccumulation des molécules présentes en fonction des espèces étudiées



IV. Méthodologie

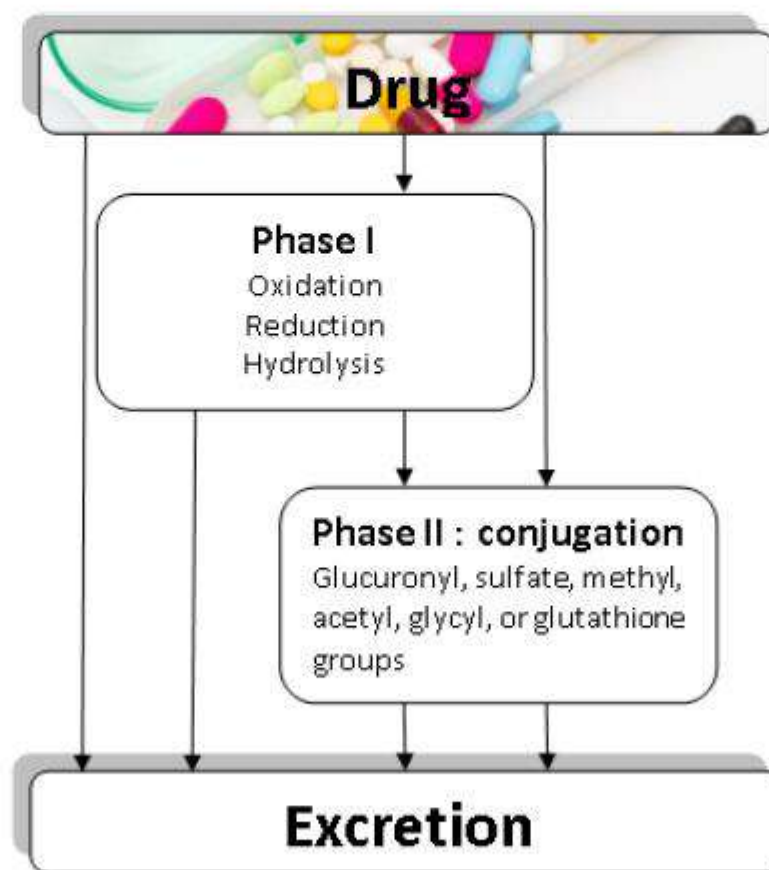
- Composés analysables par LC-MS/MS
- Tester divers protocoles d'extraction
 - Applicable à toutes les matrices
 - Ajustable en fonction de la disponibilité des d'échantillons (quantité limitée pour certaines matrices)
 - Sensibilité
 - Quantitative
 - Analyse des métabolites
 - Analyse de l'individu en entier (pas de sélection d'un tissu particulier)
- Analyses de plusieurs individus par essais (n=3)
- Analyses de 4 doses (0, 1x, 10x, 100x)-(sur base des données-SWDE)

Molécules	Carbamazépine	Diclofenac	Naproxène	Irbesartan	Paracétamol
Concentrations dans les milieux aquatiques (ng/l) pour la situation 1X	25	25	25	50	100



IV. Méthodologie

- Devenir des molécules au sein de l'organisme : Métabolisation



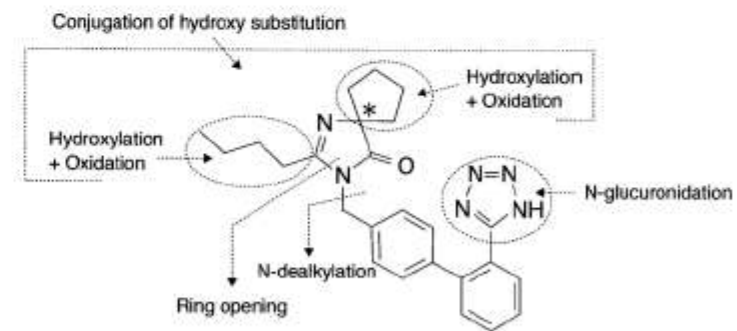
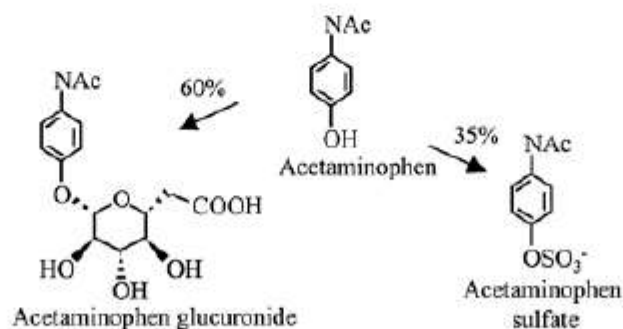
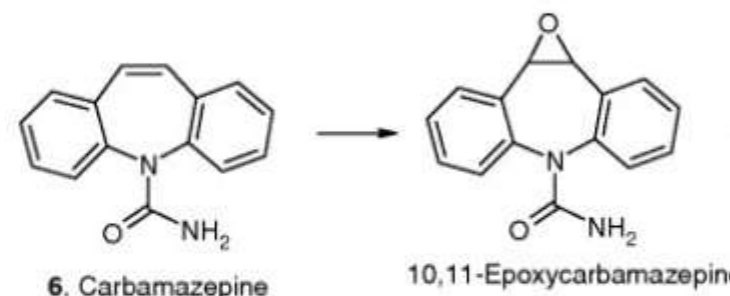
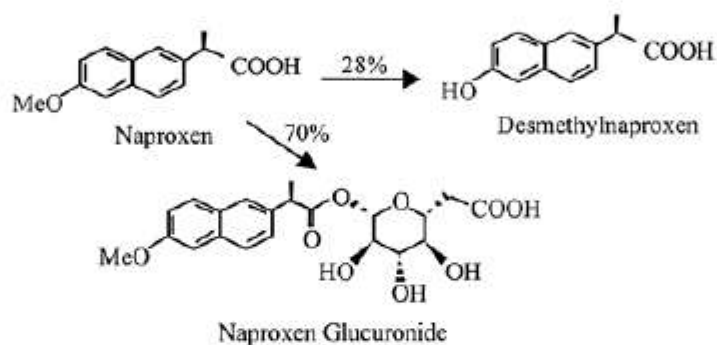
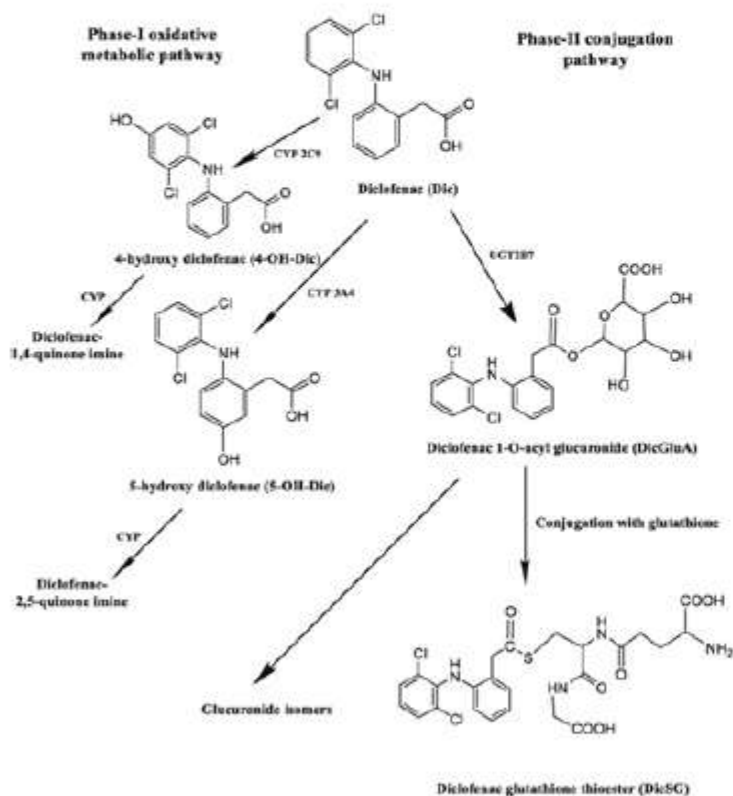
Christelle ROBERT, DIADeM
CER Groupe

07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège

#ASTEE2017

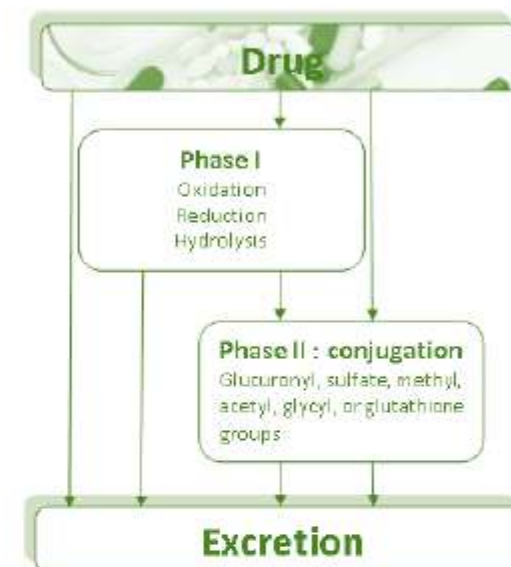
IV. Méthodologie

- Devenir des molécules au sein de l'organisme : Métabolisation



IV. Méthodologie

- Devenir des molécules au sein de l'organisme :
Vu l'existence de métabolisations des composés
→ Analyses des métabolites



Molécules	Carbamazépine	Diclofenac	Naproxène	Irbesartan	Paracétamol
Métabolites	Carbamazepine 10 11' epoxide	5-Hydroxy Diclofenac 4-Hydroxy Diclofenac Diclofenac Acylglucuronide	Desmethyl Naproxen Naproxen Acyl-glucuronide	Irbesartan Glucuronide	Acetamidophenyl Glucuronide 4-Acetaminophen Sulfate

V. Résultats

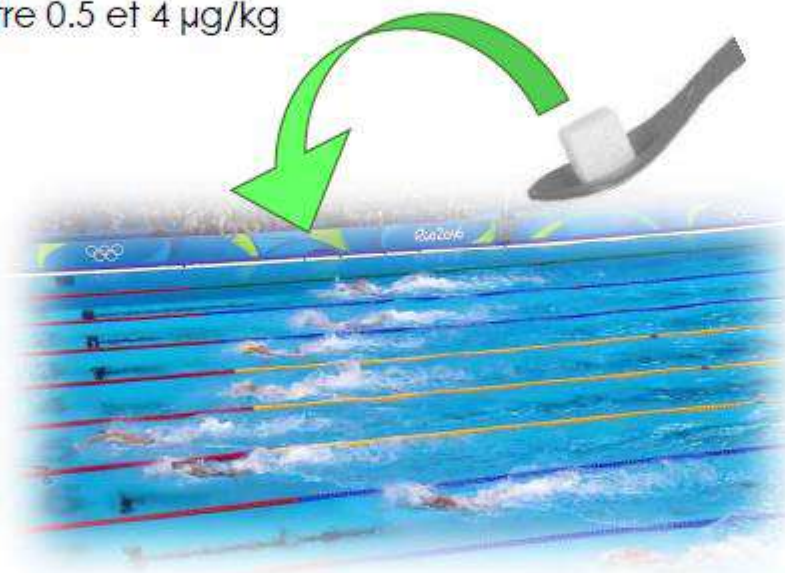
V.I. Mise au point de l'analyse UHPLC-MS

- Optimisation du protocole d'extraction
 - Essais sur truite entière (bonne disponibilité)
 - Extraction solide/liquide
 - Avec et sans protocole de purification (SPE, Quecher (C18, PSA,...))
- Ajout de 5 standards internes marqués (1 par composé)

V. Résultats

V.II. Performances actuelles

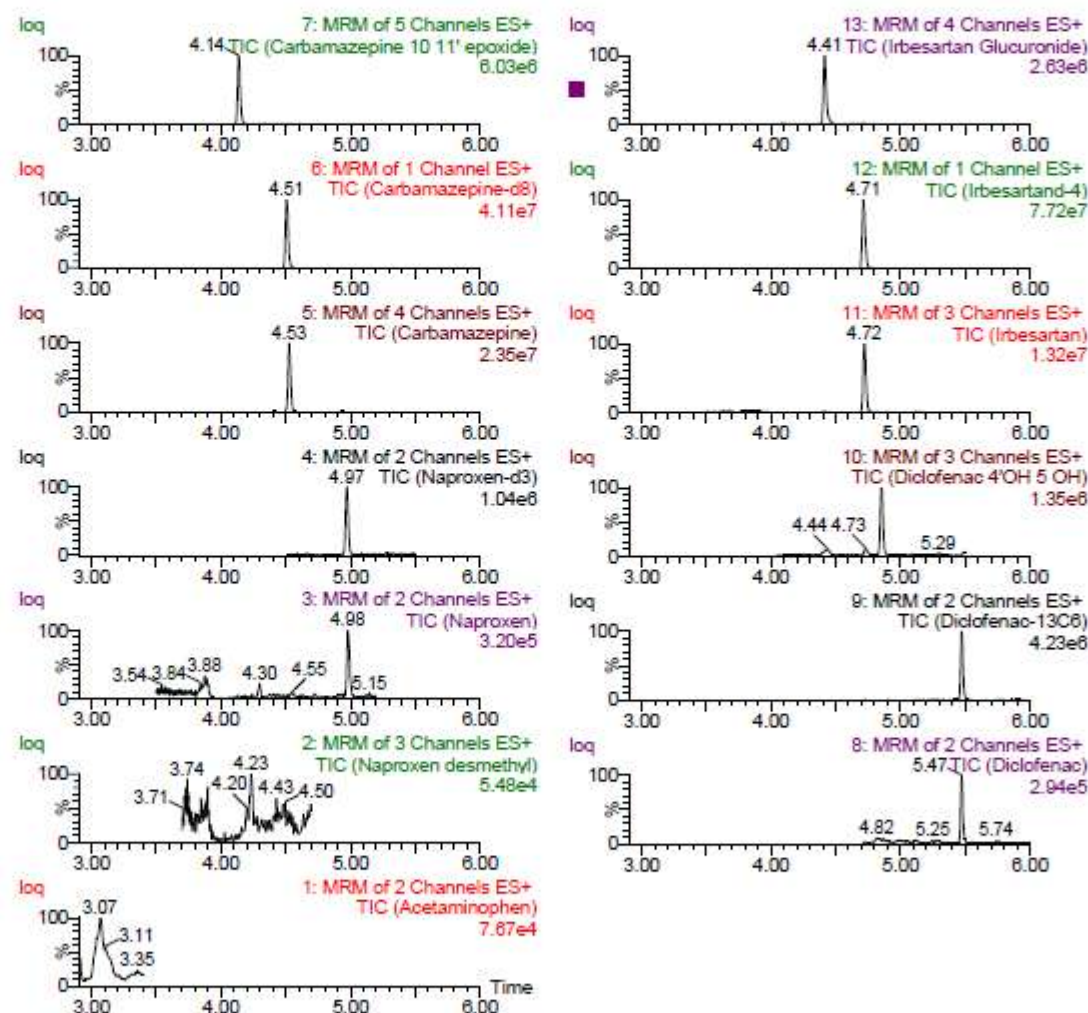
- LOQ actuelles comprises entre 0.5 et 4 µg/kg
- 1 µg/kg =



- Possibilité d'améliorer (concentration)

V. Résultats

V.II. Performances actuelles



Christelle ROBERT, DIADeM

CER Groupe

07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège



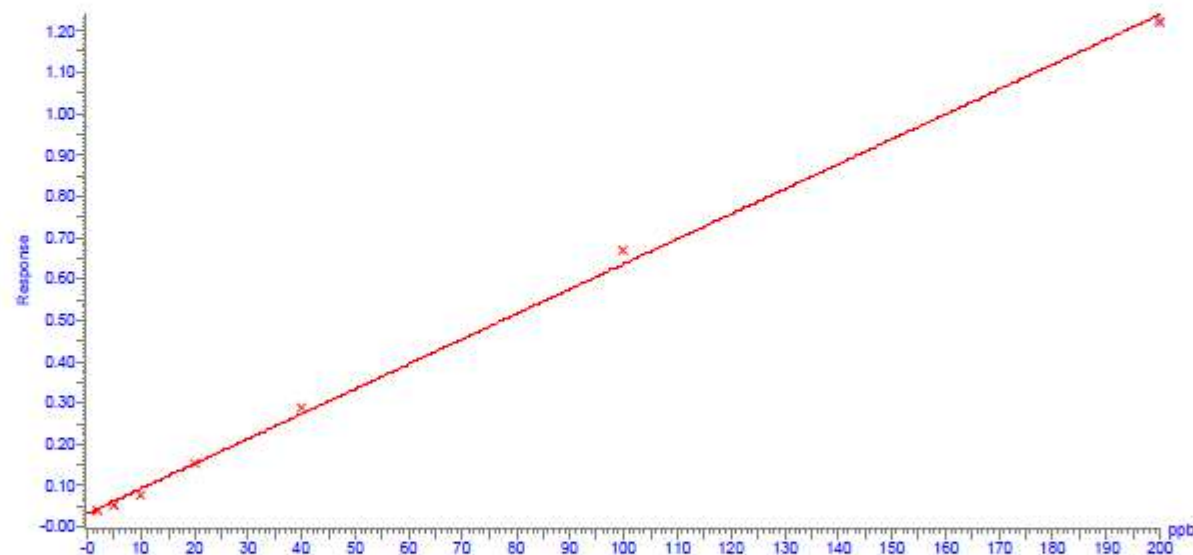
#ASTEE2017

V. Résultats

V.II. Performances actuelles

- Bonne linéarité (0-200ppb)

Compound name: Naproxen
Correlation coefficient: $r = 0.999217$, $r^2 = 0.998435$
Calibration curve: $0.00603672 \cdot x + 0.0322409$
Response type: Internal Std (Ref 1), Area * (IS Conc. / IS Area)
Curve type: Linear, Origin: Exclude, Weighting: Null, Axis trans: None



- Gamme de concentration à ajuster lors des analyses
- Métabolites à ajouter (disponibilité des standards analytiques, en cours)

V. Résultats

V.III. 1^{er} Essais en aquarium

- Essais réalisés avec U Namur
 - 35 Truites/ aquarium de 100 l
 - Exposition à 0, 1, 10 et 100x doses
 - Exposition au mélange des 5 composés
 - Maintient des concentrations assurées (mesure par la SWDE)
 - cPrélèvement après 1 jour, 1, 3 et 6 semaines d'exposition
 - Chaque individu lavé avant stockage à -20°C
- Analyses (en cours)



VI. Conclusions

- Développement d'une méthode analytique - truite
 - Rapide
 - Sensible ($\mu\text{g/kg}$) – peut encore être améliorée
 - Multi résidus-incluant les métabolites
 - Quantitative
 - Applicabilité aux autres espèces à tester
- 1^{er} Analyses en cours (essais en aquarium, Unamur)

Micropolluants & bio-surveillance

la Seine, l'Escaut et le projet DIADeM sur la Meuse

Merci pour votre attention



www.cergroupe.be

Christelle ROBERT, DIADeM
CER Groupe
07/06/2017 – salle Académique à l'Université de Liège
#ASTEE2017

DIADeM *biomarqueurs*

Évaluation du risque
environnemental :

**Intérêts des biomarqueurs
de génotoxicité et de
reprotoxicité chez la
dreissène *D. polymorpha***

Marc BONNARD

chef de file DIADeM

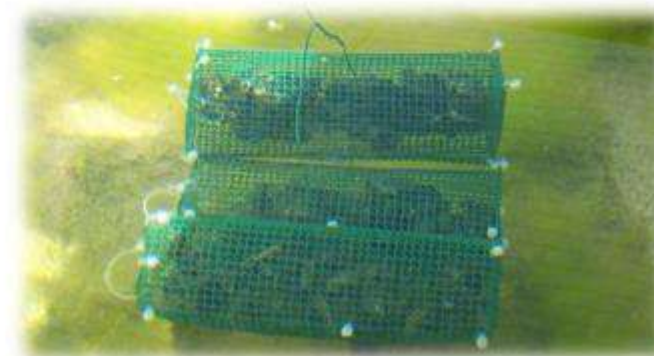
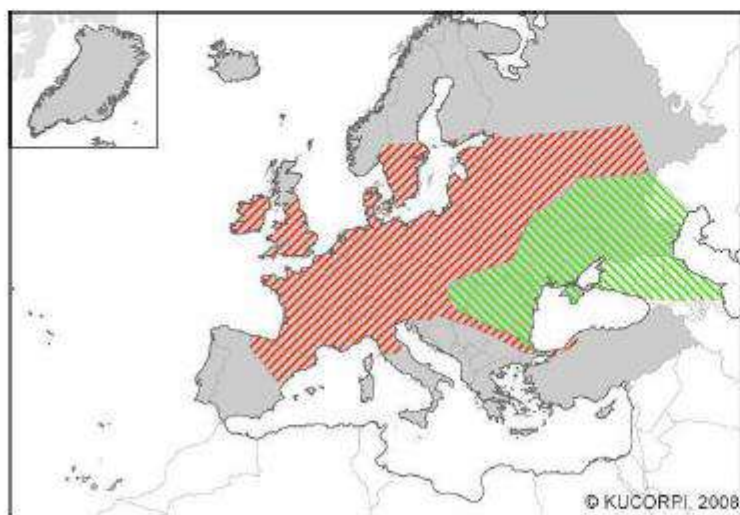
SEBIO - Stress Environnementaux et
BIOsurveillance des milieux aquatiques

Université Reims Champagne-
Ardenne (URCA),

Le modèle biologique : la moule zébrée ou dreissène (*D. polymorpha*)



- Mollusque Bivalve
- Vaste répartition géographique
- Forte capacité de filtration/bioaccumulation
- Développement de nombreux biomarqueurs
- Maintenance aisée en laboratoire
- Facilité de transplantation (caging) sur le terrain
- **Espèce sentinelle (Ecotoxicologie aquatique)**



Les outils développés - Génotoxicité

- Mesure de **l'intégrité de l'ADN** par le test des comètes
- Mise en évidence d'une **variété de dommages**
 - (cassures de brins, lésions oxydatives...)
- **Sensibilité** / Rapidité de mise en œuvre
- Application à une **grande diversité de type cellulaire**

Mutagenesis vol. 23 no. 3 pp. 207-221, 2008
Advance Access Publication 1 April 2008

REVIEW

Ecotoxicological applications and significance of the comet assay

Awadhesh N. Jha*

Ecotoxicology and Stress Biology Research Centre, School of Biological Sciences, University of Plymouth, Plymouth PL4 8AA, UK

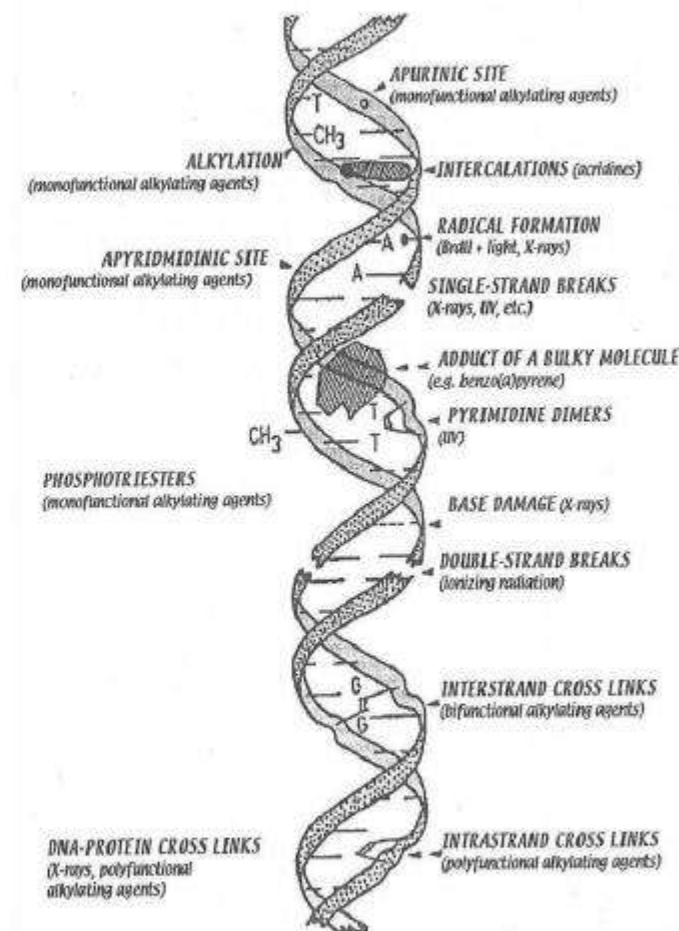
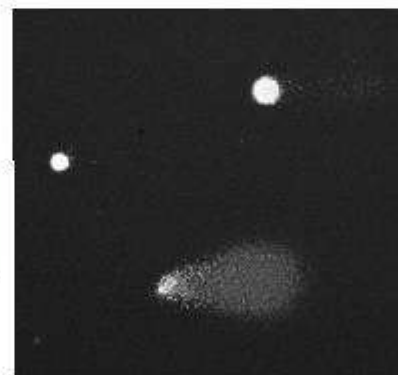
Mutagenesis, 2015, 36, 89-106
doi:10.1093/mutage/geu007
Review



Review

The comet assay in Environmental Risk Assessment of marine pollutants: applications, assets and handicaps of surveying genotoxicity in non-model organisms

Marta Martins and Pedro M. Costa*

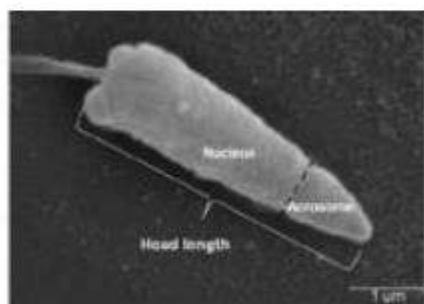


Les types cellulaires d'intérêt : hémocytes et spermatozoïdes



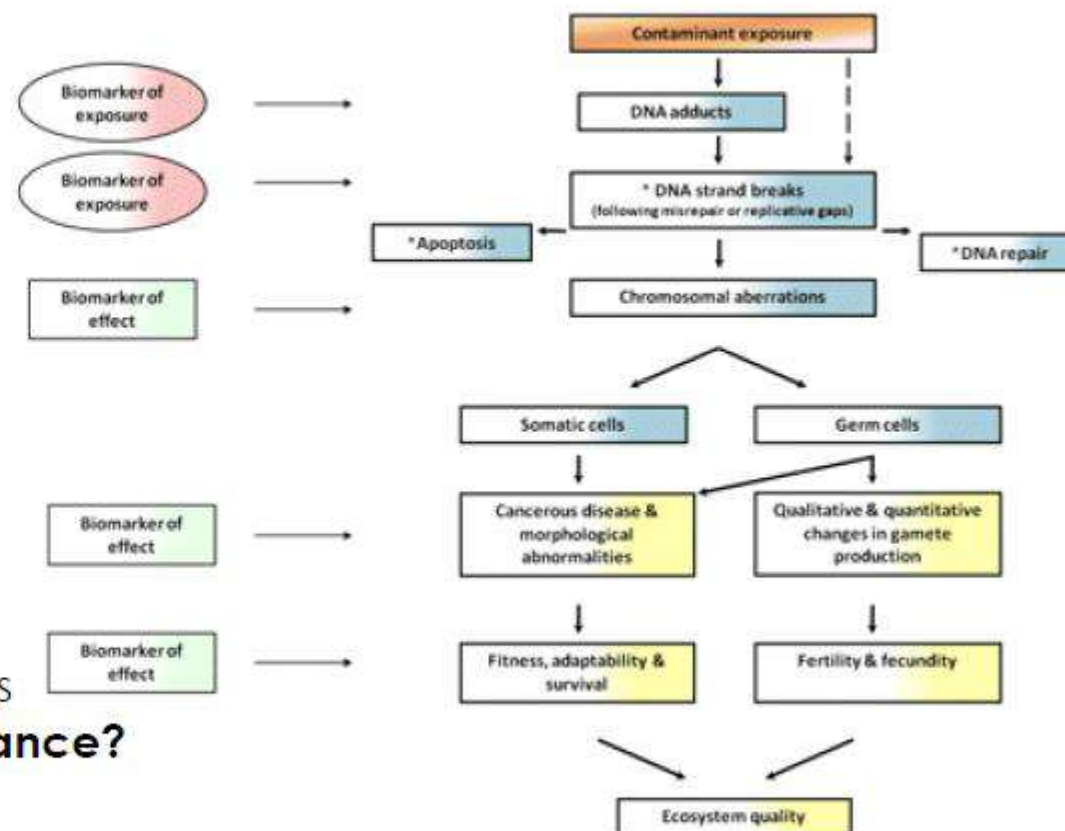
Hémocytes

Multiples fonctions
Reflet de l'**état de santé**



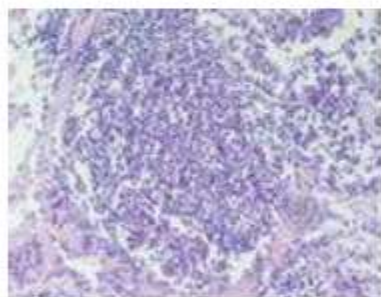
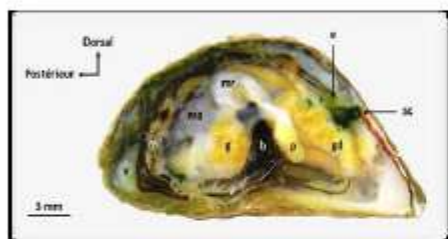
Spermatozoïdes

Persistance des dommages
Transmission à la descendance?

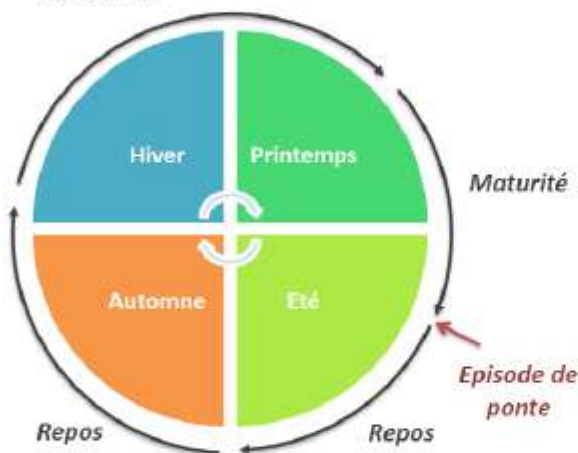


Les outils développés – Reprotoxicité

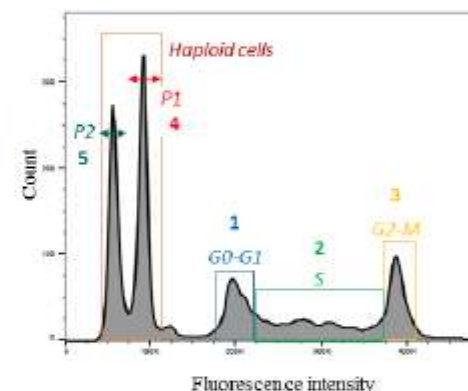
Cycle de reproduction saisonnier



Maturation



Indice de Maturité Sexuelle (IMS) par cytométrie en flux



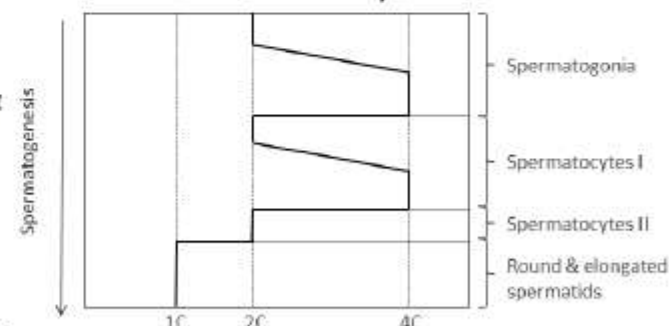
P1 -> Round spermatids
P2 -> Elongated spermatids

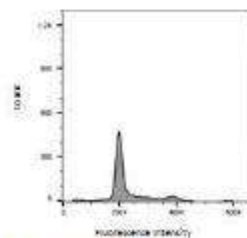
Analyse histologique

Indice gonado-somatique (IGS)
stades de maturité sexuelle...

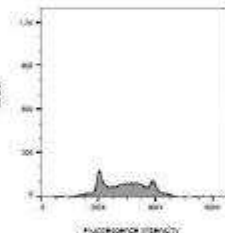
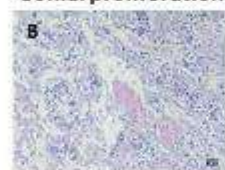
Phase du cycle cellulaire	Coefficient assigné
G0G1	1
S	2
G2M	3
P1	4
P2	5

Score 1
Repos
Score 5
Maturité

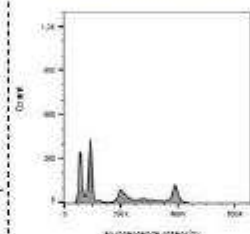
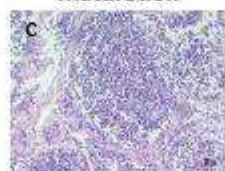




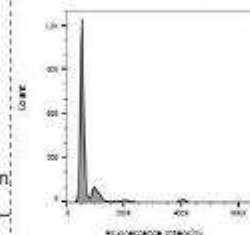
Gonial proliferation



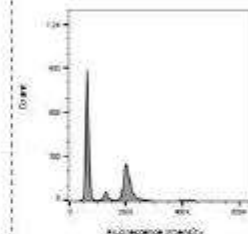
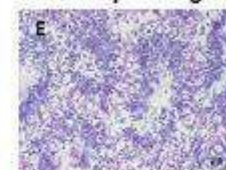
Maturation



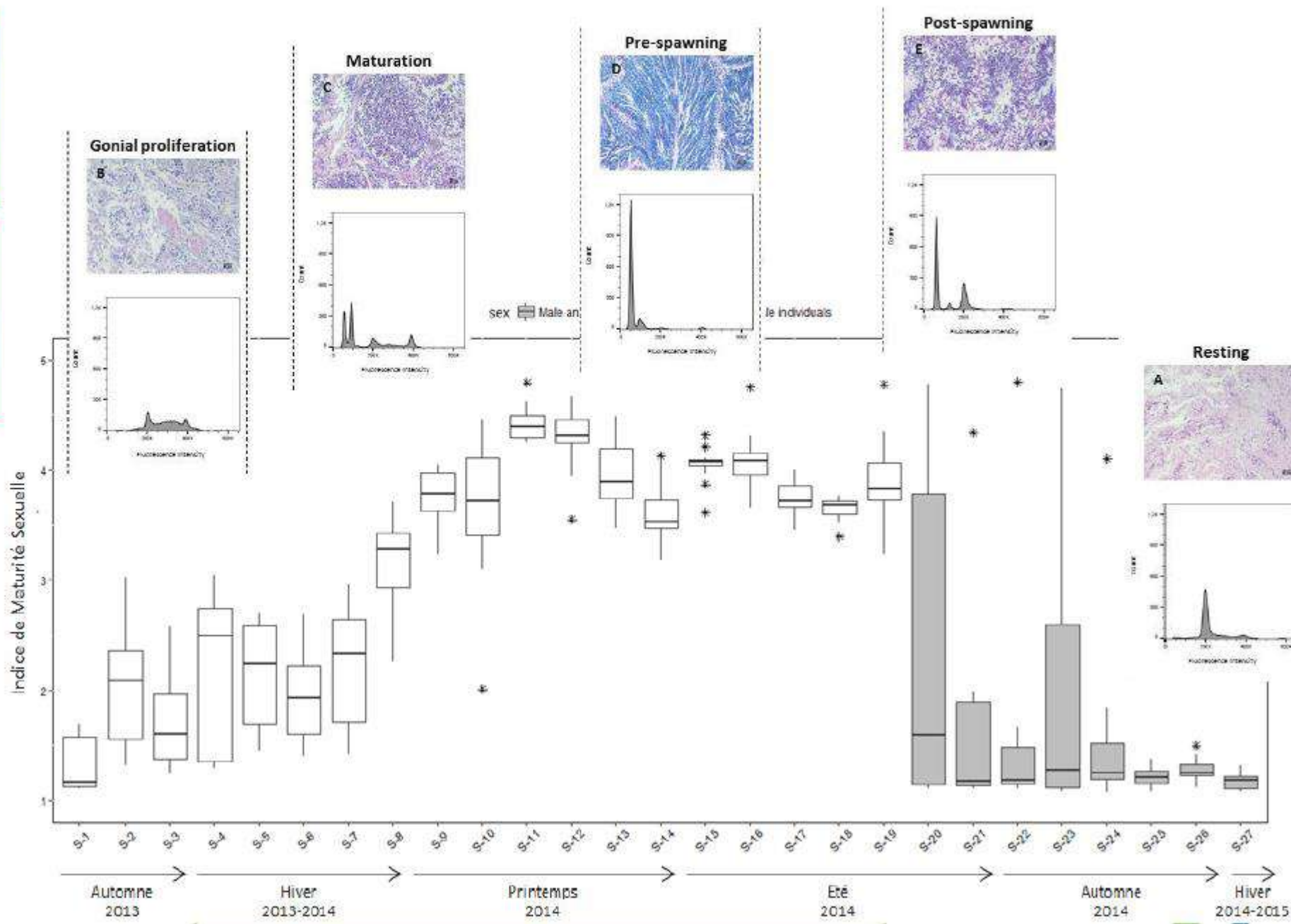
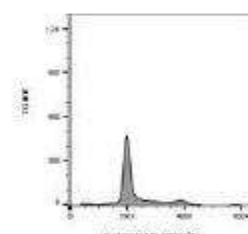
Pre-spawning



Post-spawning



Resting



Application des biomarqueurs de génotoxicité et de reprotoxicité – exemple de la carbamazépine (Projet Doremipharm – ANSM 2013-2016)

> en condition écosystémique (mésocosmes)

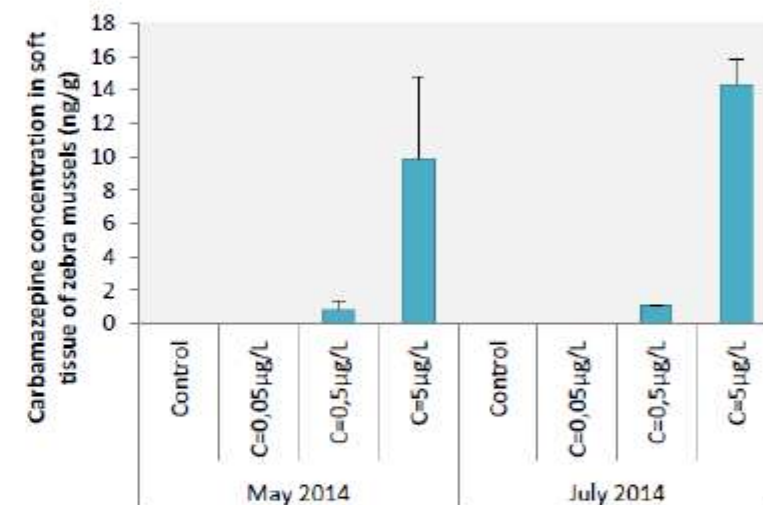
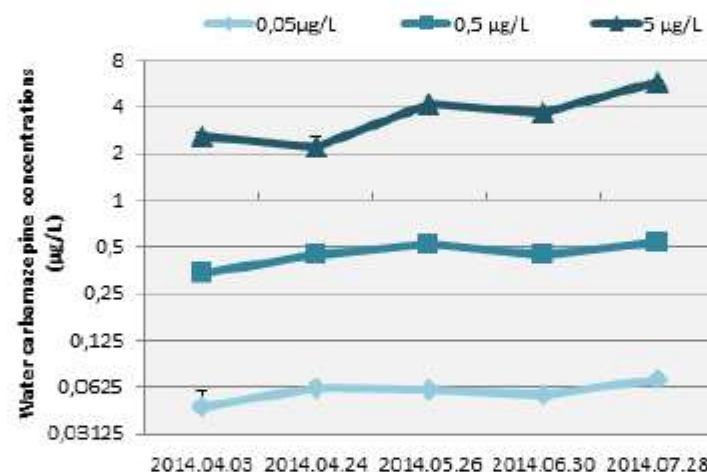


Trois concentrations

0,05 ; 0,5 et 5 $\mu\text{g/L}$

Semaines de transplantation

7, 15 et 26 sem.



⇒ Bioaccumulation de la carbamazépine par la dreissène
⇒ Pas de métabolite détecté

Application des biomarqueurs de génotoxicité et de reprotoxicité – exemple de la carbamazépine (Projet Doremipharm – ANSM 2013-2016)

> en condition écosystémique (mésocosmes)

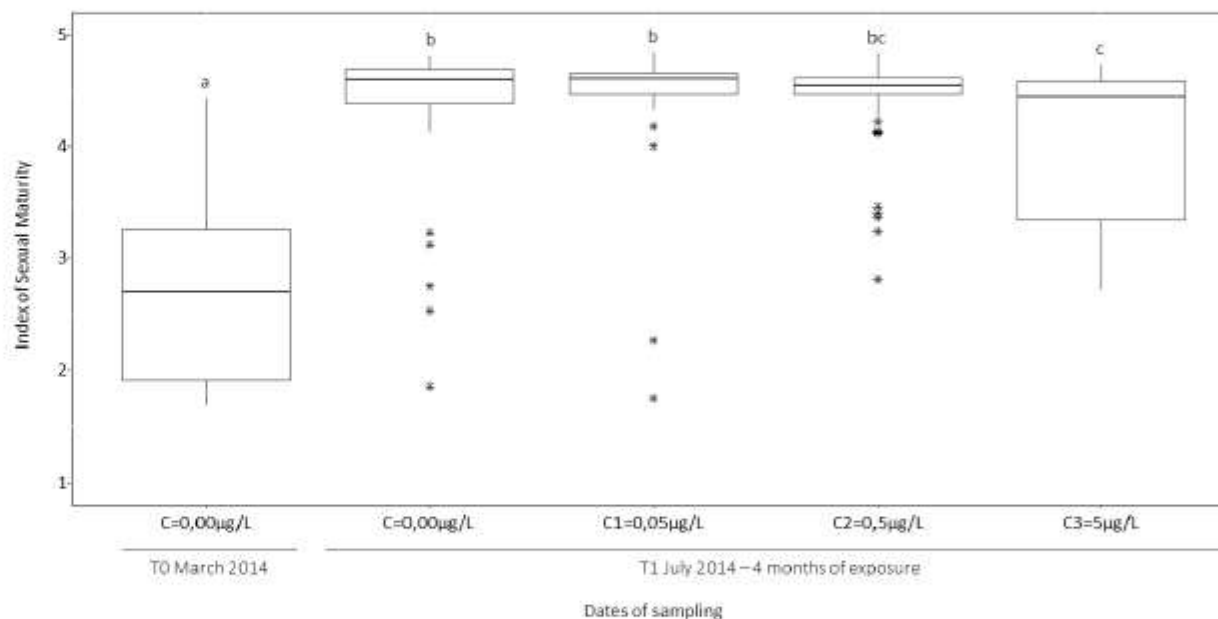


Trois concentrations

0,05 ; 0,5 et 5 µg/L

Semaines de transplantation

7, 15 et 26 sem.



⇒ **Reprotoxicité** de la carbamazépine à 5 µg/L

Application des biomarqueurs de génotoxicité et de reprotoxicité – exemple de la carbamazépine (Projet Doremipharm – ANSM 2013-2016)

> en condition écosystémique (mésocosmes)



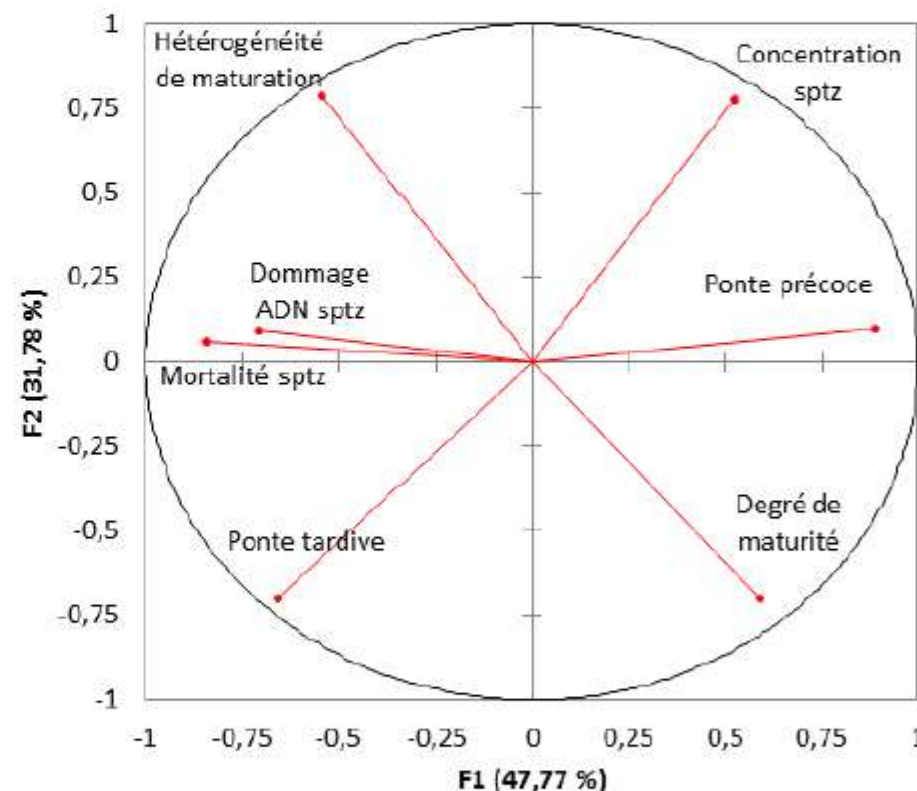
Trois concentrations

0,05 ; 0,5 et 5 µg/L

Semaines de transplantation

7, 15 et 26 sem.

ACP : Variables (axes F1 et F2 : 79,55 %)



⇒ Incidence sur la **qualité des gamètes**

Application des biomarqueurs de génotoxicité et de reprotoxicité – exemple de la carbamazépine (Projet Doremipharm – ANSM 2013-2016)

> en condition écosystémique (mésocosmes)

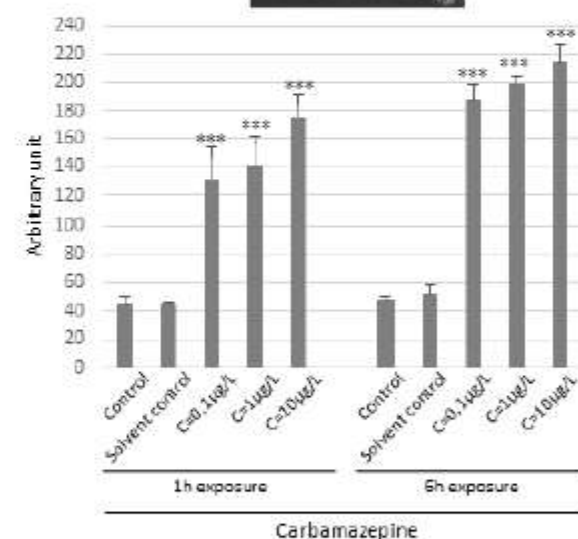
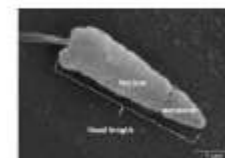
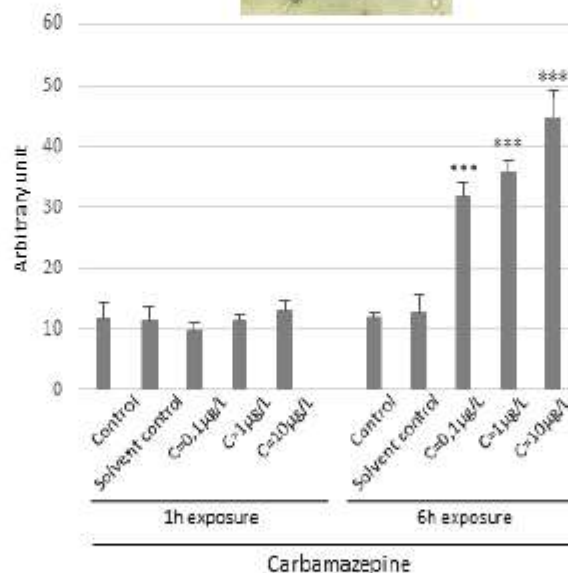


Trois concentrations

0,05 ; 0,5 et 5 µg/L

Semaines de transplantation

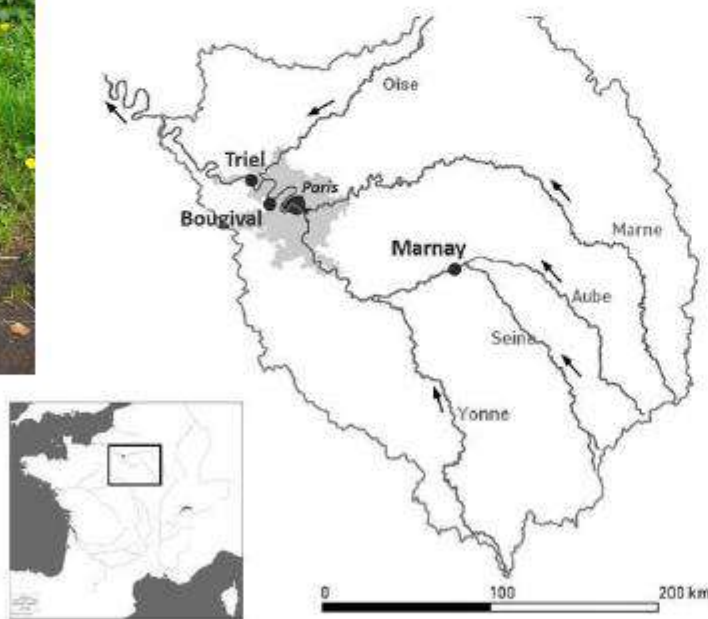
7, 15 et 26 sem.



- ⇒ **Génotoxicité** de la carbamazépine (*in vitro* et *in situ*)
- ⇒ Corrélation positive hémocytes vs spermatozoïdes

Application des biomarqueurs de génotoxicité et de reprotoxicité en conditions *in situ* par la transplantation des dreissènes

Projet PIREN Seine Phase VII (2015-2019)



Début 2016

Projet EQUAL (AERM)

Projet Interreg DIADeM



DIADeM *modélisation*

Apport de la modélisation
couplée à des essais en
mésocosmes :

**Lien entre marqueurs
d'effets précoces et les
effets de substances
chimiques sur les
populations.**

Rémy BEAUDOUIN

INERIS, DIADeM

METO - *Modèles pour l'Ecotoxicologie et
la Toxicologie*

Institut National de l'Environnement
Industriel et des RISques(INERIS),

DIADeM *modélisation*

Apport de la modélisation
couplée à des essais en
mésocosmes :

**Lien entre marqueurs
d'effets précoces et les
effets de substances
chimiques sur les
populations.**

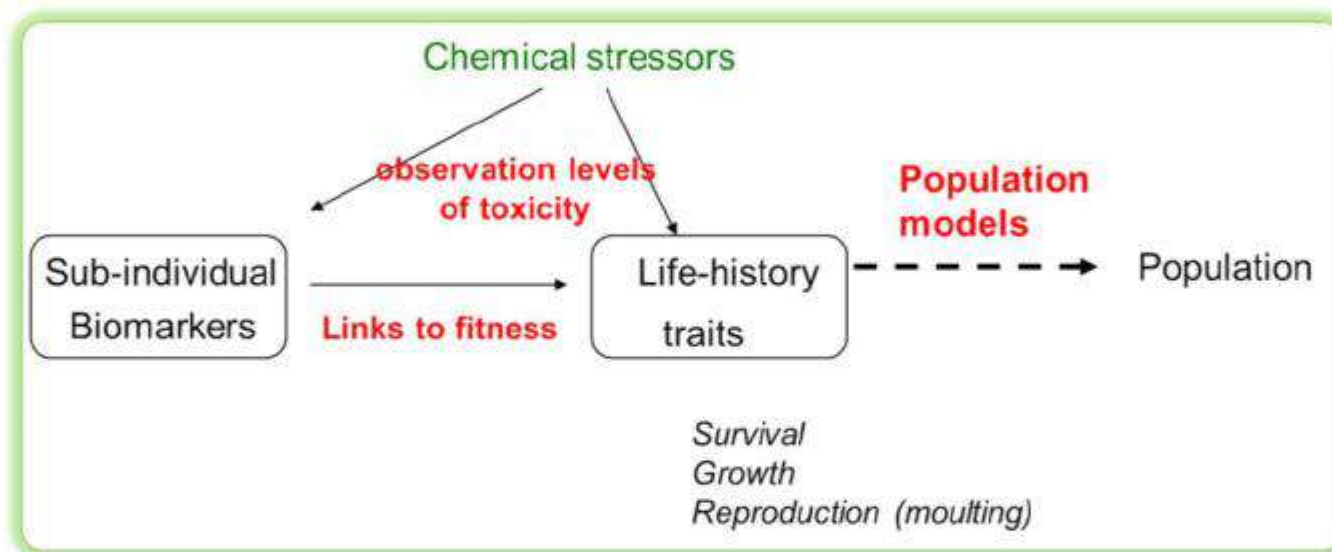
Rémy BEAUDOUIN

INERIS, DIADeM

METO - *Modèles pour l'Ecotoxicologie et
la Toxicologie*

Institut National de l'Environnement
Industriel et des RISques(INERIS),

- Extrapolation de mesures faites sur les organismes (MT 4) aux conséquences sur la viabilité des populations.

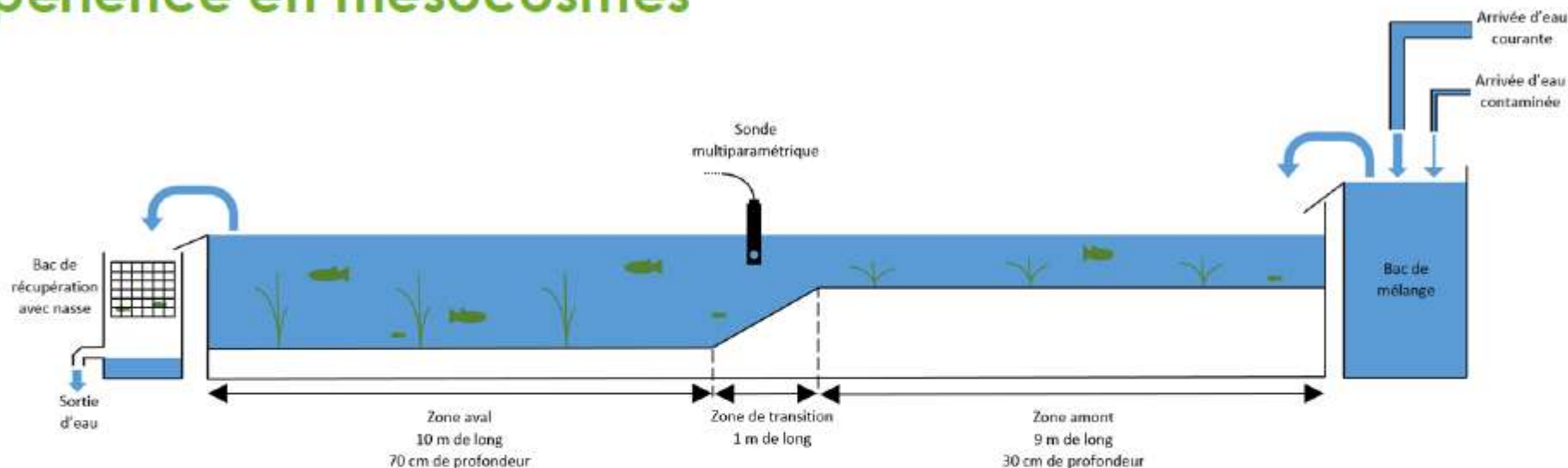


- Combine le développement de modèles mathématiques et une expérience en rivières artificielles (mésocosmes)
- Comparaisons prédictions des modèles et des observations

Expérience en mésocosmes



Expérience en mésocosmes



Effets d'un effluent de STEP reconstitué au niveau des populations et de l'écosystème.

- Mélange de Diclofénac, Carbamazépine, Naproxène, Paracétamol, Irbesartan
- Concentrations testées : 1x, 10x, 100x
- Données sur 3 espèces modèles (gammare, dreissène et épinoche) : biomarqueurs d'effet (MT4) et populations

Expérience en mésocosmes

Avr. 2017 Contamination continue Oct. 2017

Nov. – Dec.
Set up



Mars



Suivi biomarqueur et
dyn. populations



Oct.



Analyse des variables
populations



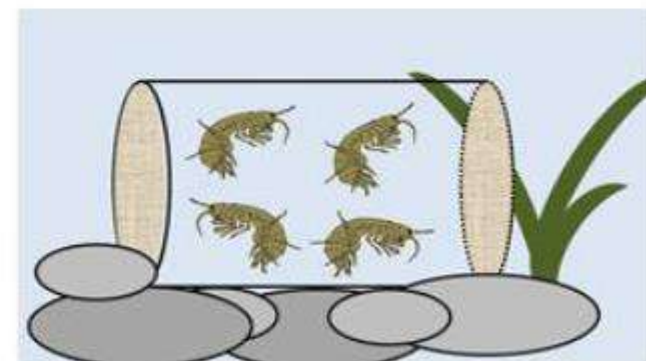
Expérience en mésocosmes : gammares

Mesure biomarqueurs et THV

- Biomarqueurs : AChE, GST, taux d'alimentation, perturbation de la mue.
- Traits d'histoire de vie : croissance, fertilité, survie embryonnaire.
- Bioaccumulation

Suivi de la dynamique de population

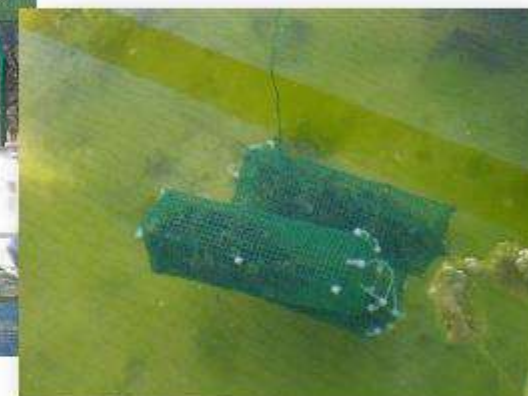
- 3 points de suivi (structure de taille, état reproducteur, sexe ratio,...)
- Sacs de litière placés 3 semaines avant la date de mesure



Expérience en mésocosmes : dreissènes

Mesure biomarqueurs

- Biomarqueurs : genotoxicité, immunotoxicité, marqueurs énergétiques
- Bioaccumulation



Mesure de traits histoire de vie

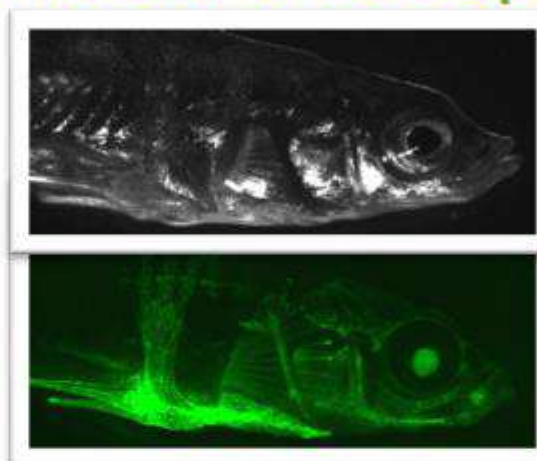
- Taux de filtration (fin d'expérience)
- Suivi de la croissance : biomasse et dimensions des coquilles
- Suivi de la survie



Expérience en mésocosmes : épinoche à trois épines

Mesure biomarqueurs

- Immunité, stress oxydant, biotransformation
- Bioaccumulation



Suivi de la dynamique de population

- Dérive des Larves (nbre/semaine)
- Suivi des nids (présence, durée cycle, renouvellement)
- 3 points de suivi par Capture, Marquage, Recapture : structure population (Abondance, longueur)



Expérience en mésocosmes : Communautés

Compartiment/Organismes	Critères d'effet	Méthodes
Eau	Substance(s) ($\mu\text{g.L}^{-1}$) $T^{\circ}(\text{C})$, pH, O_2 (mg.L^{-1}), Cond ($\mu\text{S.cm}^{-2}$)	Prélèvement d'eau Sondes
Macrophytes	Biovolume/espèce (m^3)	Obs. Visuelle
Periphyton	Biomasse ($\mu\text{g/cm}^2$)	Substrats Artificiels
Zooplancton	Abondance et diversité	Eau filtrée
Macroinvertébrés		Substrats Artificiels

Modélisation

Extrapoler au-delà des standards expérimentaux (interaction individu / environnement)

- Tester différents scénarios et hypothèses
- Prédire les conséquences des effets dans différents états écologiques
- Identifier les variables biologiques les plus pertinentes

Modèles de la dynamique de population

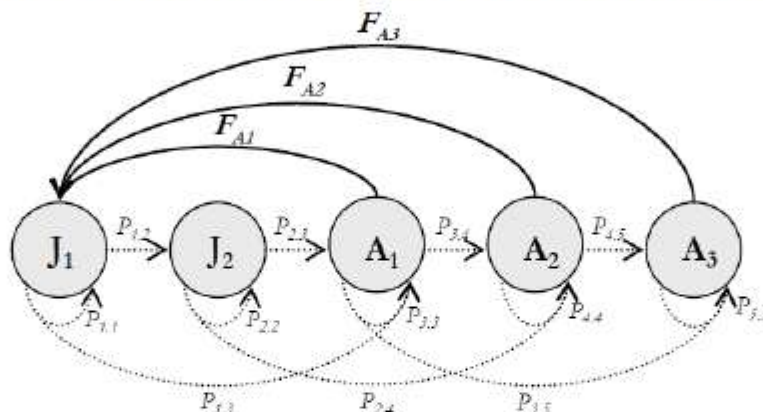
- Modèle matriciel (Gammare)
- Modèle individu-centré (Epinoche, Dreissène)



Modélisation populationnelle : Matrice de Leslie

Prise en compte d'une structuration de la population (taille) → modèle lefkovitch

Graphe de cycle de vie
2 classes juvéniles
3 classes adultes



- Différences de sensibilité
- Impacts croissance
- Sensibilité démographique



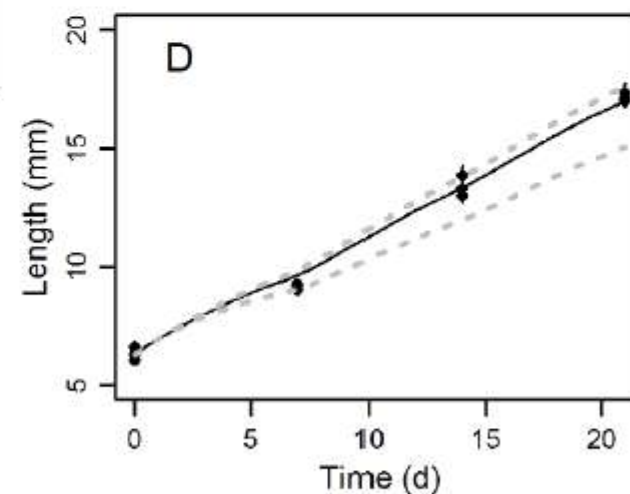
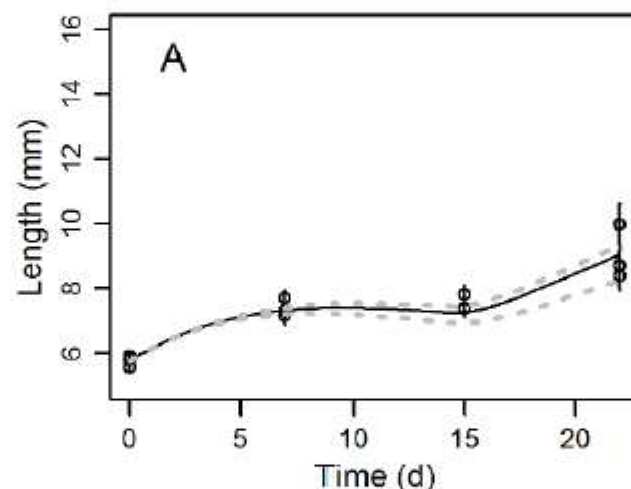
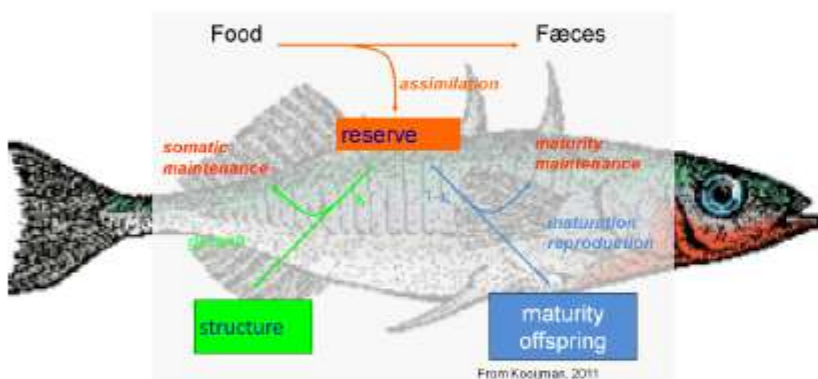
Prise en compte de la phénologie (variabilité saisonnière) → modèle périodique

$$n(t+1) = \left(\prod_{k=1}^{12} M_k \right) n(t) = L n(t)$$

$$M_k = \begin{bmatrix} s_1(k)(1 - \sum_{j>1} g_{1,j}(k)) & 0 & f_3(k)\sqrt{s_1(k)}\sqrt{s_3(k)} & f_4(k)\sqrt{s_1(k)}\sqrt{s_4(k)} & f_5(k)\sqrt{s_1(k)}\sqrt{s_5(k)} \\ s_1(k)g_{1,2}(k) & s_2(k)(1 - \sum_{j>2} g_{2,j}(k)) & 0 & 0 & 0 \\ s_1(k)g_{1,3}(k) & s_2(k)g_{2,3}(k) & s_3(k)(1 - \sum_{j>3} g_{3,j}(k)) & 0 & 0 \\ s_1(k)g_{1,4}(k) & s_2(k)g_{2,4}(k) & s_3(k)g_{3,4}(k) & s_4(k)(1 - g_{4,5}(k)) & 0 \\ s_1(k)g_{1,5}(k) & s_2(k)g_{2,5}(k) & s_3(k)g_{3,5}(k) & s_4(k)g_{4,5}(k) & s_5(k) \end{bmatrix}$$

Modélisation populationnelle : individu-centrée

Modèle « dynamic energy budget » (DEB) : Leloutre et al. 2017

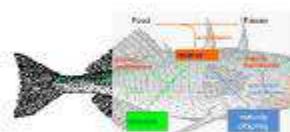


Modèle DEB-tox

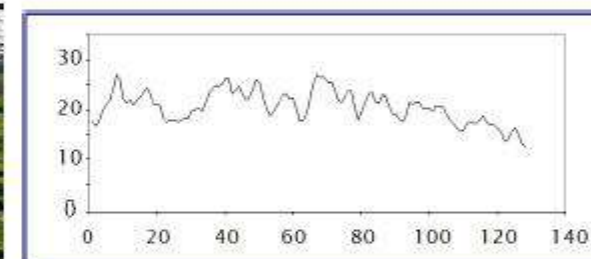
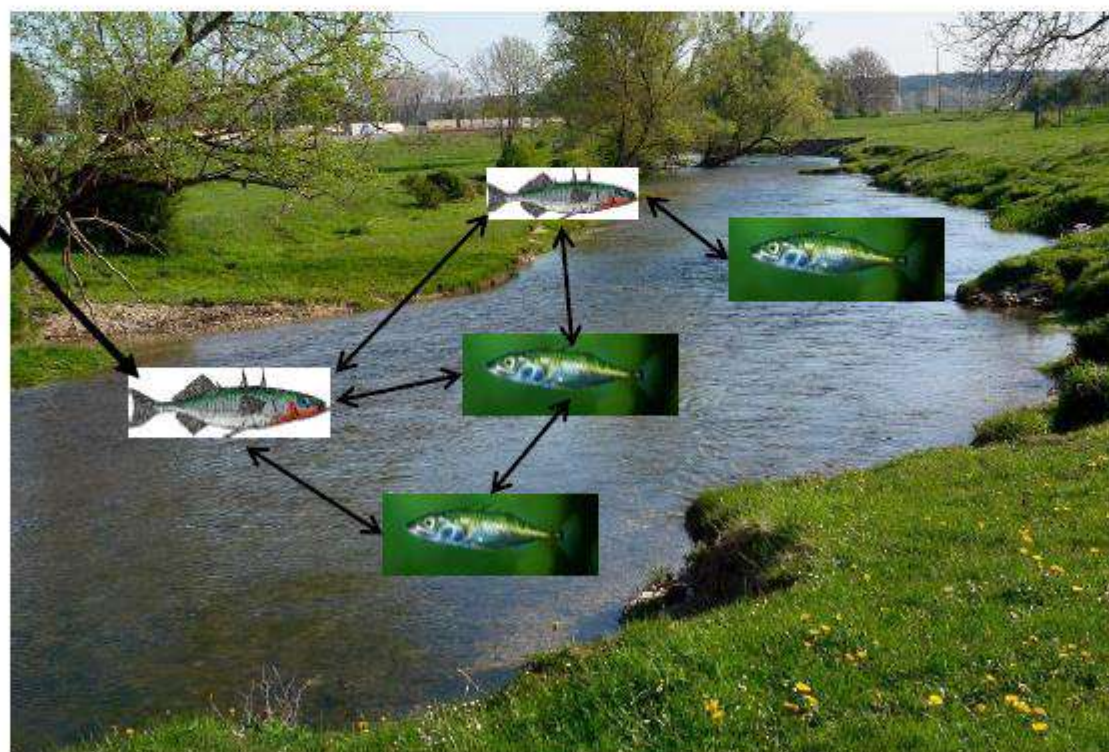
Modélisation populationnelle : individu-centrée

Modèle « dynamic energy budget » (DEB) : Leloutre et al. 2017

Modèle individu-centré de la dynamique de population



Un individu
(entité autonome)



Démarche d'extrapolation

Changement d'échelle : à partir des traits d'histoire de vie mesurés par encagement

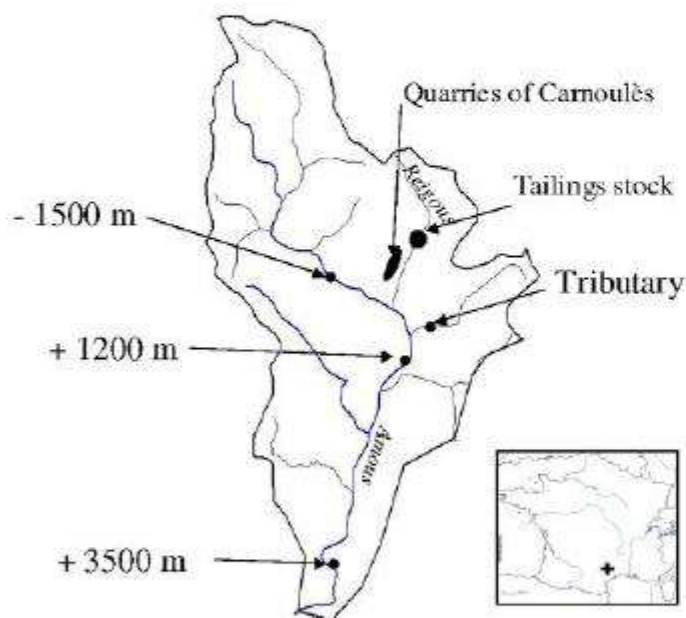
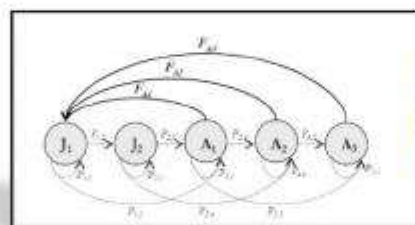


Fig. 1. Localization of study area and sampling stations.

Ex: Bassin de l'Amous

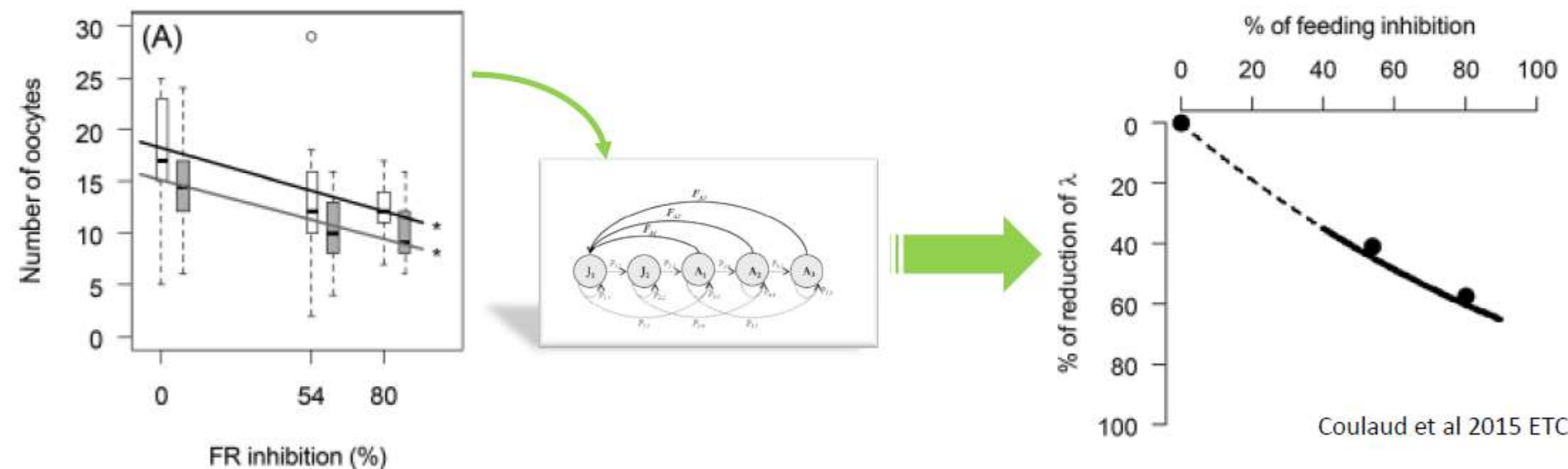


	stations			
	tributary	upstream – 1500 m	downstream + 1200 m	downstream + 3500 m
(A) recorded individual traits during in situ assay				
juvenile survival (%)	83	71*	19*	95
adult survival (%)	96	92	42*	94
fertility (embryos per female)	18.0	1.7*	/	7.5*
(B) projected population impacts (% reduction in the asymptotic population growth rate λ)				
all traits	/	99	99	80
juvenile survival	/	65	99	no impact
adult survival	/	no impact	81	no impact
fertility	/	98	/	80



Démarche d'extrapolation

Changement d'échelle : à partir des biomarqueurs



Bilan et perspectives

Expérience en mésocosmes : en cours

- Mesure des biomarqueurs et des traits d'histoire de vie (témoins / contaminés)
- Suivi de la dynamique des populations (témoins / contaminés)
- Evaluation du danger du mélange pour les populations (effet direct et indirect)
- Acquisition des données permettant le développement des modèles et tester leur capacité prédictive

Modélisation du changement d'échelle

- Développement et paramétrisation à partir des expériences passées
- Compréhension des effets sur les populations en mésocosmes
- Prédiction des effets à long terme en fonction des réponses des biomarqueurs sur le terrain (MT4)



Micropolluants *l'Escaut*

Micropolluants :
**l'exemple du bassin
versant de l'Escaut**

Isabelle SAUNIER

Présidente du groupe de
travail RHME

Commission Internationale
de l'Escaut



Les micropolluants sur le Bassin de l'Escaut

Réseau Homogène de mesures de l'Escaut
Commission Internationale de l'Escaut

Isabelle SAUNIER

8 juin 2017



Le district hydrographique de l'Escaut

Un petit district, mais dense:

Superficie : 36.416 km²

Population : 12.855.000 habitants

Densité de population moyenne : 352 hab/km²

Un profil singulier :





La Commission Internationale de L'Escaut

Six Etats et Régions partenaires:



La France,



La Belgique et ses trois composantes :



Wallonie, Bruxelles-Capitale et Flandre

Les Pays-Bas

Un objectif:

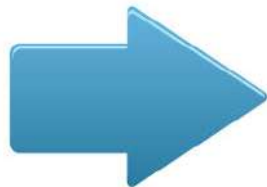
« Parvenir à une gestion durable et intégrale de l'ensemble du district, en faisant face à des enjeux cruciaux aussi bien sur le plan quantitatif (crues, inondations, sécheresses...) qu'au niveau qualitatif (avec la lutte pour un bon état écologique et contre les pollutions »



Le réseau Homogène de Mesures

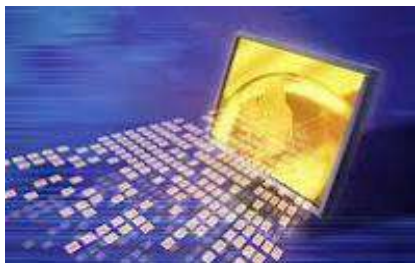
37 stations

98 paramètres



Rapport annuel sur l'Escaut

Rapport triennal sur le district



Coordination informatique:

Bases de données



Coordination des méthodes d'analyse:

Prélèvement

Préparation des échantillons

Technique de mesure (normes)

Assurance qualité



Coordination sur l'analyse des résultats:

Valoriser les analyses

Conserver l'historique



Le réseau Homogène de Mesures

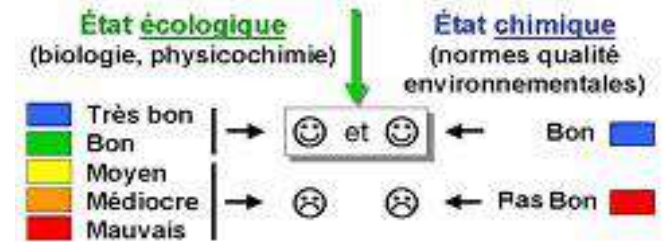




Réglementation

Directive Cadre sur l'Eau (DCE) (2000/60/EC)

La notion de bon état eaux de surface

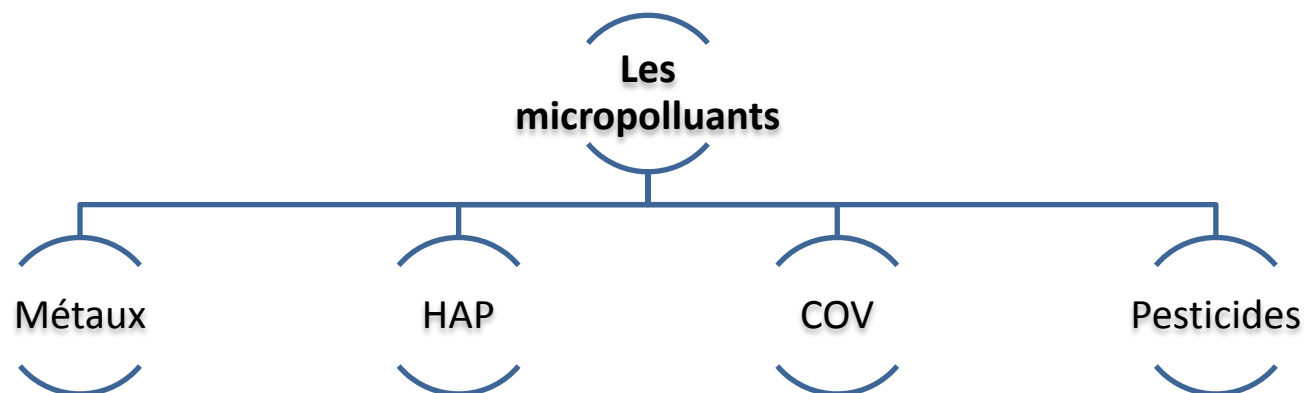


Source : Agence de l'eau Loire Bretagne

Directive fille de la DCE (2013/39/EC)

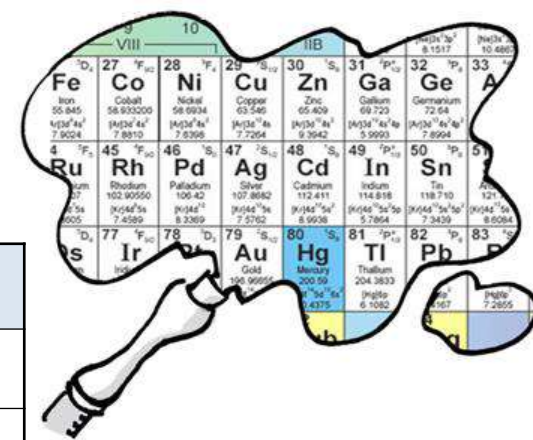
Norme de qualité environnementale en moyenne annuelle : **NQE MA**

Norme de qualité environnementale en Concentration Maximale Admissible: **NQE CMA**





Les métaux

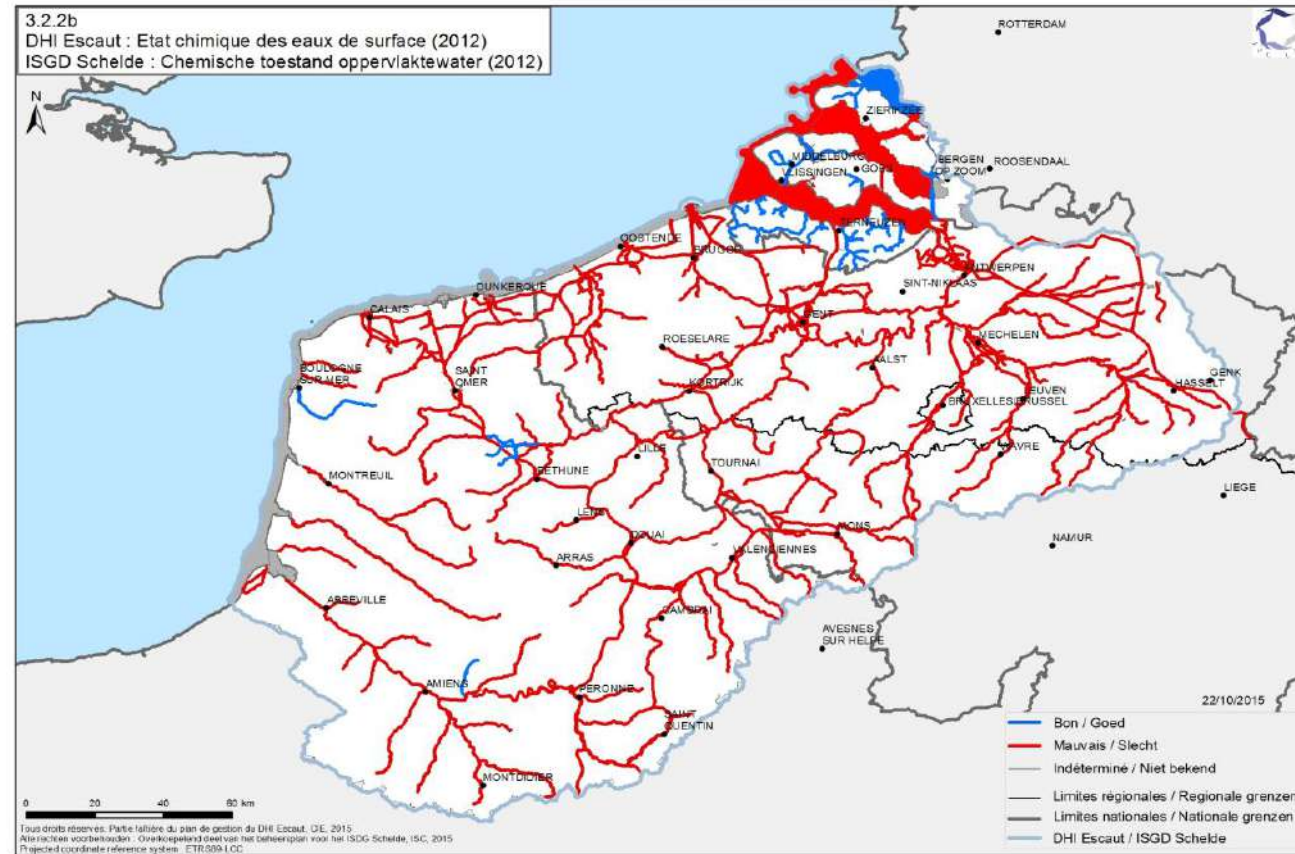
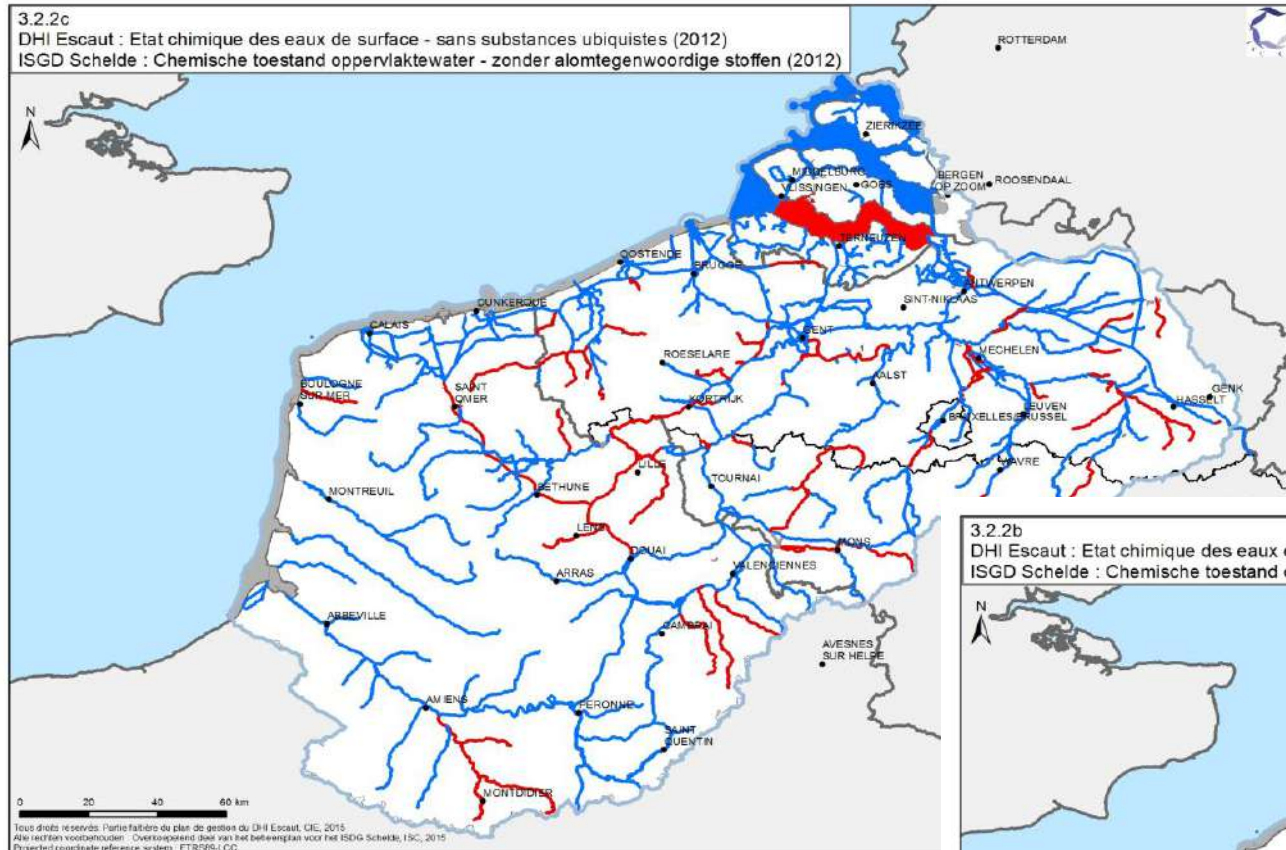


Moyennes annuelles µg/L	2011		2012		2013		2014		2015		NQE MA
Cadmium soluble	0,08	👍	0,06	👍	0,05	👍	0,07	👍	0,06	👍	0,25
Cuivre soluble	1,45		1,39		1,27		1,70		1,95		
Mercure soluble	0,00		0,01		0,01		0,01		0,01		
Nickel soluble	2,53	👍	2,08	👍	2,19	👍	2,36	👍	2,35	👍	4,00
Plomb soluble	0,28	👍	0,44	👍	0,34	👍	0,28	👍	0,38	👍	1,20
Zinc soluble	7,55		17,76		7,42		8,98		14,33		

Maxima annuels µg/L	2011		2012		2013		2014		2015		NQE CMA
Cadmium soluble	0,52	👍	0,49	👍	0,18	👍	0,23	👍	0,26	👍	1,50
Cuivre soluble	4,68		5,48		19,00		5,00		7,80		
Mercure soluble	0,01	👍	0,03	👍	0,03	👍	0,02	👍	0,03	👍	0,07
Nickel soluble	10,20	👍	8,20	👍	8,70	👍	28,00	👍	6,30	👍	34,00
Plomb soluble	5,30	👍	4,24	👍	3,10	👍	1,53	👍	8,80	👍	14,00
Zinc soluble	33,00		54,00		42,80		41,80		430		



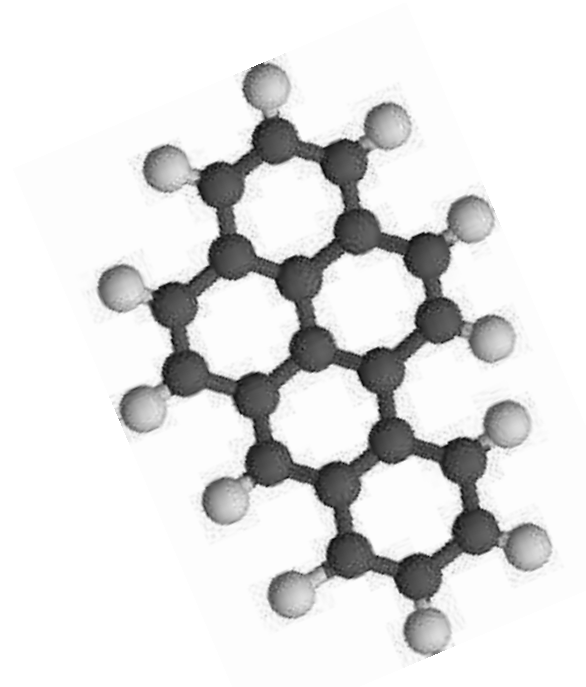
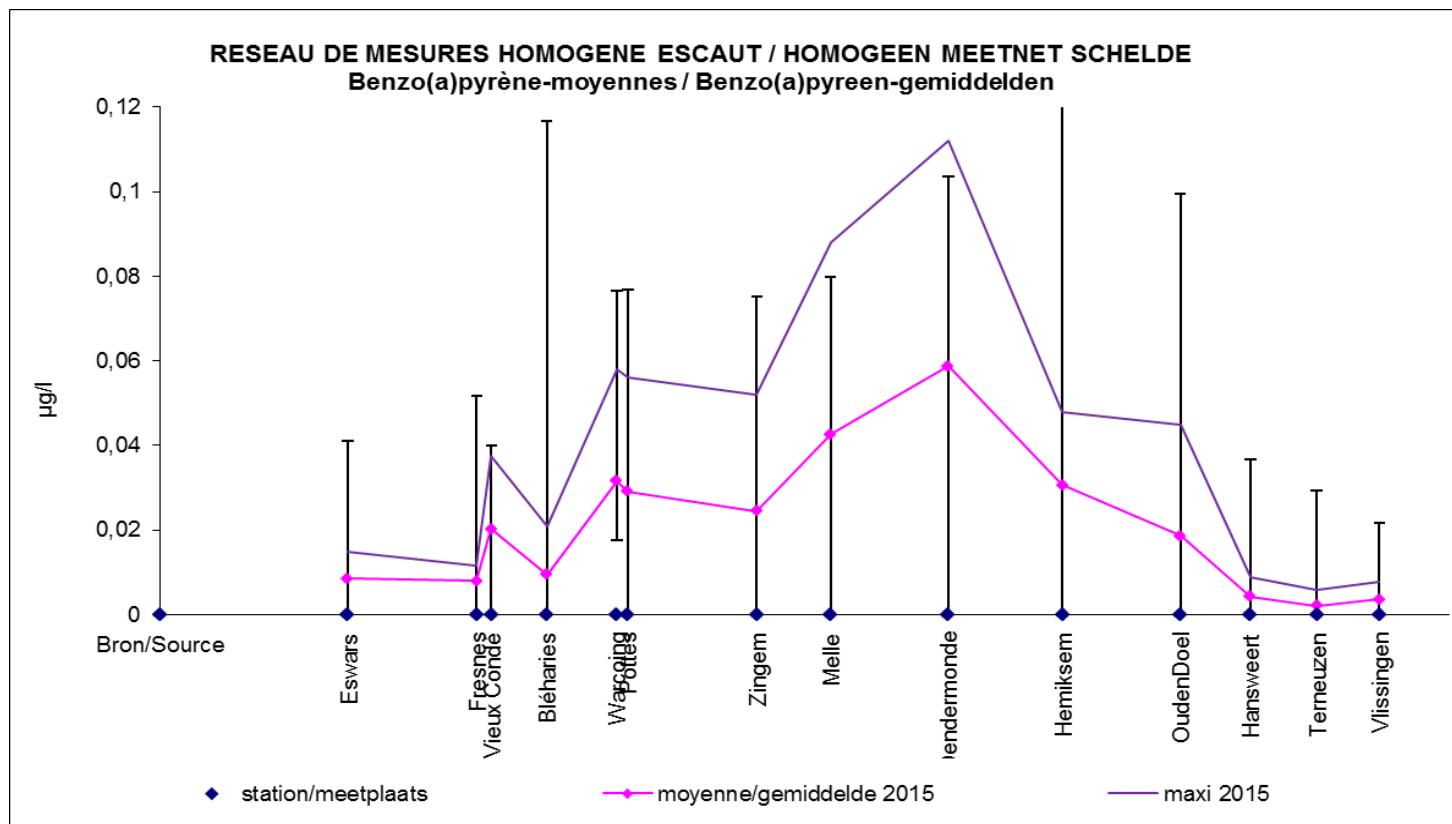
Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques





Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

$\mu\text{g/L}$	NQE MA	2011 à 2015	NQE CMA	2011 à 2015
Anthracène	0,1		0,1	
Fluoranthène	0,0063		0,12	
Benzo(a) pyrène	0,00017		0,27	
Naphtalène	2		130	



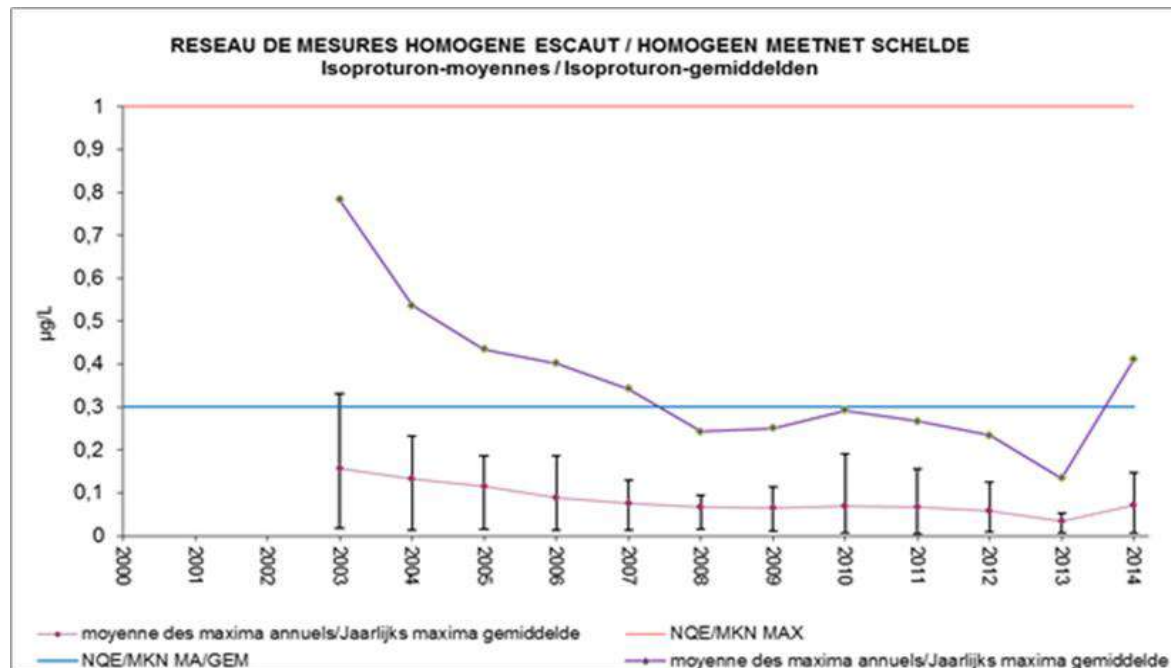
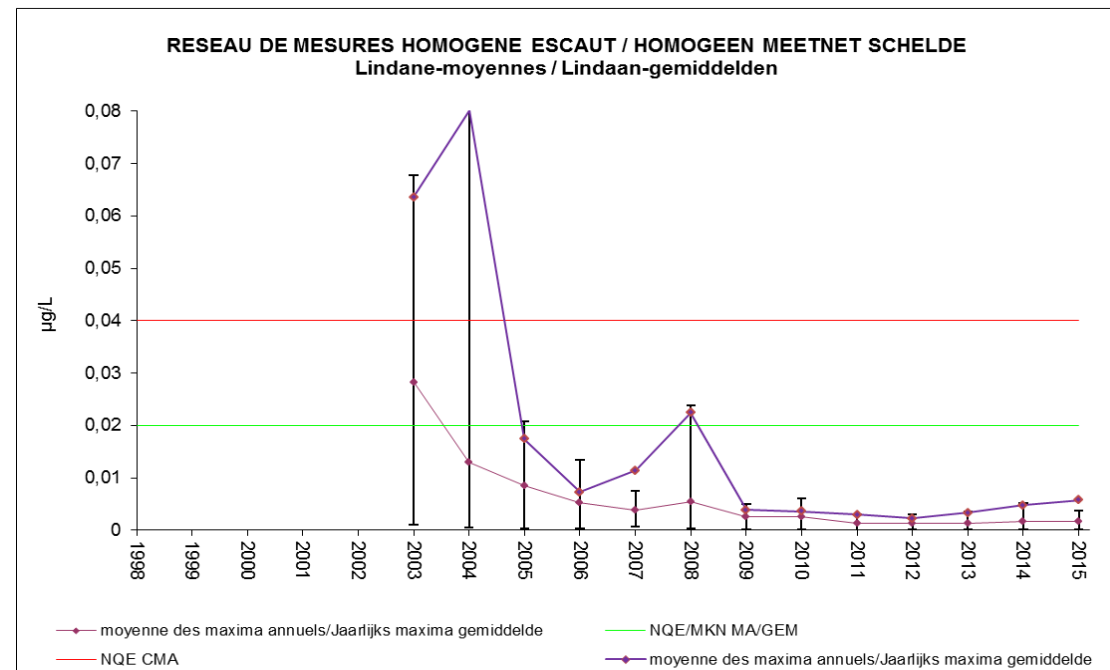
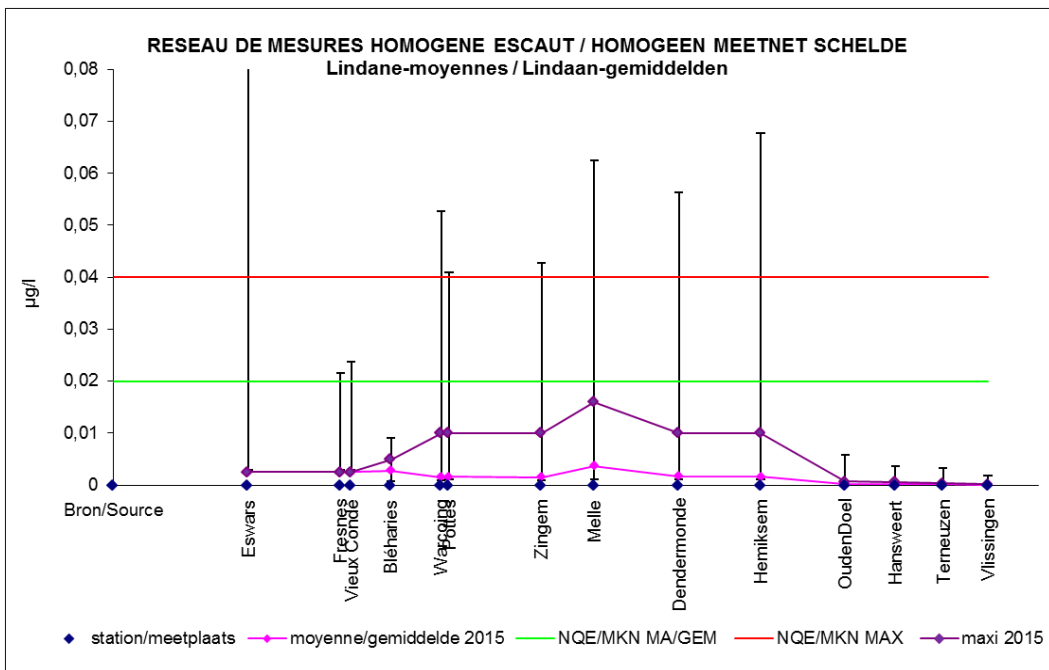


Les Composés Organiques Volatils

% de quantification	2011	2012	2013	2014	2015	?
Trichloromethane (chloroforme)	12%	31%	18%	29%	68%	👍
1,2-dichloroéthane	12%	7%	4%	30%	48%	👍
Dichloromethane	10%	2%	4%	29%	46%	👍
Tetrachloroéthylène	11%	10%	8%	4%	11%	👍
Tetrachlorure de carbone	1%	0%	0%	28%	45%	👉
1,2,4 Trichlorobenzène	0%	0%	0%	29%	43%	👍
Trichloroéthylène	6%	3%	4%	29%	49%	👍
1,3,5 Trichlorobenzène	0%	0%	0%	29%	42%	👍
1,2,3 Trichlorobenzène	0%	0%	0%	29%	42%	👍
Trichlorobenzènes (tous les isomères)	0%	0%	0%	0%	0%	👍



Les Pesticides





Conclusion



Diversité des problématiques liées à la qualité des cours d'eau:
Diversité des origines : agricole, industrielle humaine
Voies d'apport variées: apports diffus, rejets d'eau usées, apports atmosphériques,...

Depuis 1998, on observe une amélioration de la qualité des cours d'eau du District hydrographique de l'Escaut. Les efforts entrepris devront être prolongés afin d'atteindre les objectifs assignés par la DCE, c'est-à-dire l'atteinte du bon état chimique et écologique des masses d'eau.



- ☐ Etudier plus de paramètres
- ☐ Mieux coordonner les plans de surveillance
- ☐ Mettre en évidence les effets des actions des parties
- ☐ Regarder sur une durée plus longue
- ☐ Prendre en compte les effets du changement climatique

Micropolluants *la Seine*

L'exemple de la Seine:

**Imprégnation en micro-
polluants historiques et
émergents d'un bassin
versant fortement urbanisé**

Johnny GASPERI

Laboratoire Eau Environnement
et Systèmes Urbains (LEESU)

Bassin de la Seine : Imprégnation en micropolluants historiques et émergents d'un bassin versant fortement urbanisé

Johnny Gasperi

ASTEE 96th Annual Conference – June 6 to 9, 2017

Liège, Belgique

Bassin de la Seine : Imprégnation en micropolluants historiques et émergents d'un bassin versant fortement urbanisé

Johnny Gasperi, Elodie Moreau-Guigon, Pierre Labadie, Martine Blanchard, Marie-Jeanne Teil, Khawla Tlili, Tuc Quoc Dinh, Chau Tran, Cendrine Dargnat, Fatima Tamtam, Fabrice Alliot, Annie Desportes, Catherine Bourges, Marc Chevreuil, Mathieu Cladière, Catherine Lorgeoux, Cécile Miège, Philippe Bados, Marina Coquery, Lucie Oziol, Maya Bimbot, Viviane Huteau, Sara Karolak, Yves Levi, Gwenaëlle Lavison, Patrick Candido, David Gateuille, Cyrielle Briand, Jean-Marie Mouchel



Imprégnation du bassin de la Seine

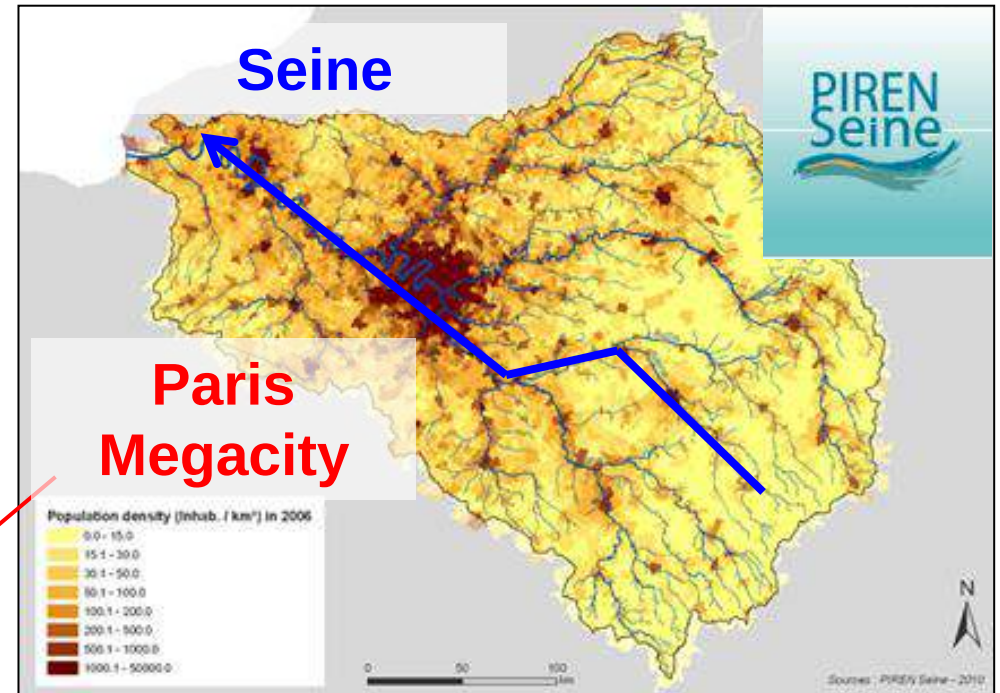
Bassin de la Seine

Paris Megacity



- 2,500 km²
- 12 million habitants

65% de la population vit sur
1% du bassin de la Seine



Bassin de la Seine :

- 78 500 km²
 - 67% territoires agricoles
 - 26% forêts
 - 7% territoires urbains
- 18,3 habitants
- Agriculture intensive (25% de la production nationale)

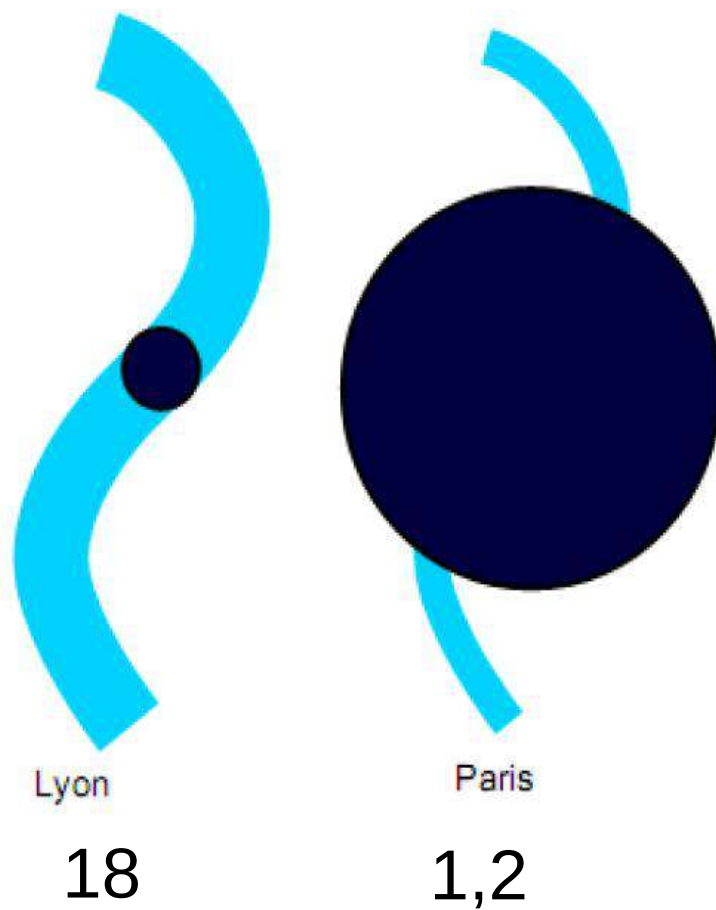


Imprégnation du bassin de la Seine

Bassin de la Seine

BV Seine : 18 million hab.
Seine : $310 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

BV Escaut : 12,8 million hab.
Escaut : $115 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



$\text{m}^3 \text{ j}^{-1} \text{ habitant}^{-1}$

18

1,2

Imprégnation du bassin de la Seine

PIREN-Seine



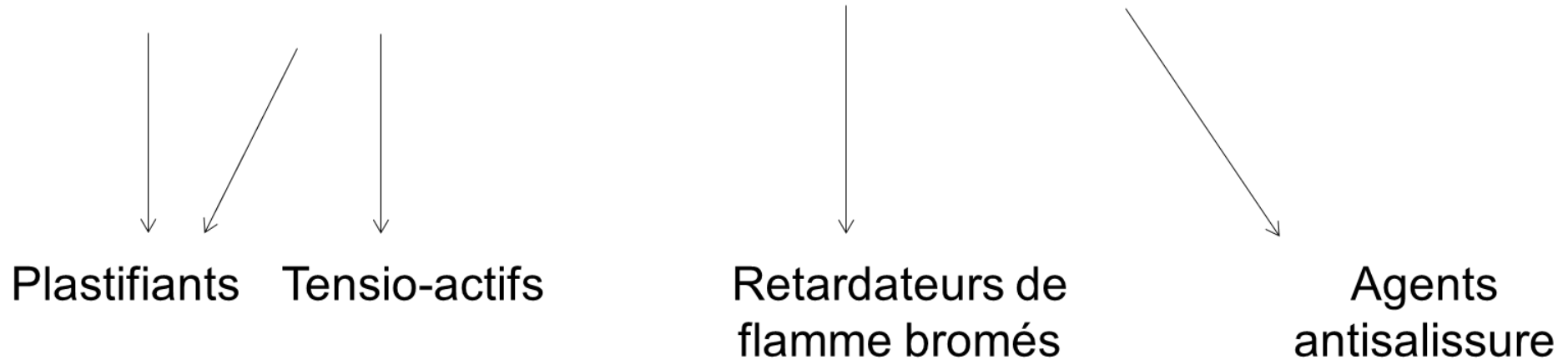
Contamination de la Seine par les
micropolluants organiques :
Quelle imprégnation du milieu récepteur ?
Quelle variabilité spatio-temporelle ?
Quelle dynamique des polluants ?



Imprégnation du bassin de la Seine

Quelles molécules ?

Phtalates BPA / AP HAP PCB PBDE Perfluorés Hormones Médicaments



Imprégnation du bassin de la Seine

Quelles molécules ?

Phtalates BPA / AP HAP PCB PBDE Perfluorés Hormones Médicaments

Origines
pyrolytique / diagénétique
/ pétrogénique



Fluides diélectriques
(transformateur électrique,
condensateur, etc,)



Utilisées pour des
usages domestiques,
professionnels ou
vétérinaires



Imprégnation du bassin de la Seine

Quelles approches ?

Contamination de la Seine par les
micropolluants organiques
Imprégnation du milieu ?
Variabilité spatio-temporelle ?
Dynamique des polluants ?



Approche 1

Profils longitudinaux
de la Seine

Tronçons amont-aval

Approche 2

Suivi sur 3 sites
Marnay/Bougival/Triel

Gradient urbanisation

Approche 3

Dynamique
géochimique

Cycle de crue

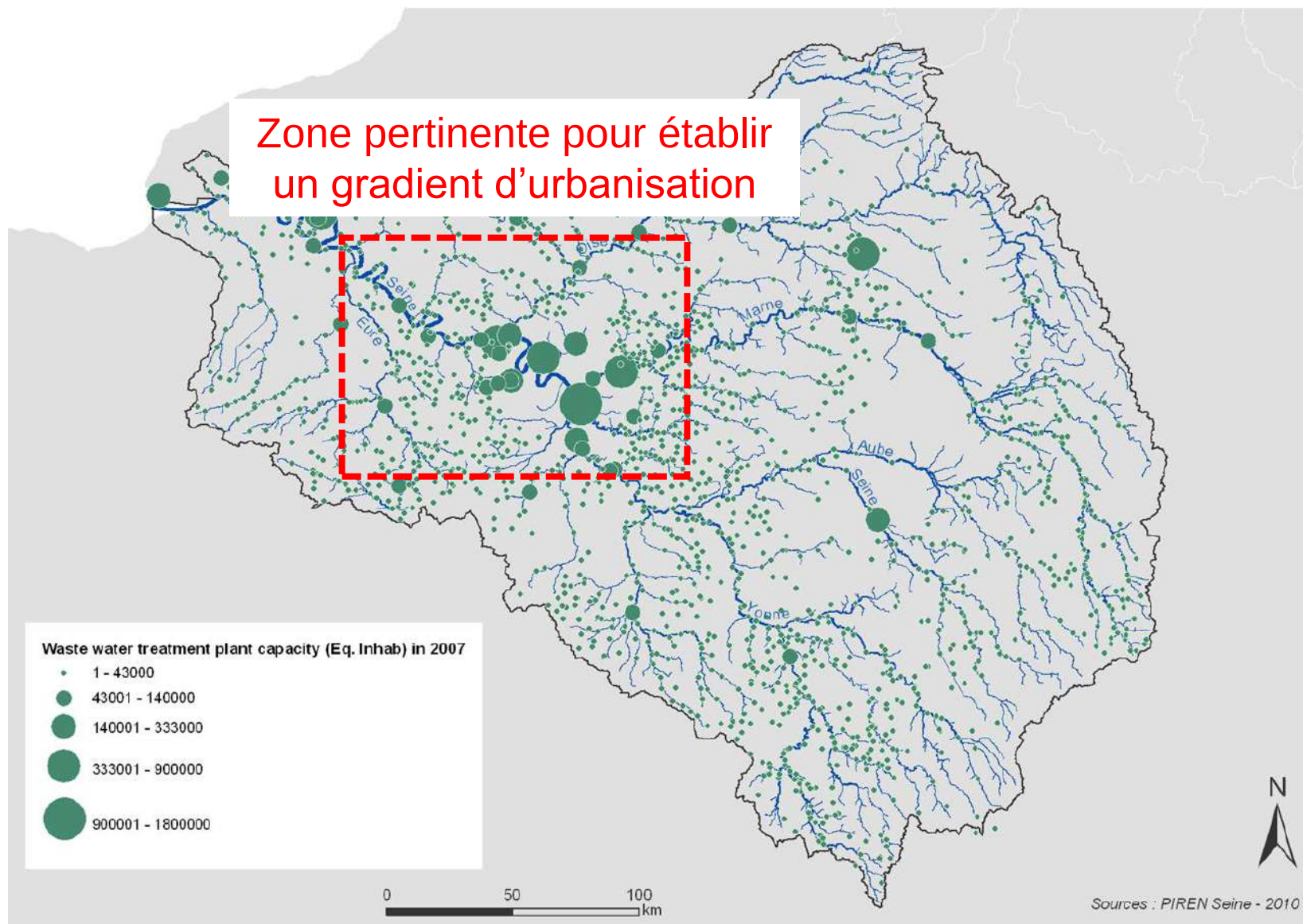
Approche 4

Bilan micropolluants



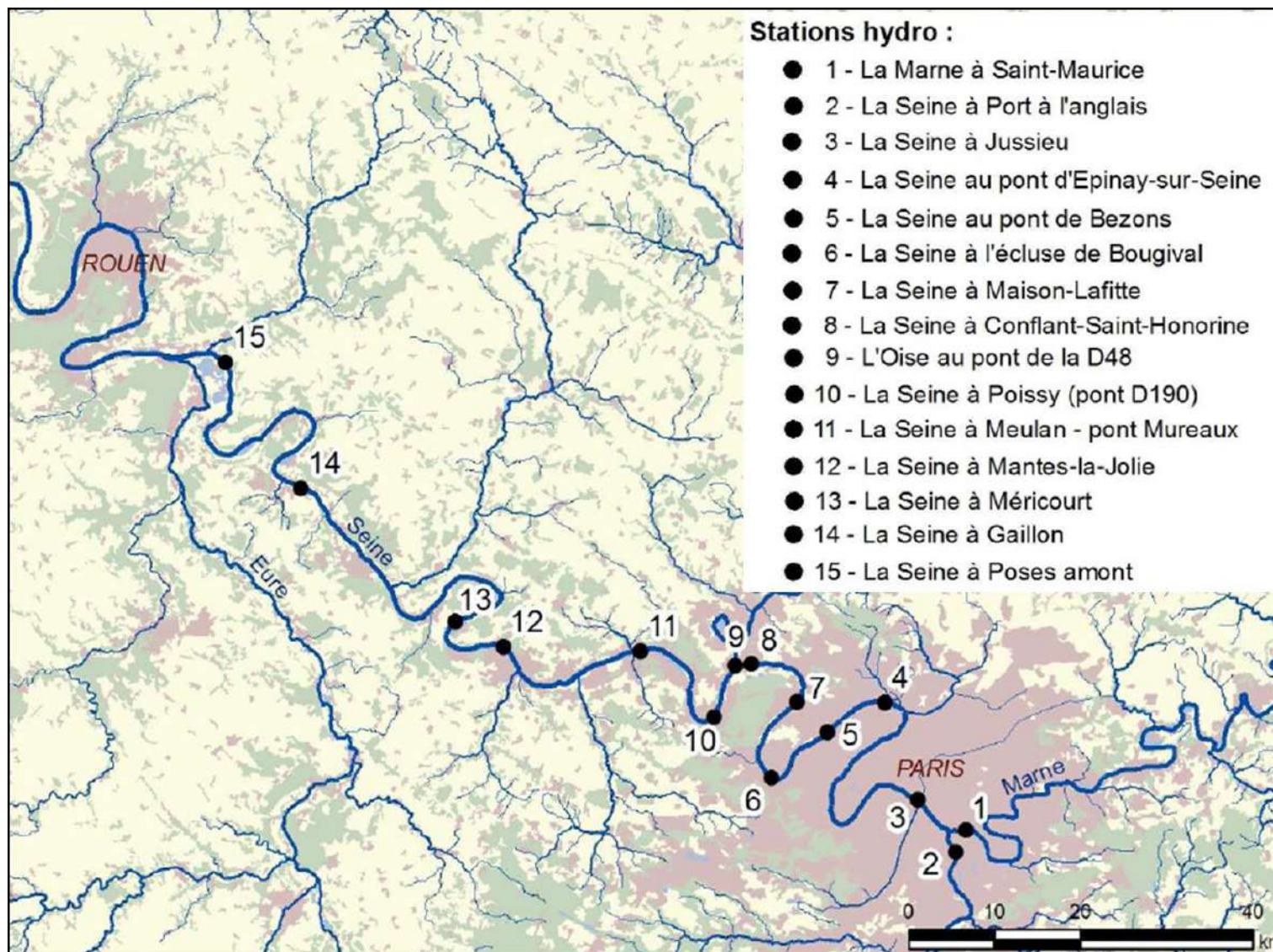
Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 1 Profils amont-aval



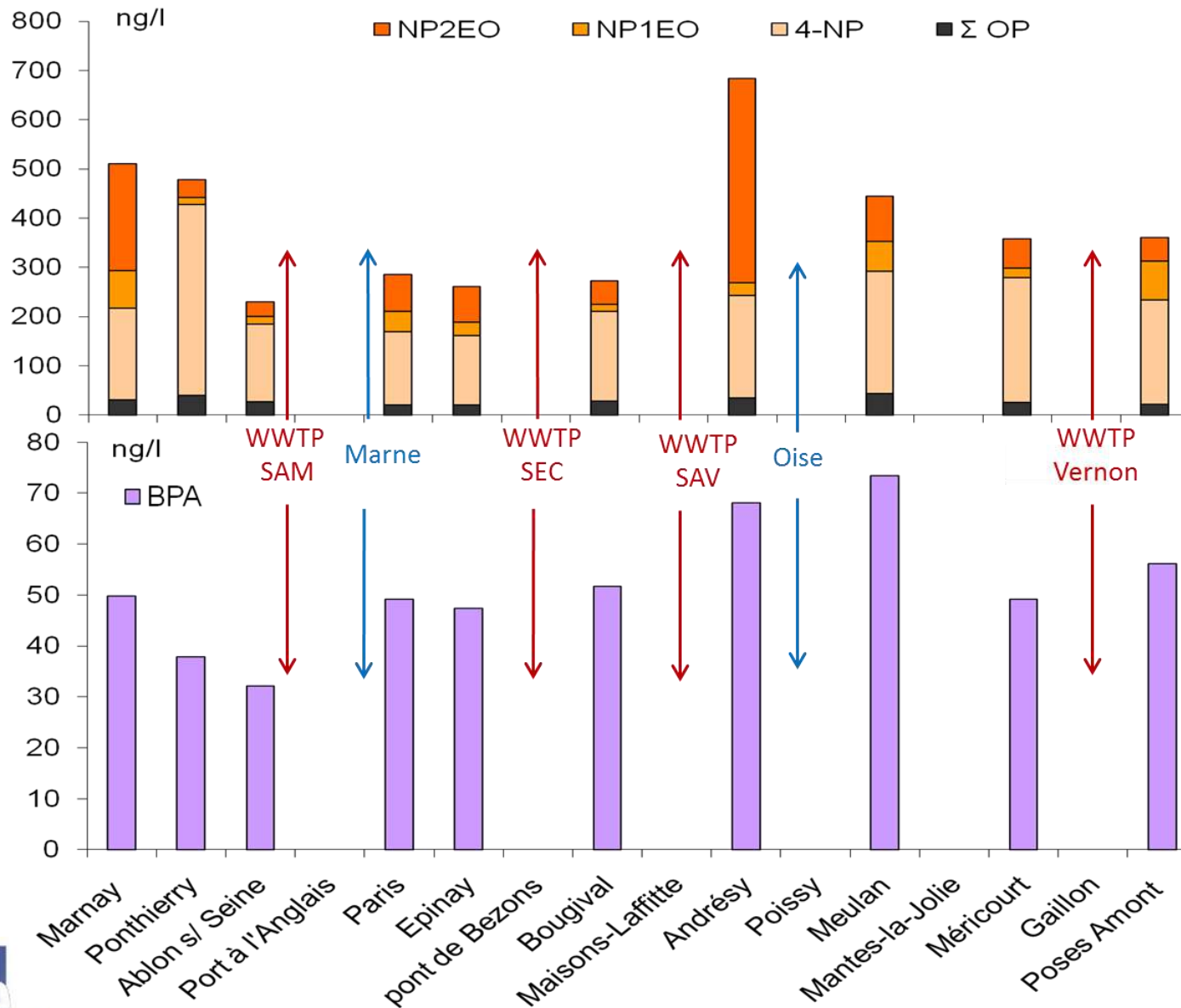
Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 1 Profils amont-aval



Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 1 Profils amont-aval



Basses eaux

Débits (Paris)
 $180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

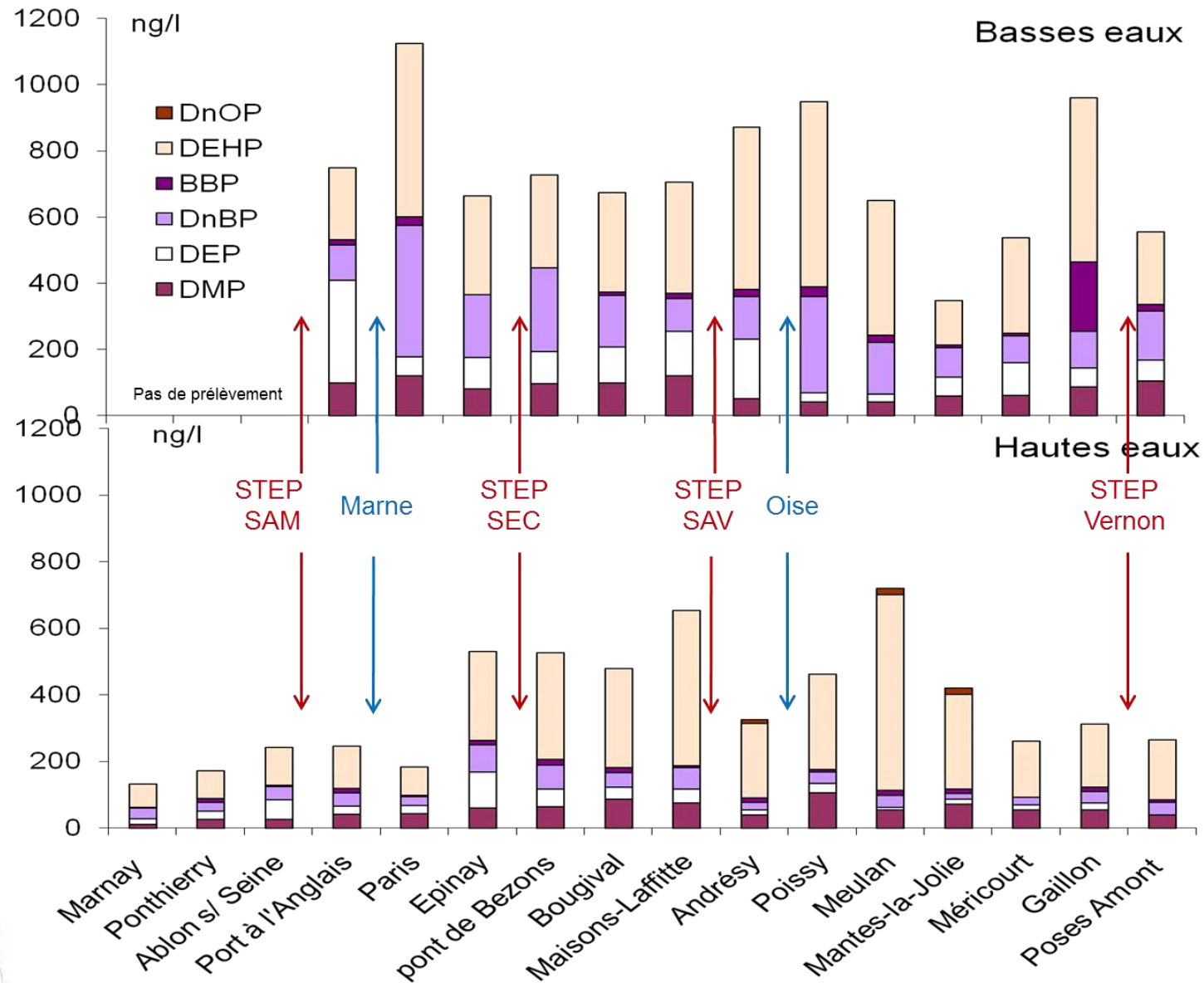
Evolution spatiale
non significative
entre l'amont et
l'aval pour AP

Impact de l'aggl.
parisienne pour le
BPA



Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 1 Profils amont-aval



Basses eaux

Débit (Paris)
 $145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Hautes eaux

Débit (Paris)
 $671 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Imprégnation du bassin de la Seine

Quelles approches ?

Contamination de la Seine par les
micropolluants organiques
Imprégnation du milieu ?
Variabilité spatio-temporelle ?
Dynamique des polluants ?



Approche 1

Profils longitudinaux
de la Seine

Tronçons amont-aval

Approche 2

Suivi sur 3 sites
Marnay/Bougival/Triel

Gradient urbanisation

Approche 3

Dynamique
géochimique

Cycle de crue

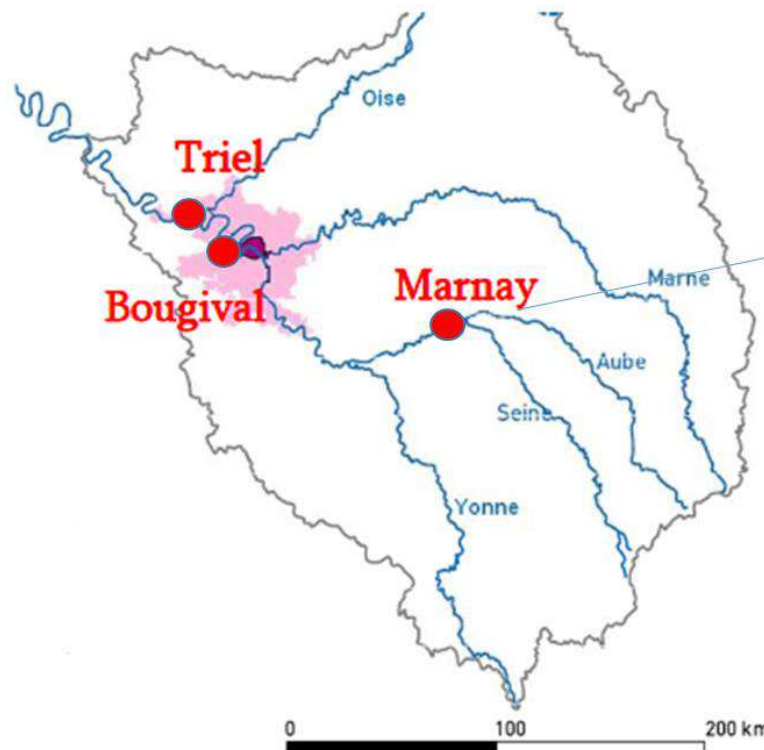
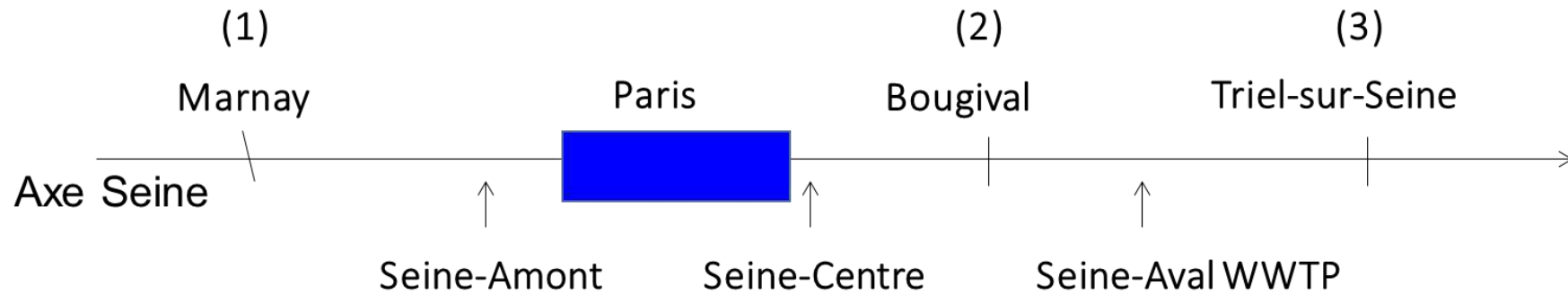
Approche 4

Bilan micropolluants



Imprégnation du bassin de la Seine

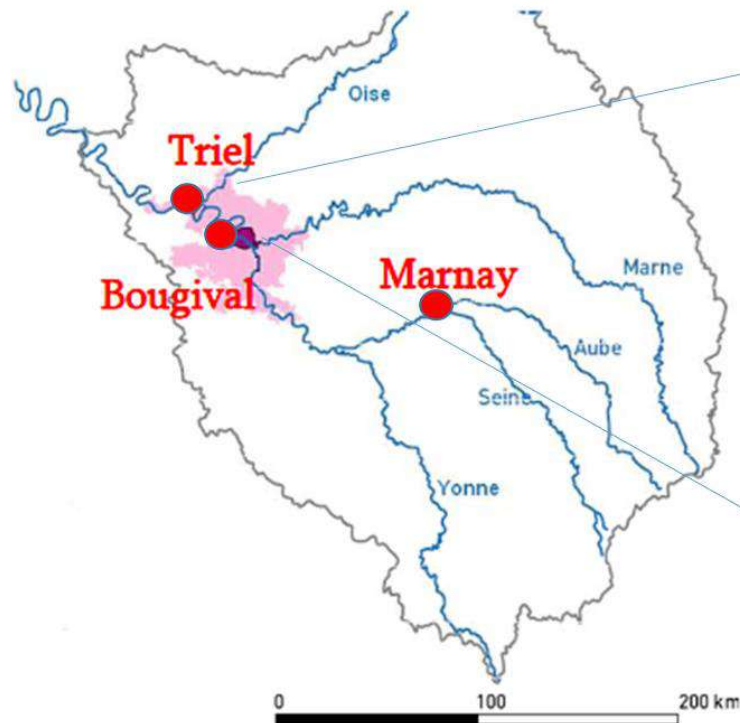
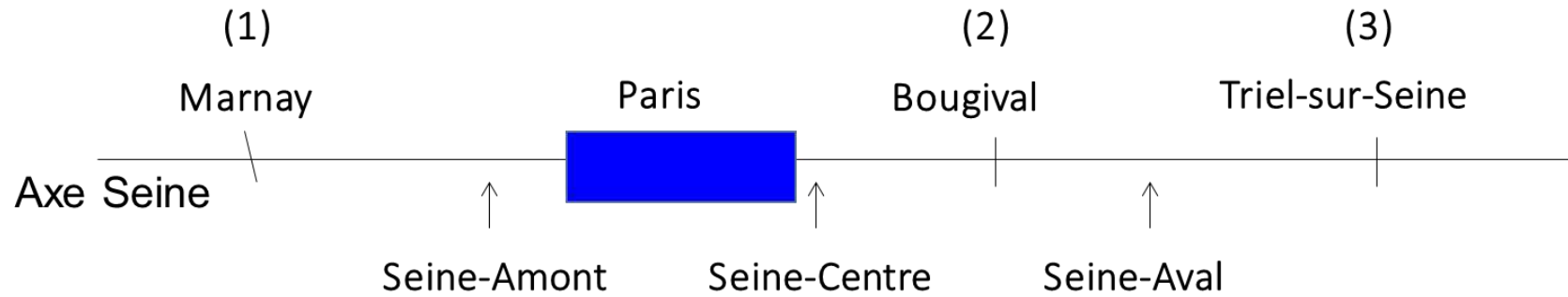
Approche 2
Suivi annuel



Reference site
remoted

Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 2
Suivi annuel

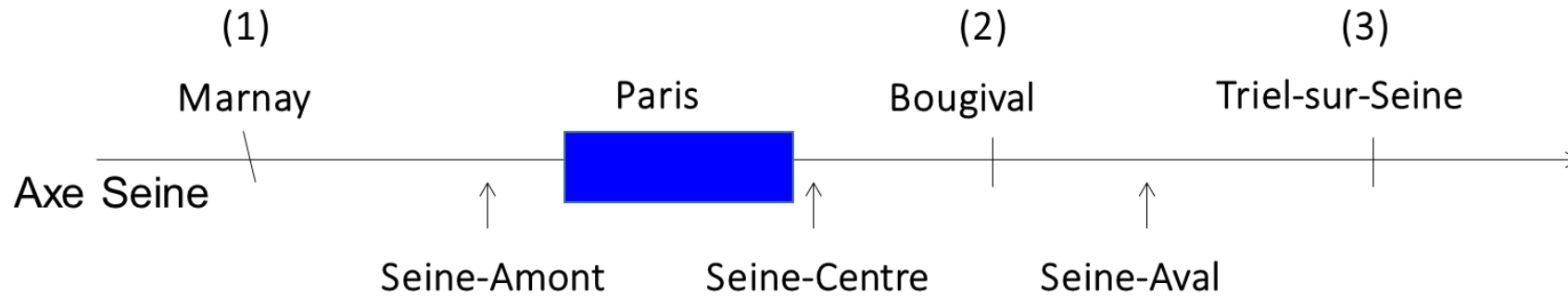


(1) Marnay (2) Bougival (3) Triel-sur-Seine



Imprégnation du bassin de la Seine

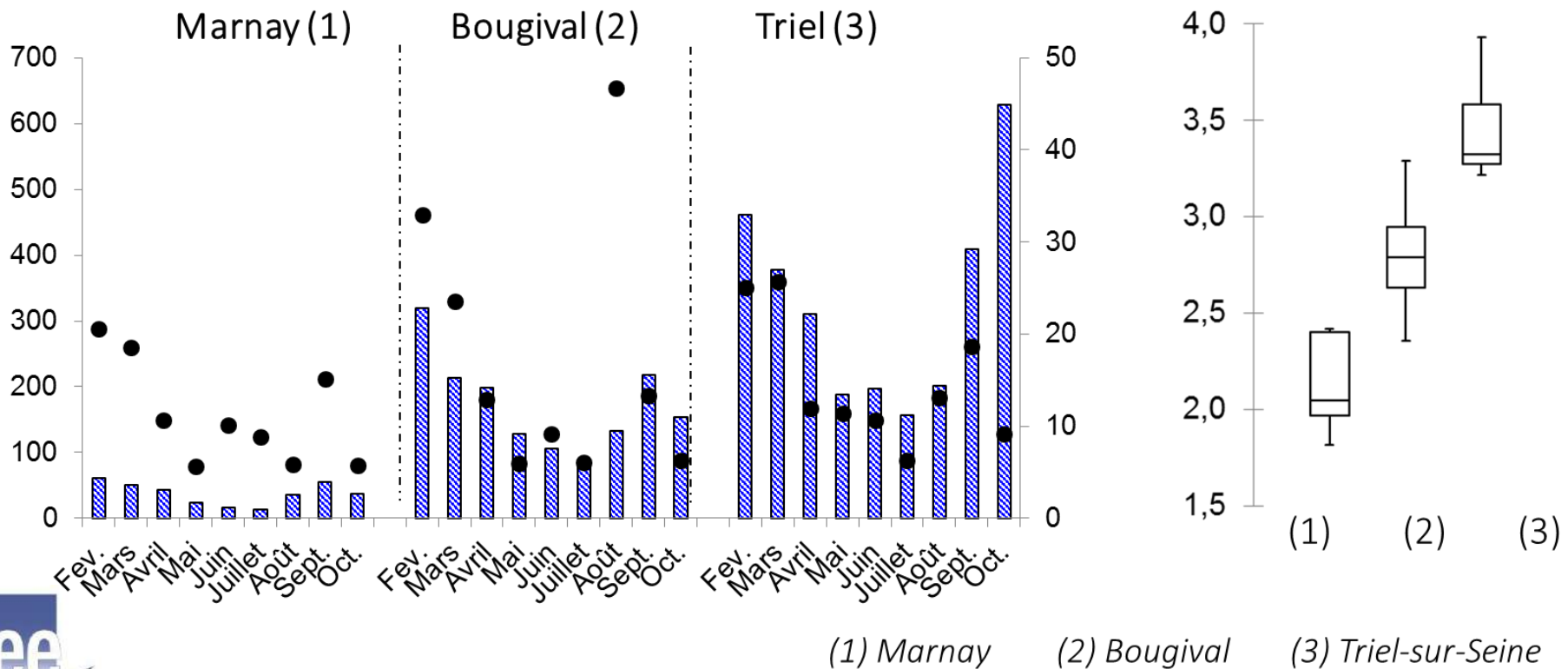
Approche 2
Suivi annuel



$Q \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)}$

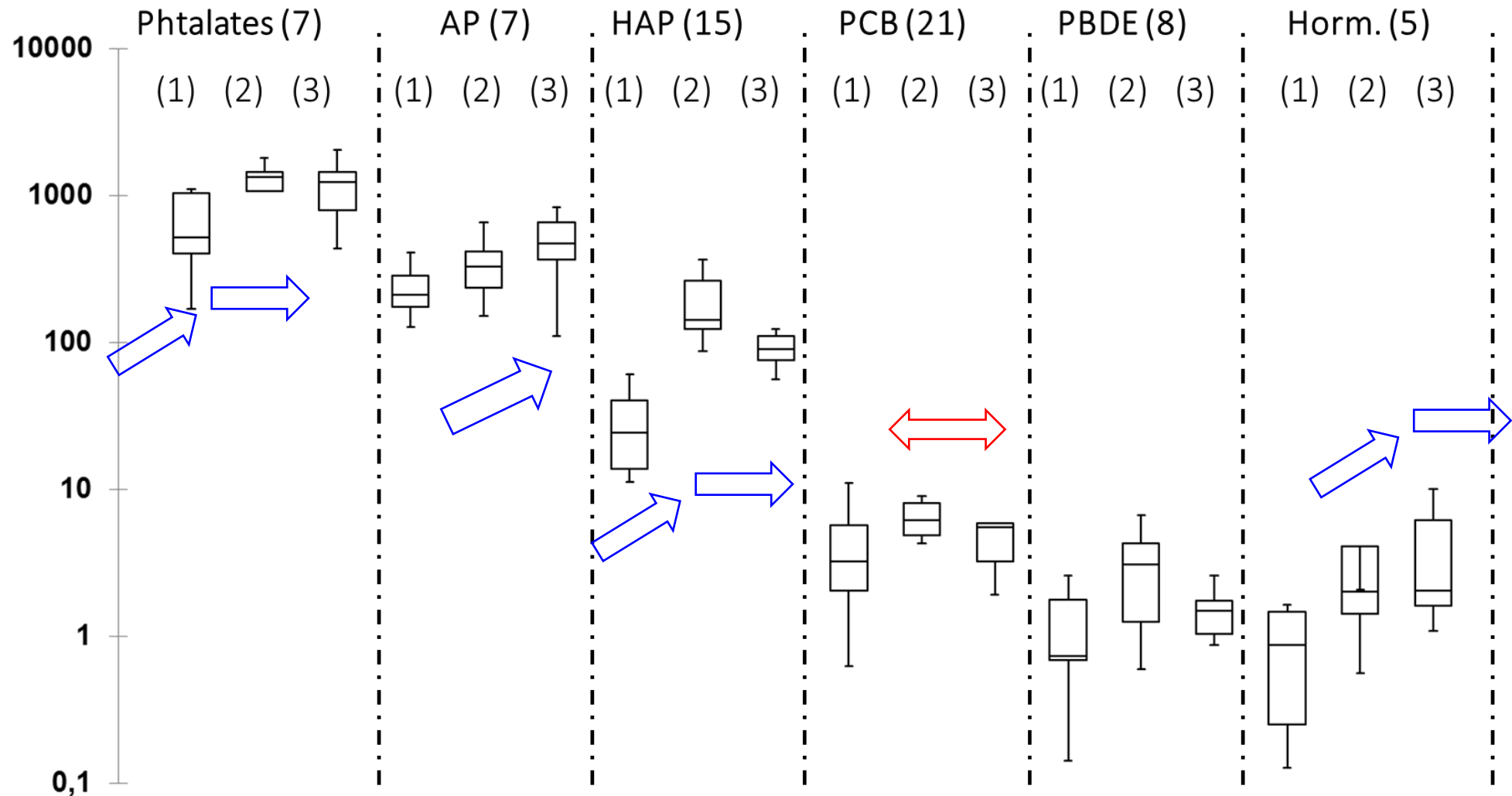
● MES (mg/L)

COD (mgC/L)



Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 2 Suivi annuel



- Des gradients plus ou moins marqués entre Marnay et sites aval

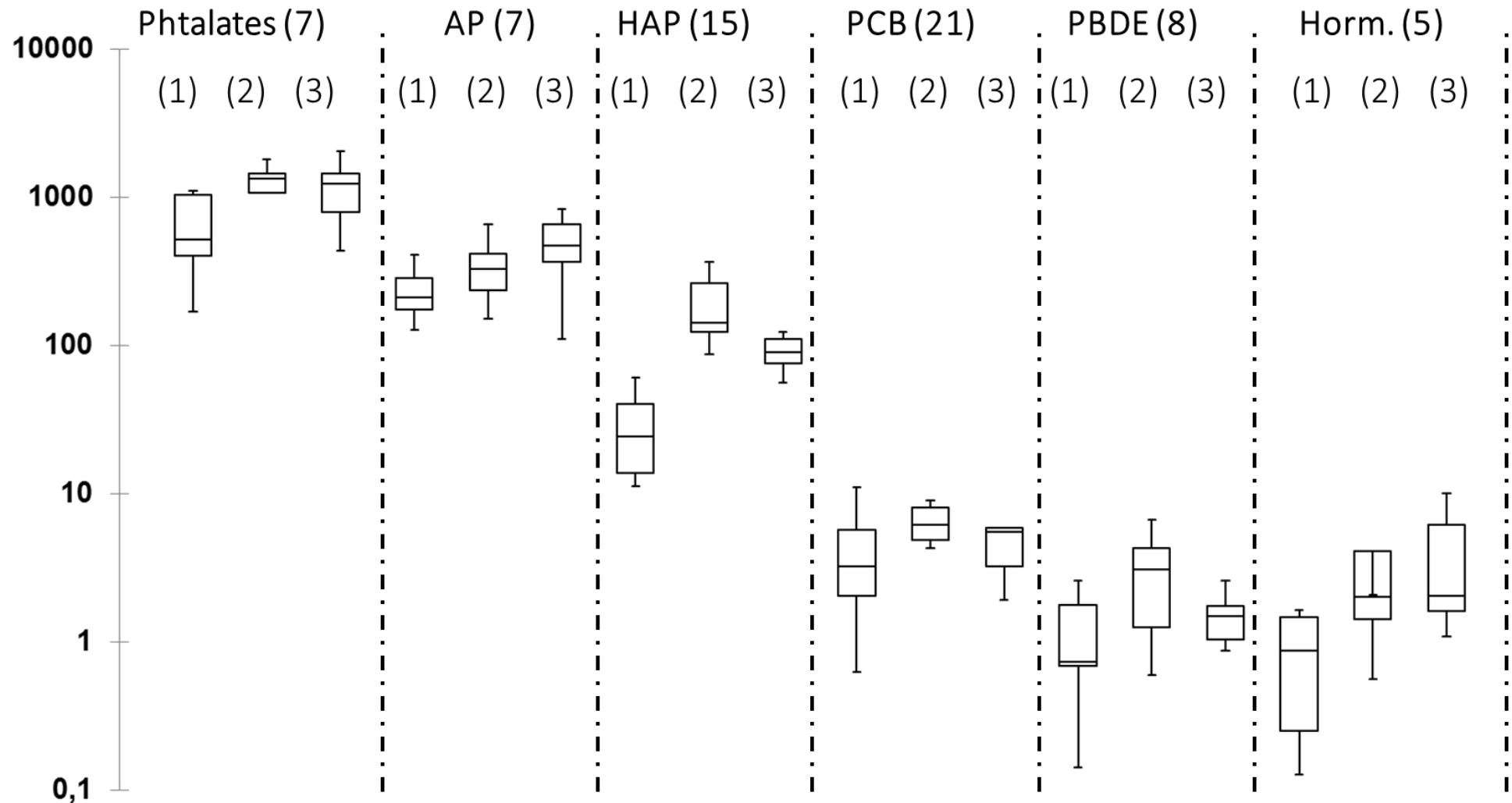
(1) Marnay

(2) Bougival

(3) Triel-sur-Seine

Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 2 Suivi annuel



- Des gradients plus ou moins marqués entre Marnay et sites aval

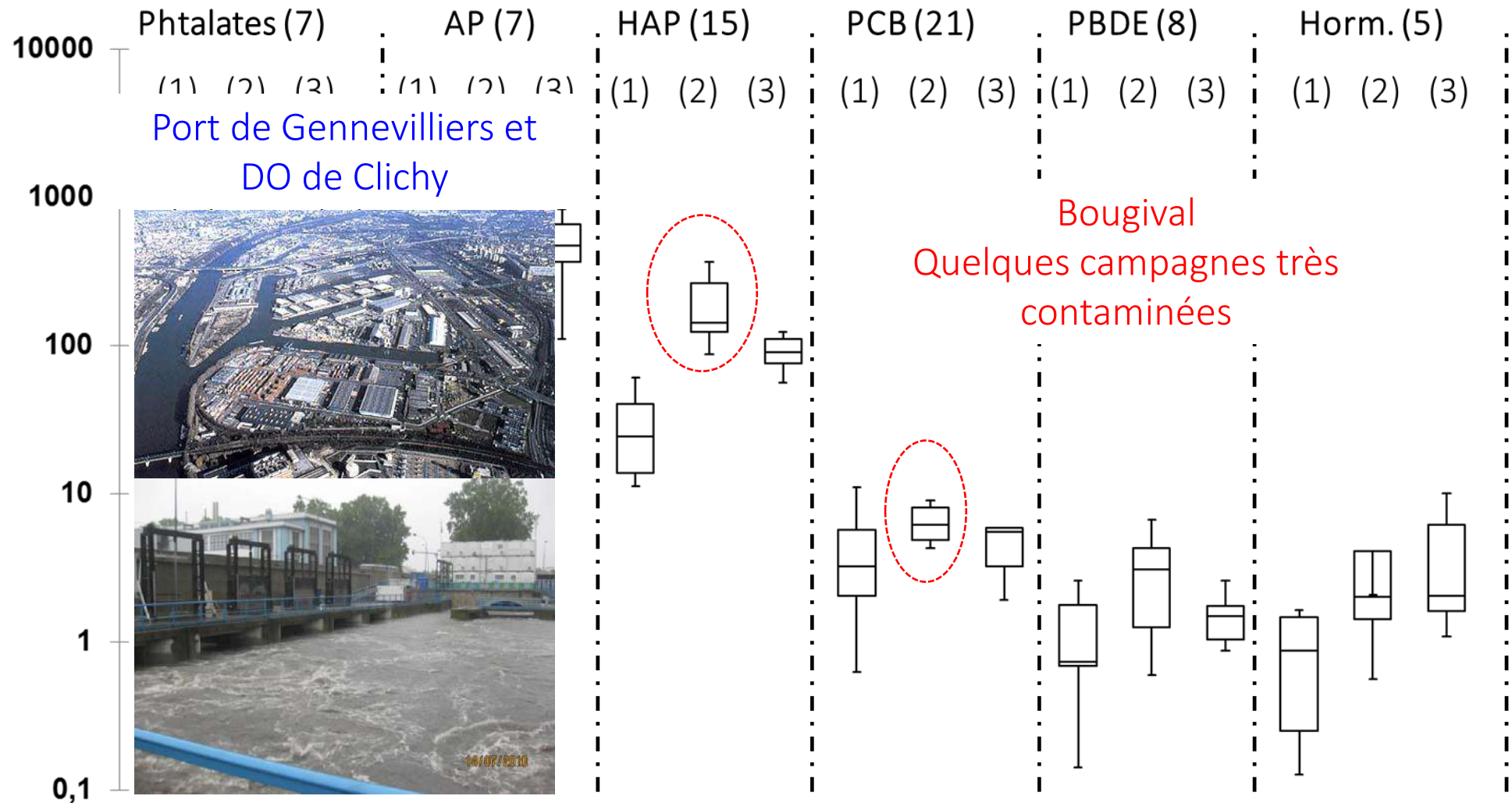
(1) Marnay

(2) Bougival

(3) Triel-sur-Seine

Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 2 Suivi annuel



- Des gradients plus ou moins marqués entre Marnay et sites aval

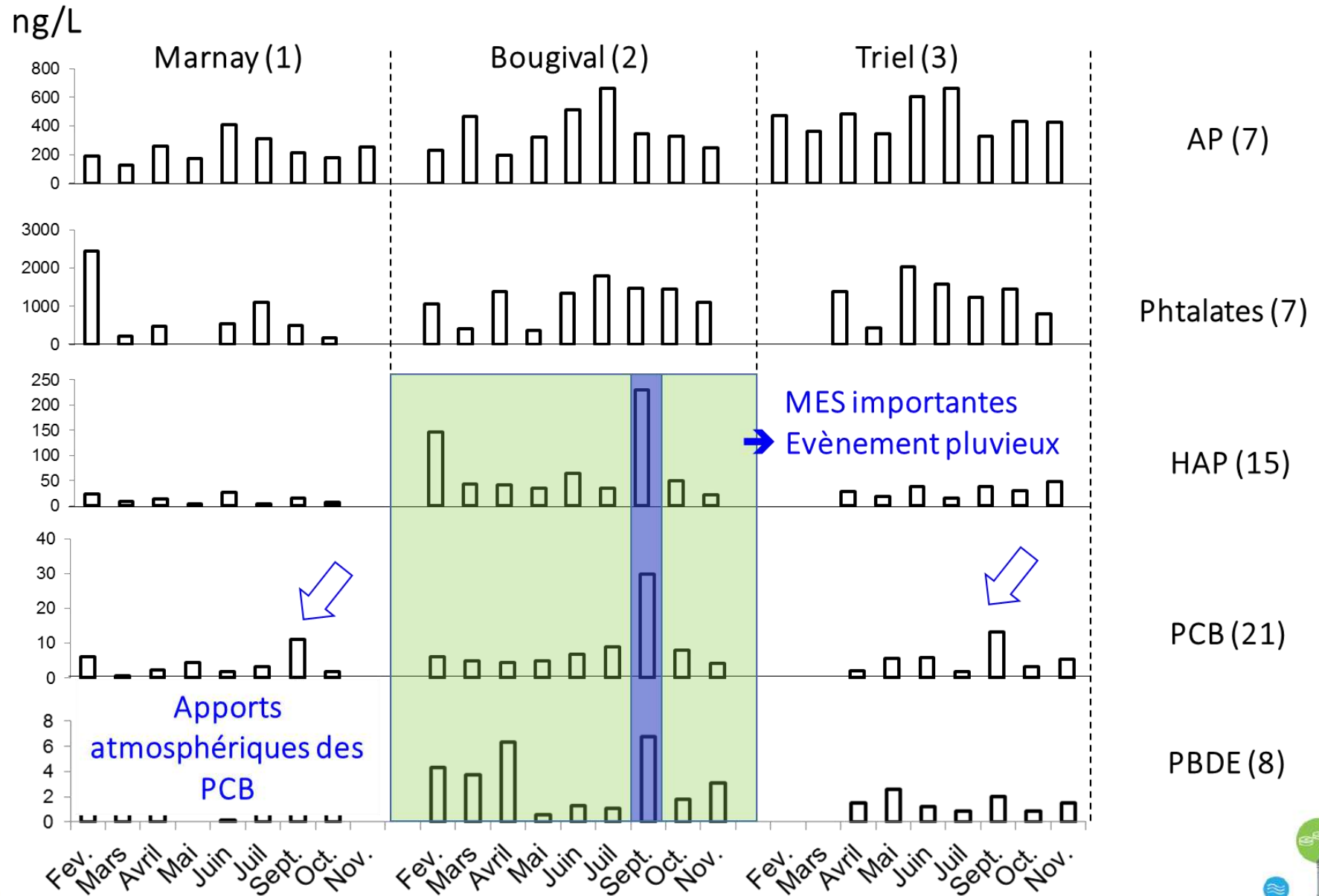
(1) Marnay

(2) Bougival

(3) Triel-sur-Seine

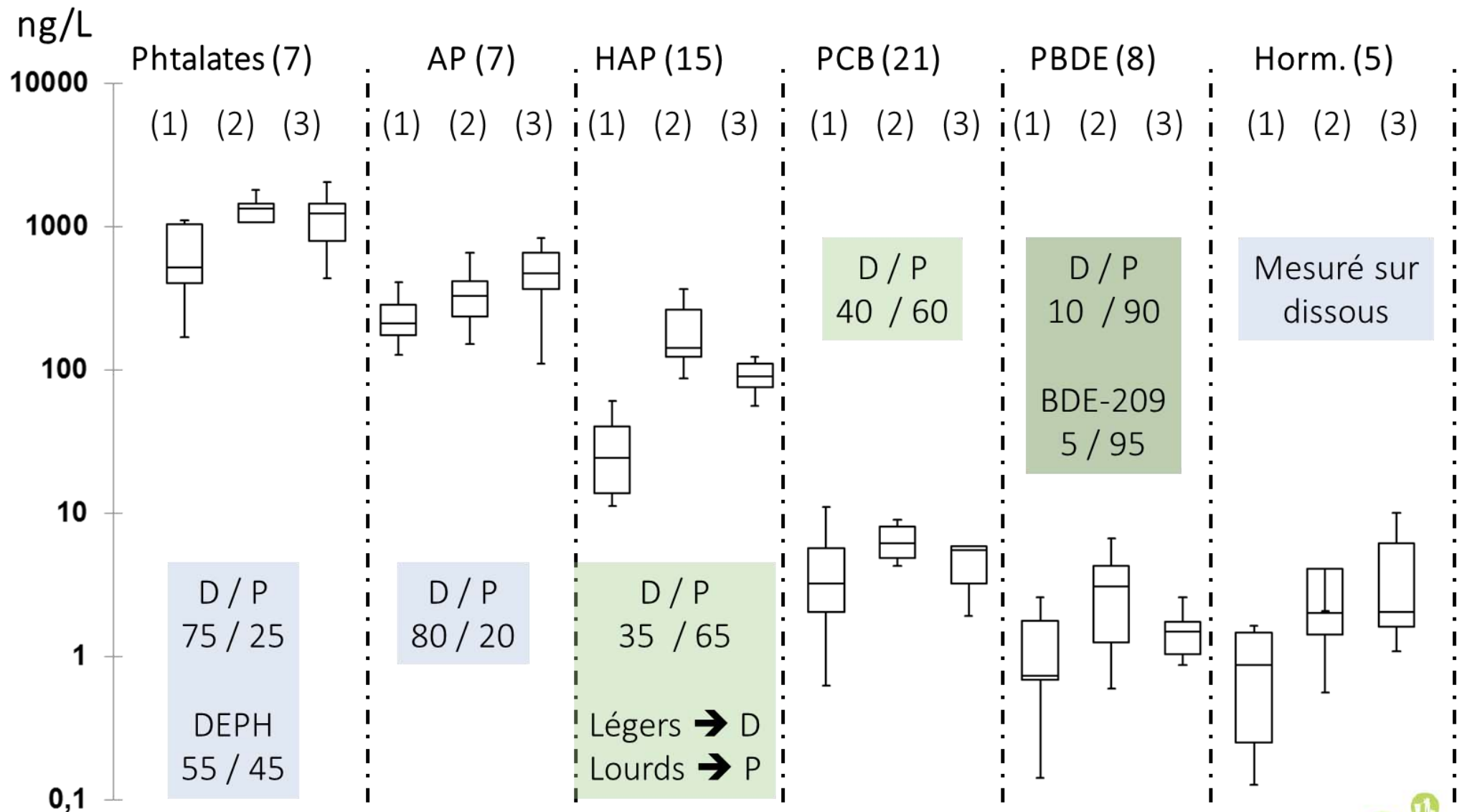
Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 2 Suivi annuel



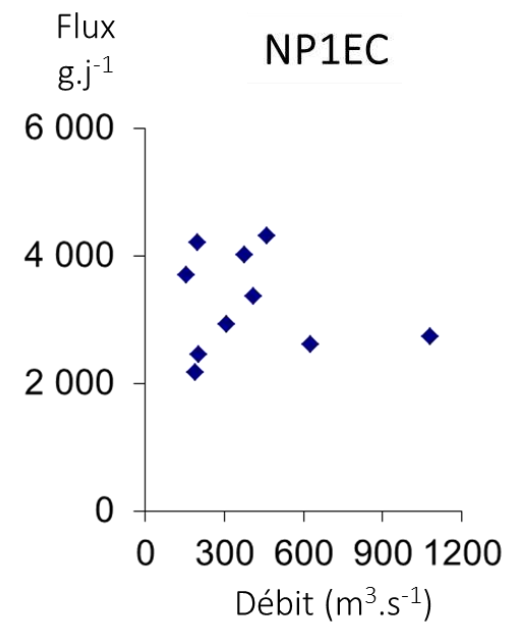
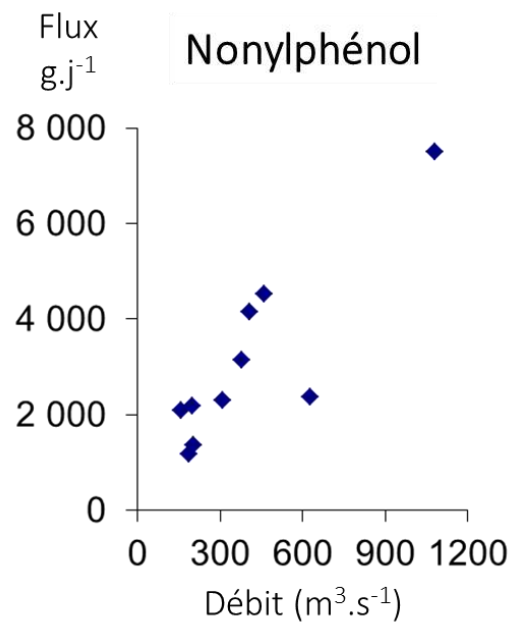
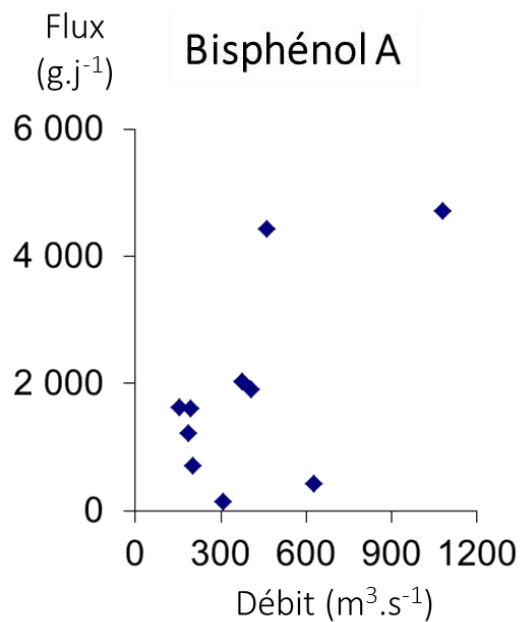
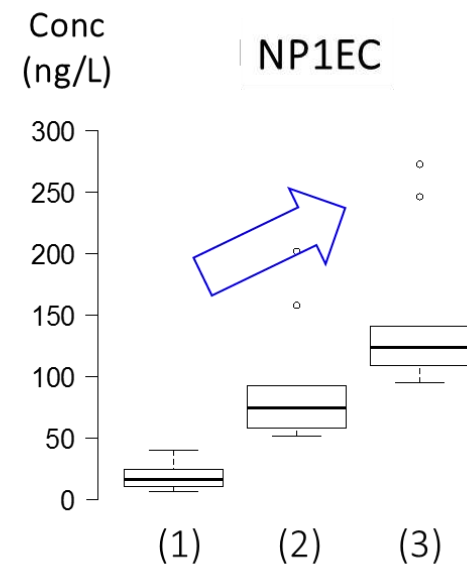
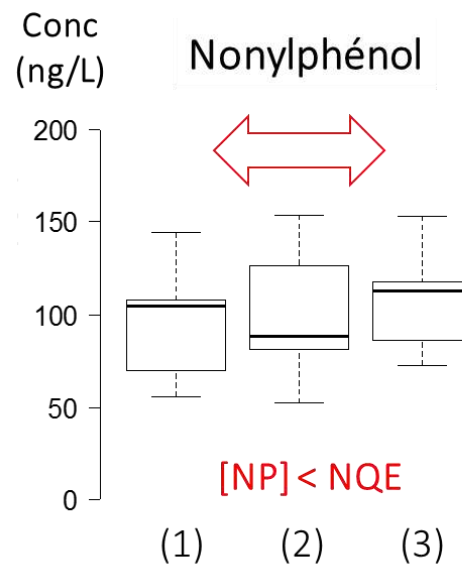
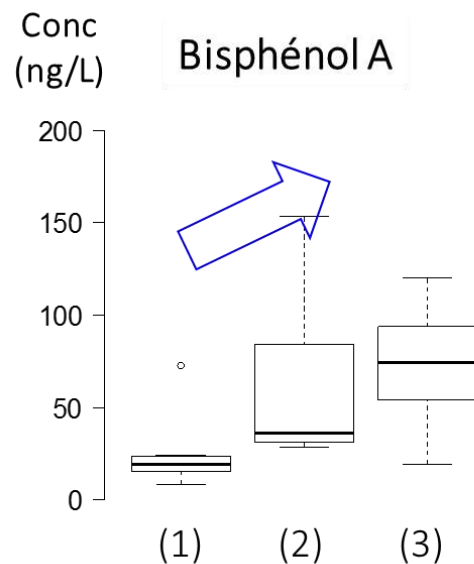
Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 2 Suivi annuel



Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 2 Suivi annuel



Imprégnation du bassin de la Seine

Quelles approches ?

Contamination de la Seine par les
micropolluants organiques
Imprégnation du milieu ?
Variabilité spatio-temporelle ?
Dynamique des polluants ?



Approche 1

Profils longitudinaux
de la Seine

Tronçons amont-aval

Approche 2

Suivi sur 3 sites
Marnay/Bougival/Triel

Gradient urbanisation

Approche 3

Dynamique
géochimique

Cycle de crue

Approche 4

Bilan micropolluants



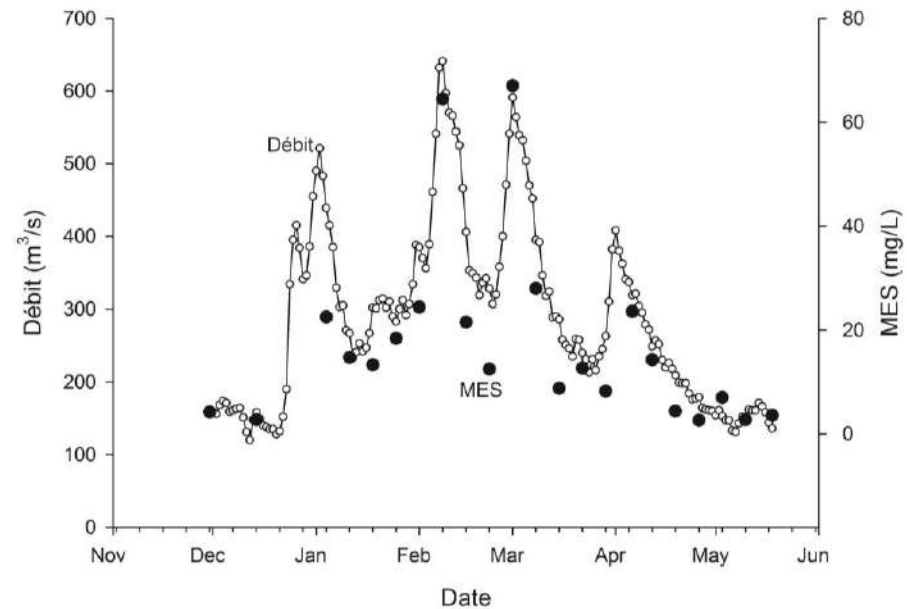
Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 3
Crues



Quai
Austerlitz
Rive gauche
Jussieu

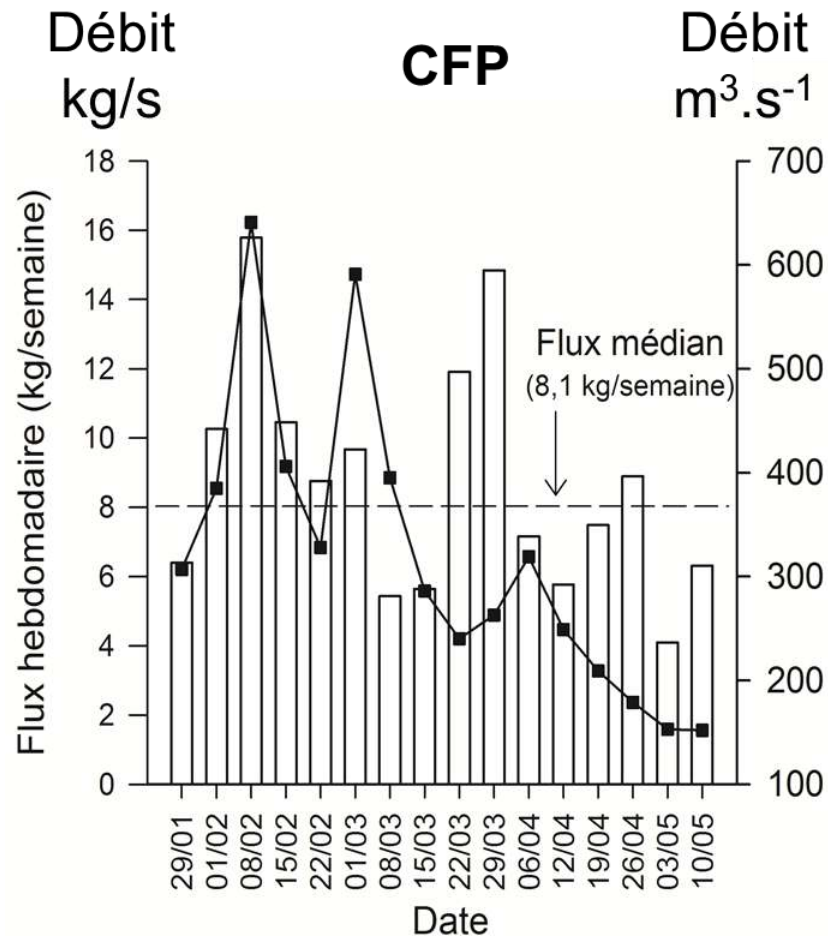
Suivi des PBDE et CPF
30/11/2009 au 18/05/2010



Imprégnation du bassin de la Seine

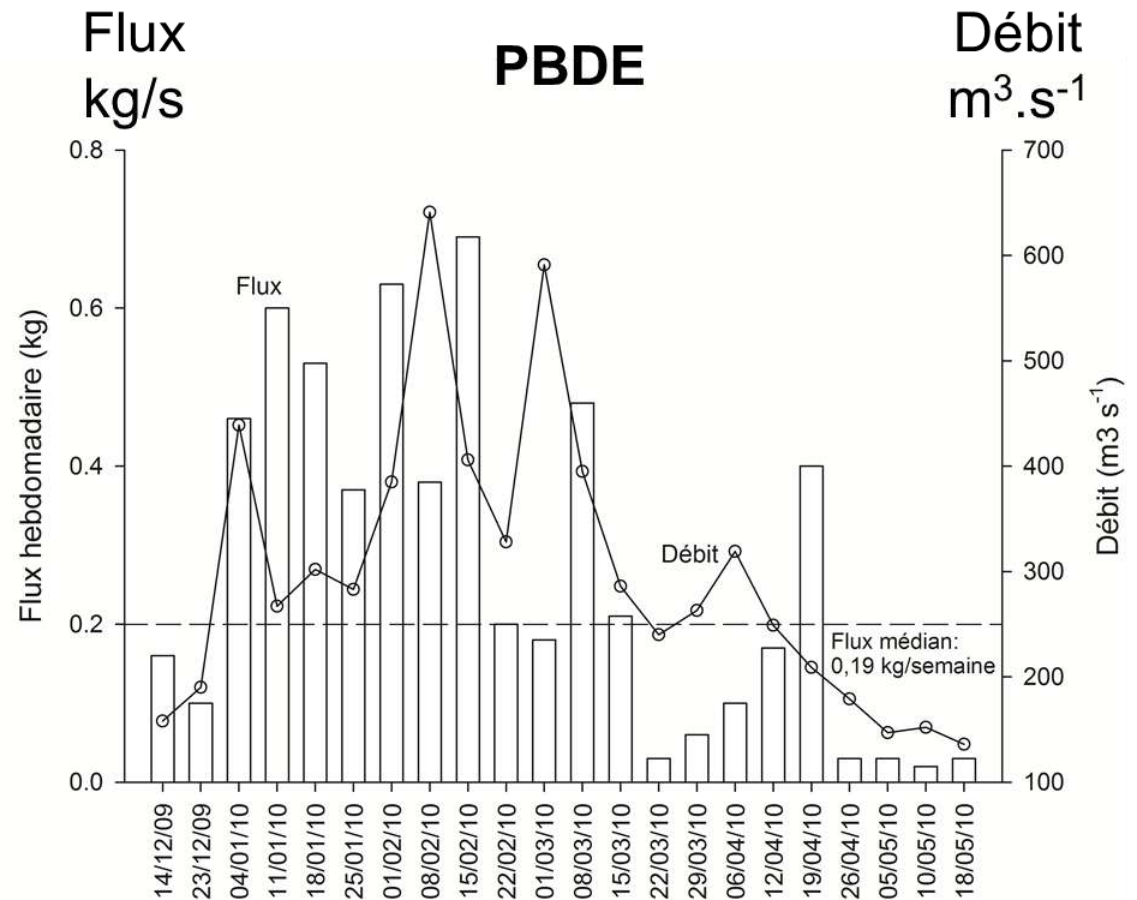
Approche 3 Crues

Flux des CFP et PBDE (kg / semaine)



140 kg sur période d'étude

→ 485 kg sur 1 an



6 kg sur période d'étude (40% en janvier)

→ 12 kg sur 1 an

Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 3 Archives sédimentaires

Prospection

Carte et visite sur site
Enquête auprès des riverains,
gestionnaires, mairies

« Historique » du site



Carottage :
carottier motorisé

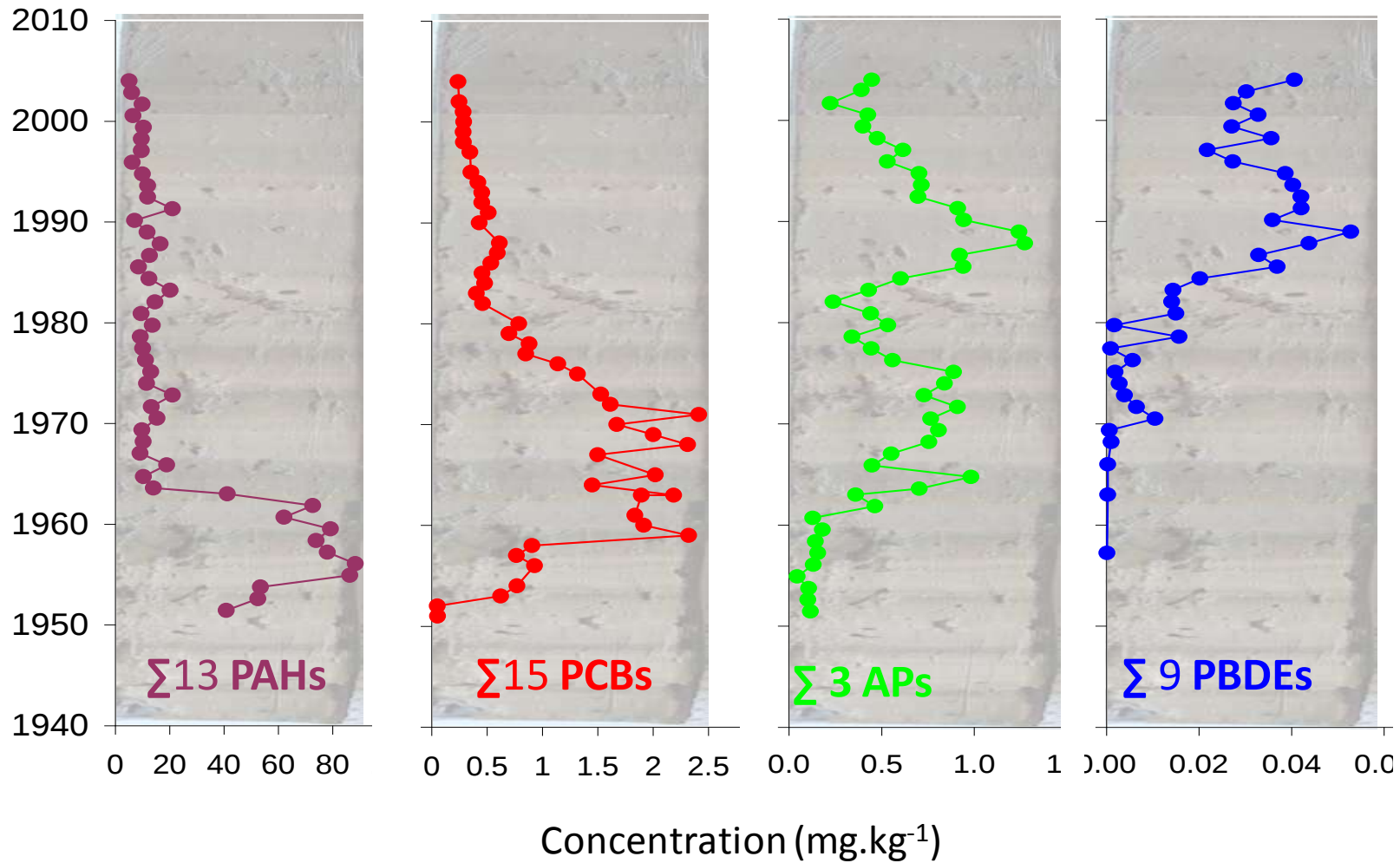


Carotte de 1m

Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 3 Archives sédimentaires

Vertical profiles of different POPs in a sediment core from the Seine River



Imprégnation du bassin de la Seine

Quelles approches ?

Contamination de la Seine par les
micropolluants organiques
Imprégnation du milieu ?
Variabilité spatio-temporelle ?
Dynamique des polluants ?



Approche 1

Profils longitudinaux
de la Seine

Tronçons amont-aval

Approche 2

Suivi sur 3 sites
Marnay/Bougival/Triel

Gradient urbanisation

Approche 3

Dynamique
géochimique

Cycle de crue

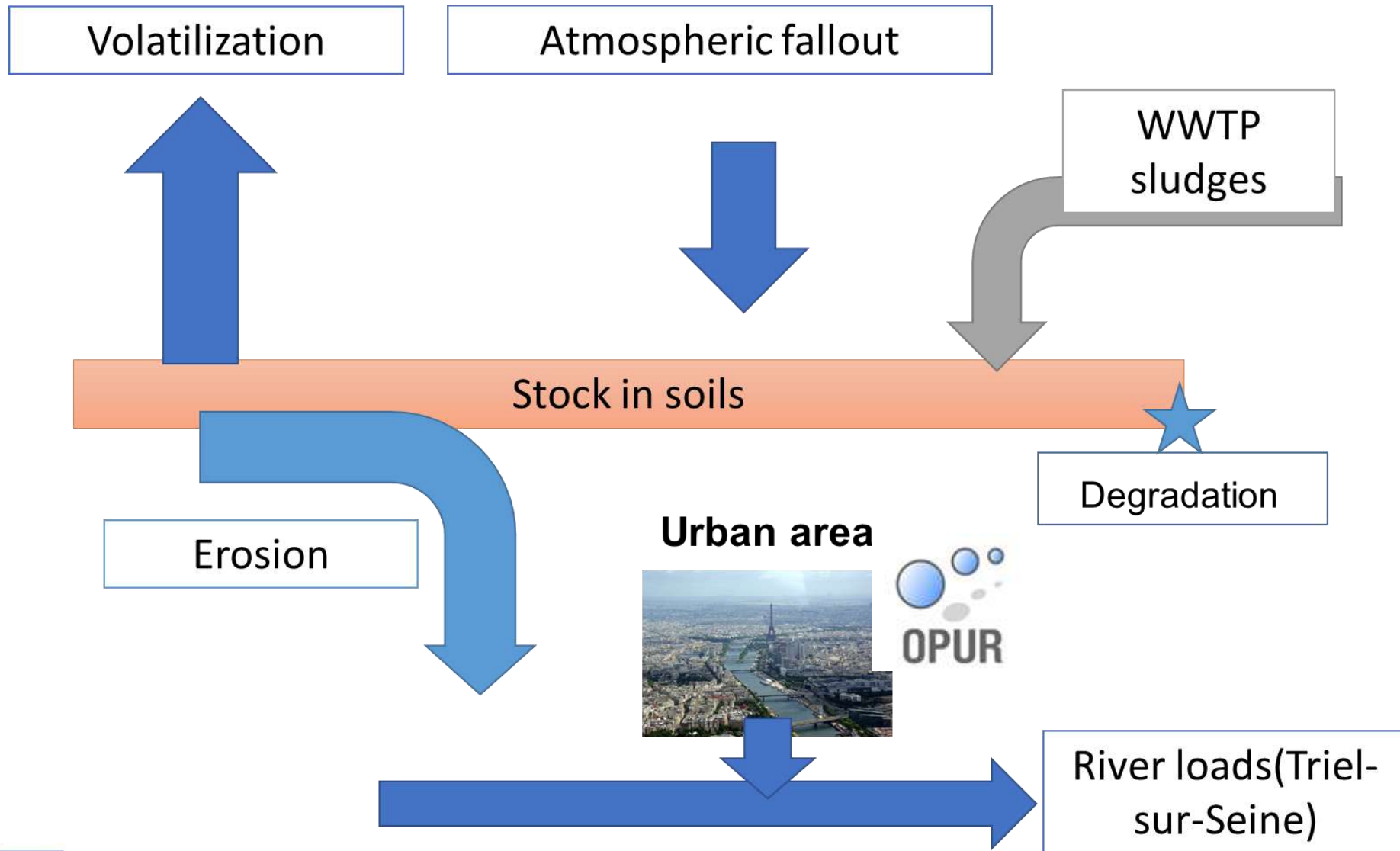
Approche 4

Bilan micropolluants



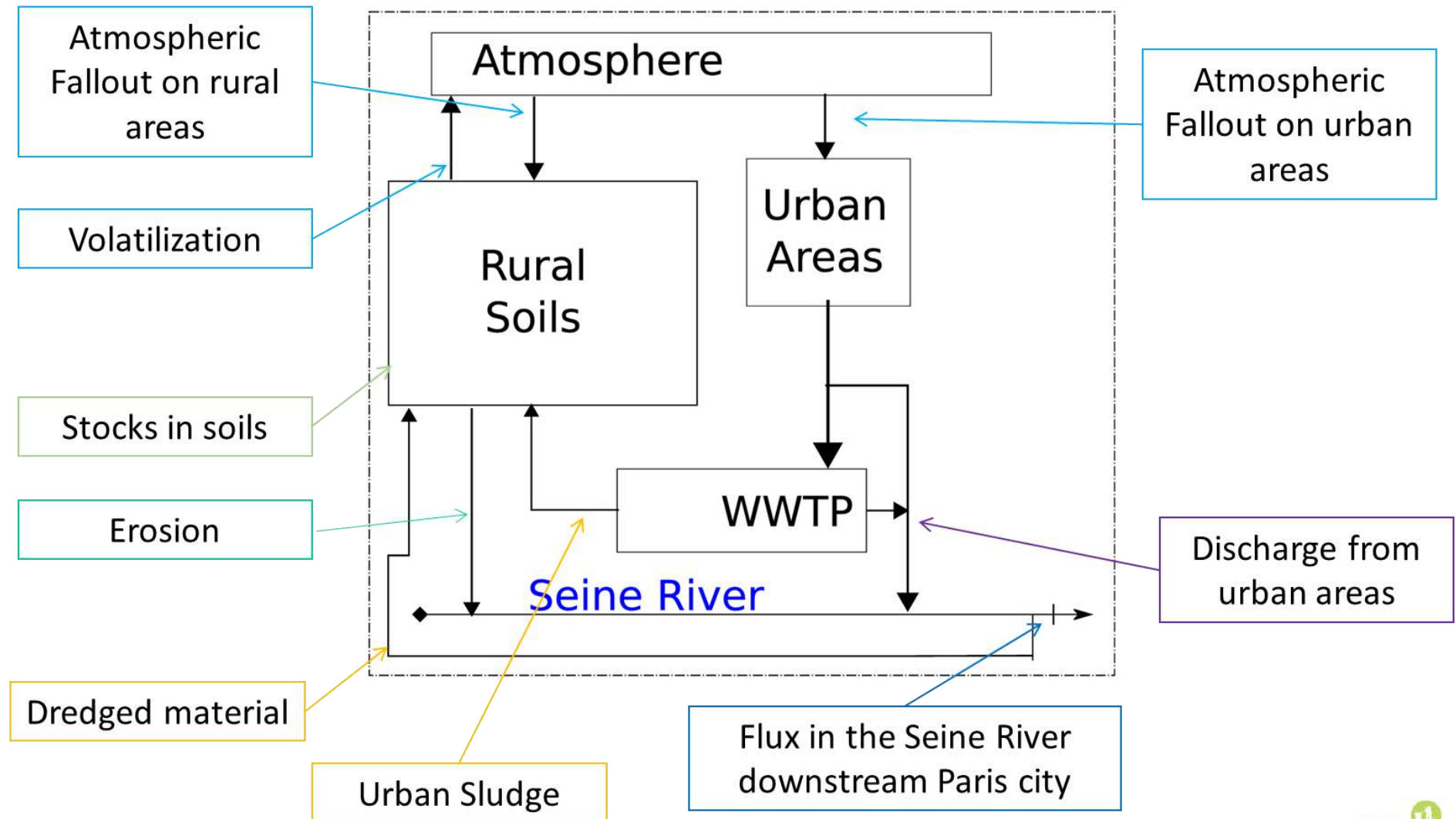
Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 4 Flux de polluants



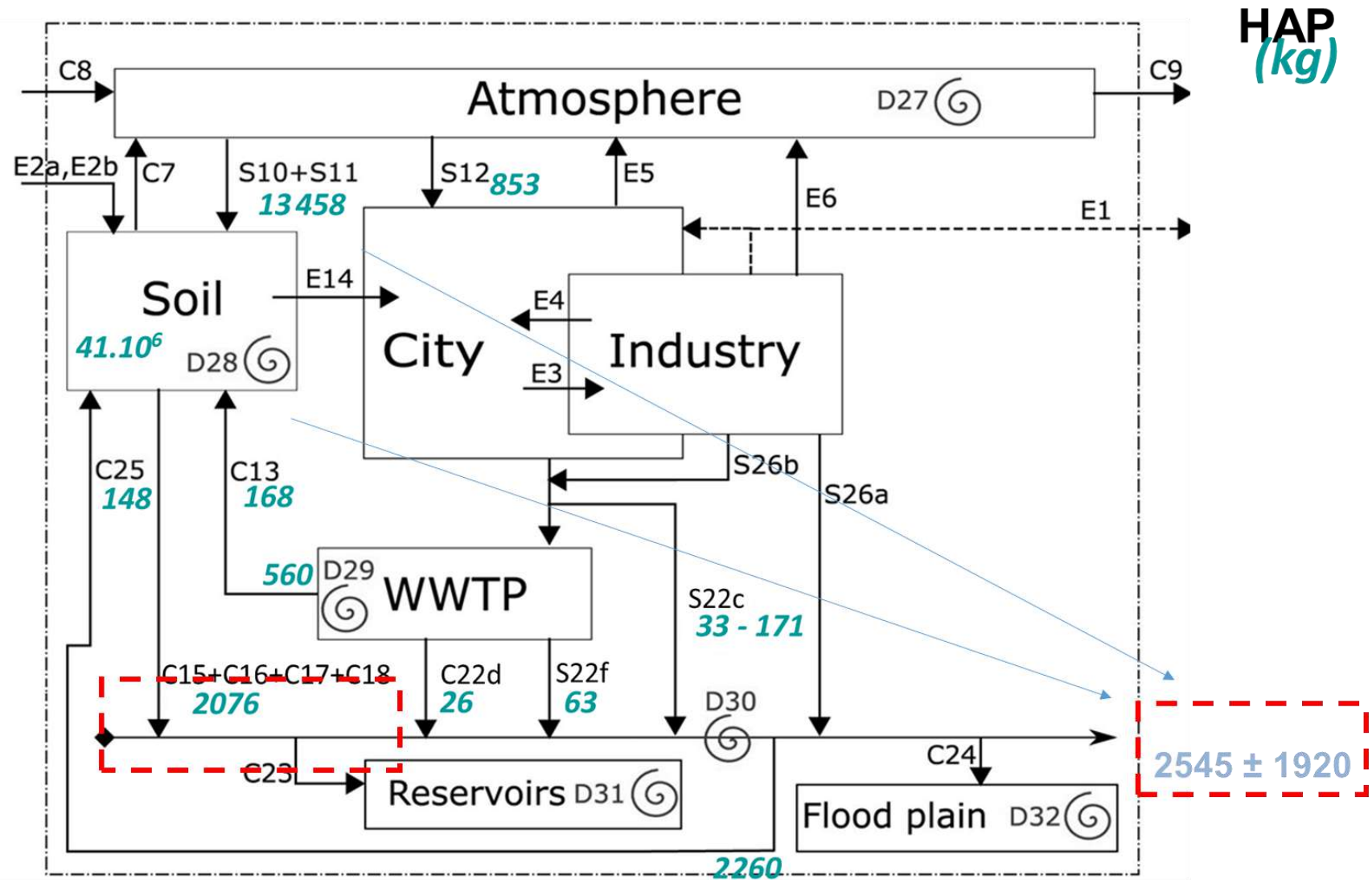
Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 4 Flux de polluants



Imprégnation du bassin de la Seine

Approche 4 Flux de polluants



Imprégnation du bassin de la Seine

Take home message

Contamination de la Seine par
les micropolluants organiques

Imprégnation du milieu ?
Variabilité spatio-temporelle ?
Dynamique des polluants ?

Variabilité des
concentrations liées
aux conditions
hydriques

Polluants
hydrophobes reliés
aux flux particulaires

Selon famille de polluants

Niveaux de
concentrations du ng à
plusieurs centaines de ng
par litre

Mise en évidence plus ou
moins marquée de
l'impact de
l'agglomération
parisienne

Mais pour certains
polluants des zones
contaminées dès amont
(HAP / PCB / PBDE / AP)

PBDE / AP / BPA / Phtalates → Apports diffus
NPEC / Perfluorés → Apports ponctuels



Journée Micropolluants

Quelques messages
et interrogations



**MICROPOLLUANTS PRÉSENTS
DANS LES MILIEUX AQUATIQUES
ET LEUR IMPACT
SUR LA SANTÉ HUMAINE**
EXEMPLE DE L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE

23 et 24 novembre 2016
à la Cité de l'Eau et de l'Assainissement
du SIAAP à Colombes (92)



seinemupoll2016.sciencesconf.org
Suivez nous sur Twitter
#micropollseine

**INSCRIPTION EN LIGNE OBLIGATOIRE
AVANT LE 21 NOVEMBRE À L'ADRESSE :
SEINEMUPOLL2016.SCIENCESCONF.ORG/
REGISTRATION/INDEX**
Contact : florine.esteve@arceau-idf.fr
Inscriptions : Tarif sous conditions

PLACES LIMITÉES

- **Attention aux polluants que l'on regarde....**

Des enjeux différents selon ce que l'on souhaite étudier

- **Quelles attentes par rapport au bon état chimique ?**

Est-ce que cette contrainte réglementaire est la contrainte qui paraît pertinente par rapport à la question du bon état des écosystèmes, pour ne pas employer l'expression de bon état écologique lié à la DCE ?



Journée Micropolluants

Quelques messages
et interrogations

Vers une société de plus en plus high-tech.....

Ces évolutions sont-elles compatibles avec une réduction pérenne des micropolluants dans les milieux naturels ?

La notion de transition écologique est-elle pertinente par rapport à ces micropolluants ?

Comment peut-on la mettre en œuvre et est-ce que cela pourra avoir des effets efficaces sur le milieu naturel ?

Quelles conséquences peut-on envisager sur la question des micropolluants en liaison avec le changement climatique ?



The poster features the ARCEAU logo at the top left and a circular logo with a globe at the top right. The main title is 'MICROPOLLUANTS PRÉSENTS DANS LES MILIEUX AQUATIQUES ET LEUR IMPACT SUR LA SANTÉ HUMAINE' in bold black letters. Below it, in smaller letters, is 'EXEMPLE DE L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE'. The dates '23 et 24 novembre 2016' are prominently displayed, followed by the location 'à la Cité de l'Eau et de l'Assainissement du SIAAP à Colombes (92)'. A row of logos for 'eau de Paris', 'SIAAP', and the French flag is shown. At the bottom left, there is a blue box with the text 'seinemupoll2016.sciencesconf.org' and a Twitter icon with the text 'Suivez nous sur Twitter #micropollseine'. At the bottom right, there is a yellow box with the text 'INSCRIPTION EN LIGNE OBLIGATOIRE AVANT LE 21 NOVEMBRE À L'ADRESSE : SEINEMUPOLL2016.SCIENCESCONF.ORG/REGISTRATION/INDEX' and contact information: 'Contact : florine.esteve@arceau-idf.fr' and 'Inscriptions : Tarif sous conditions'. A small orange circle with the text 'PLACES LIMITÉES' is also present.



ASTEE 96th Annual Conference – June 6 to 9, 2017

Liège, Belgique

Table ronde

Animée par
Jean-Marie WAUTHIER
Académie de l'eau

Micropolluants & bio-surveillance :
Quelle avenir pour la gestion au niveau de l'Europe?

François DARCHAMBEAU

Président du groupe de travail
Monitoring (CIM), Commission
Internationale de la Meuse

Arnould LEFEBURE

Secrétaire Général (CIE),
Commission internationale
de l'Escaut

Pascal DUCHENE

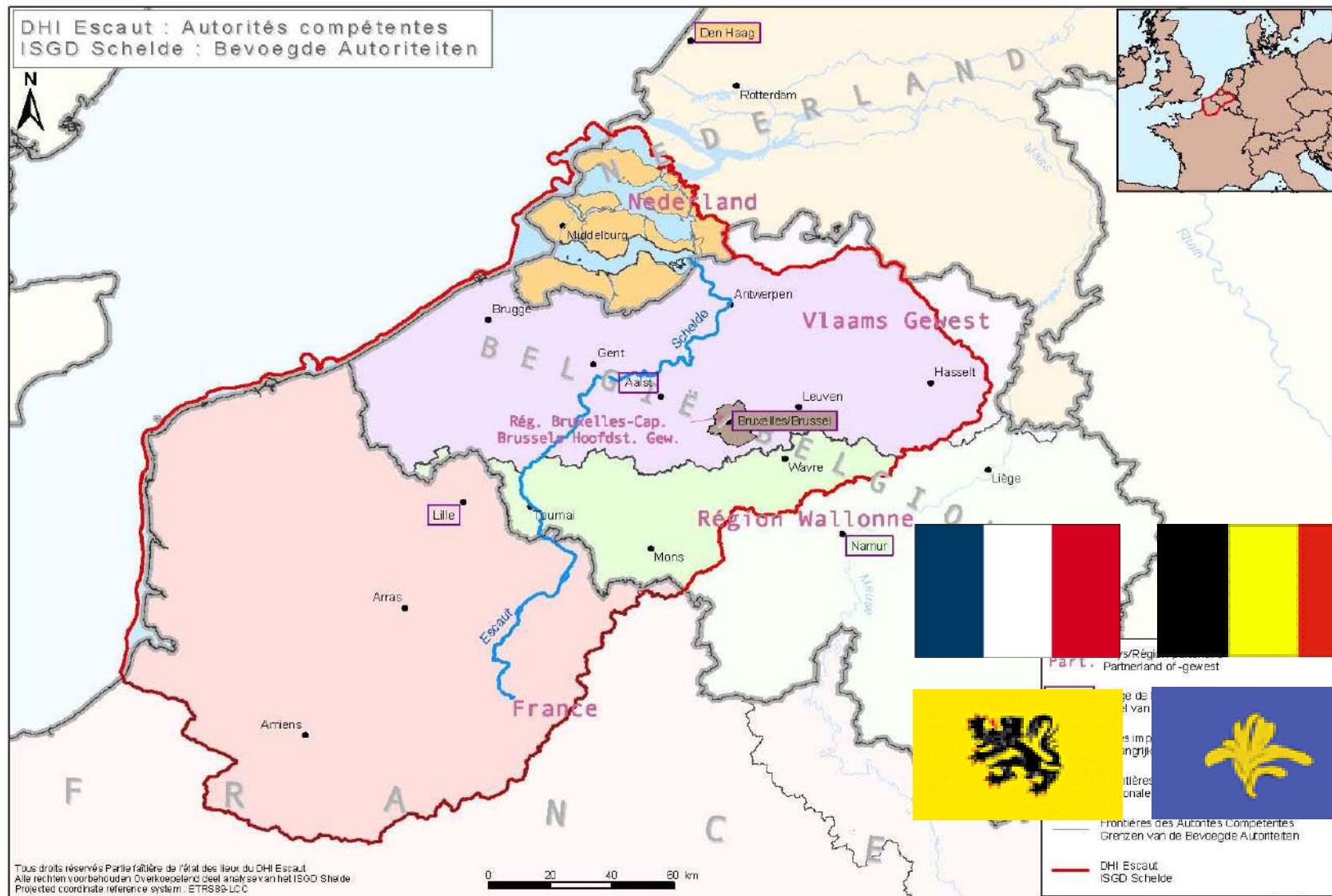
Directeur de la planification,
Agence de l'eau Rhin-Meuse

Jean-Louis OLIVER

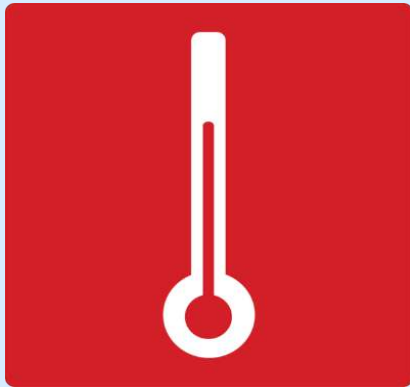
Secrétaire général,
Académie de l'eau

Le district international de l'Escaut

Accord de Gand 2002

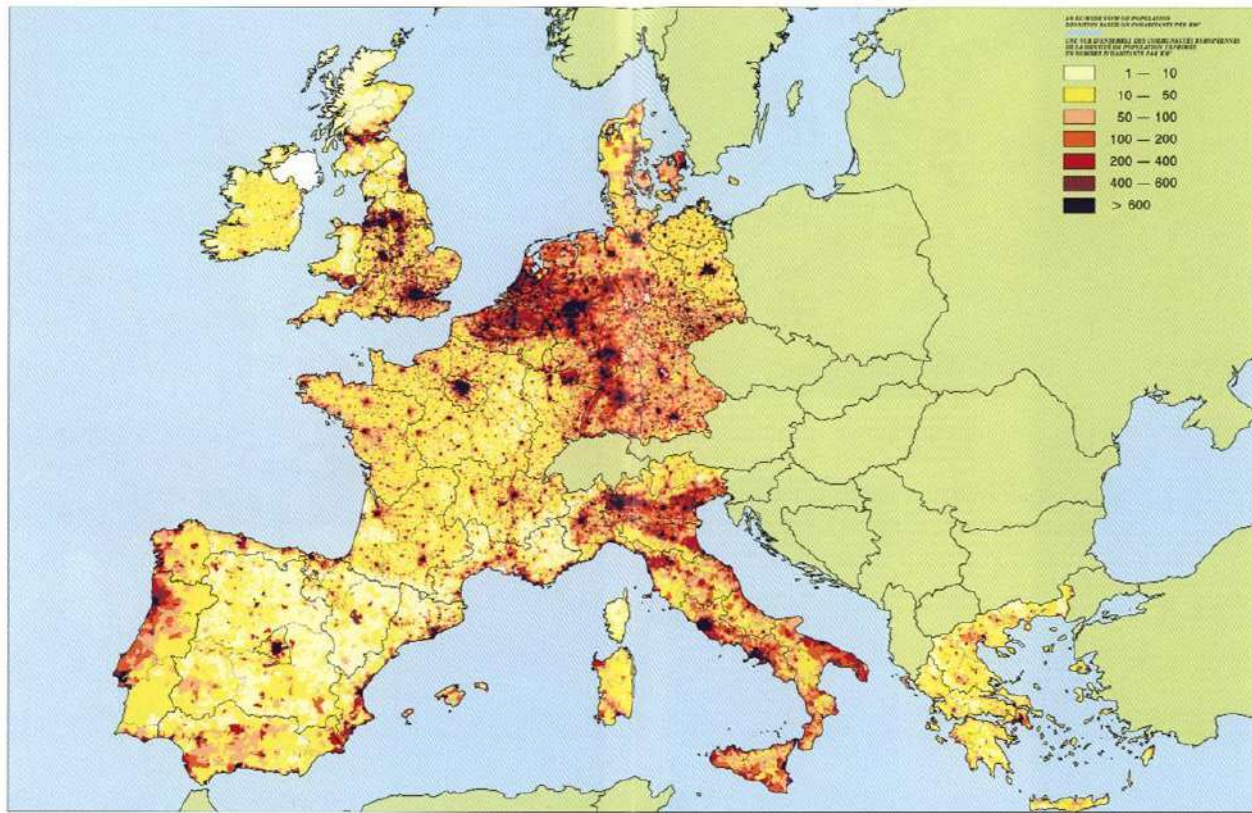


Un outil commun : le réseau homogène de mesures de l'Escout (RHME)



- Un réseau de surveillance global et évolutif
- base: DCE
- Un choix 'réduit' de Paramètres physico-chimiques (98) et biologiques (4)
- 37 Stations de mesures selon le DCE
- Un état annuel de la qualité partagé
- des rapports trisannuels 2011-2013, 2014-2016

Perturbateurs endocriniens



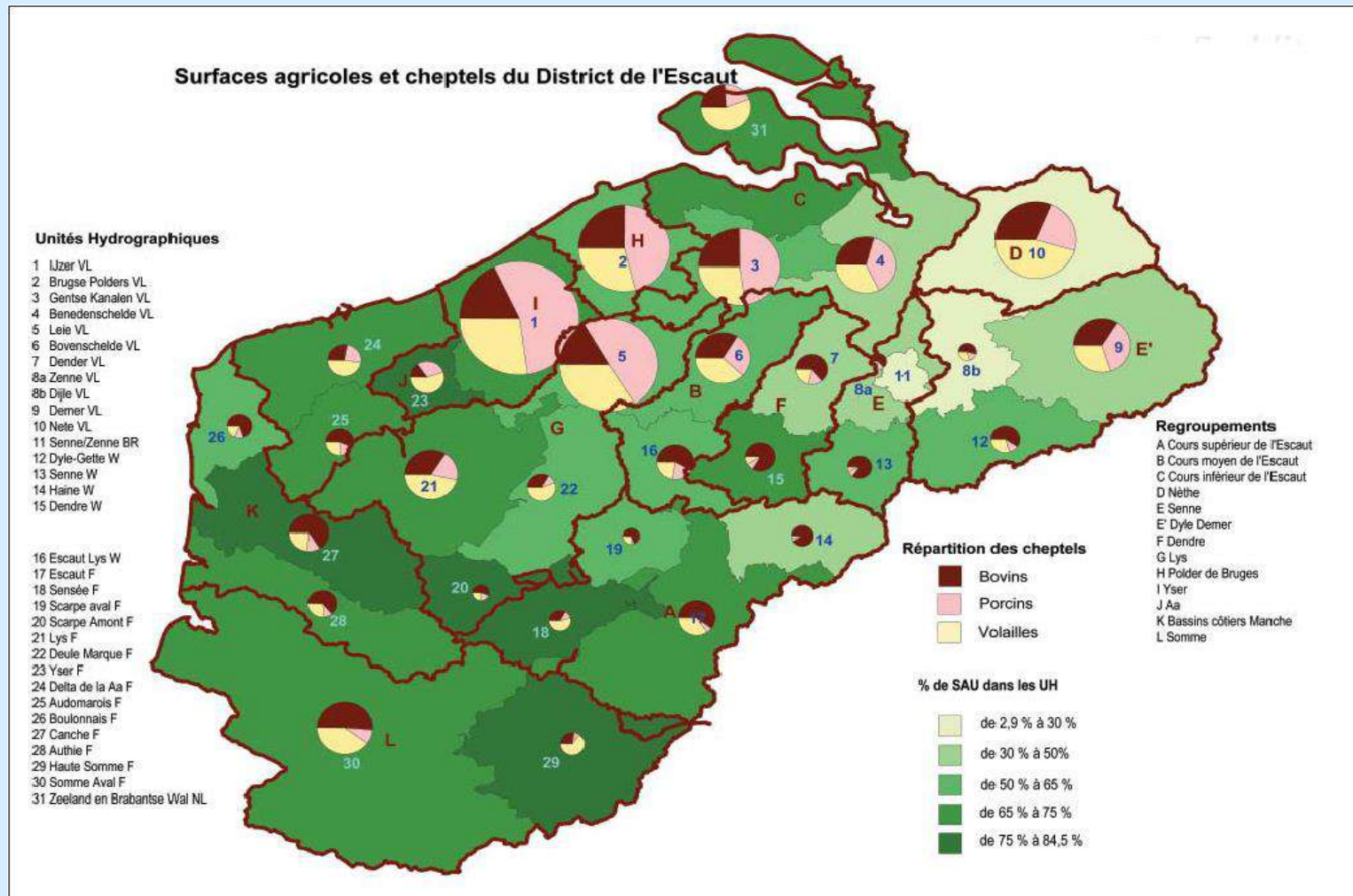
➤ Population > 13
Millions hab =
densité >
 $355h/km^2$

➤ Debit moyen
 $50m^3/s$

=> Forte pression
humaine

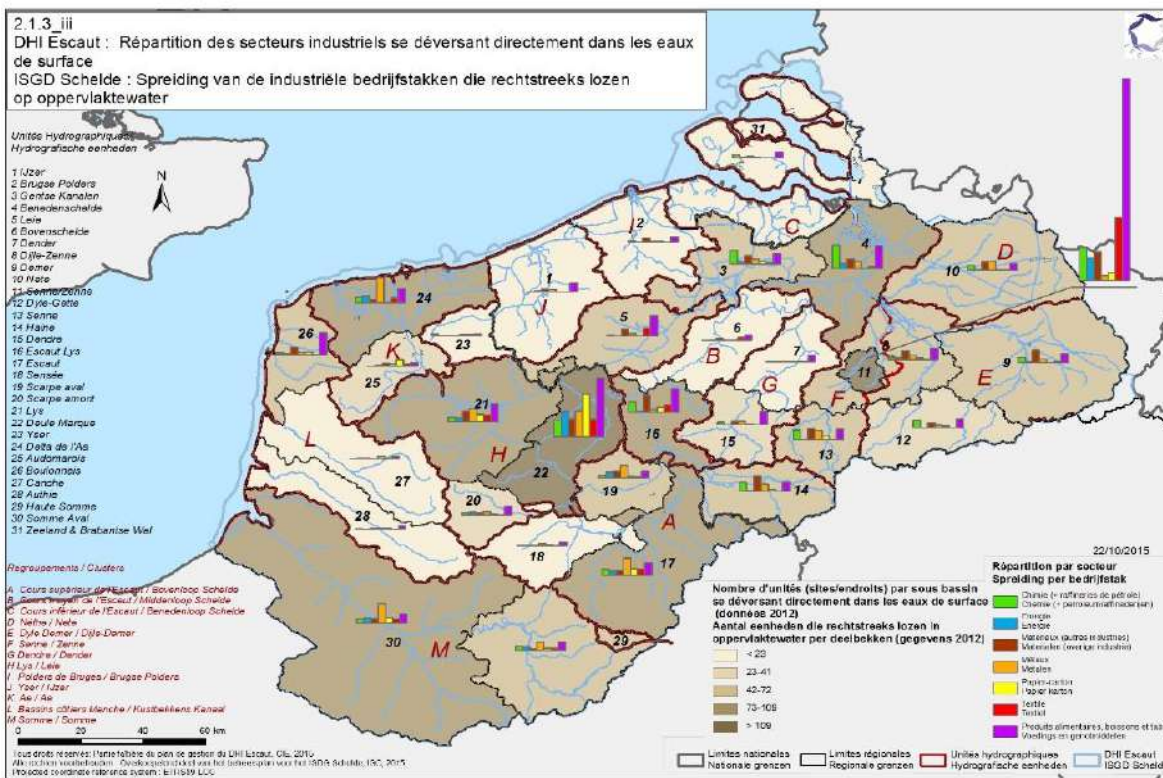
pesticides

➤ Une agriculture intensive => pesticides

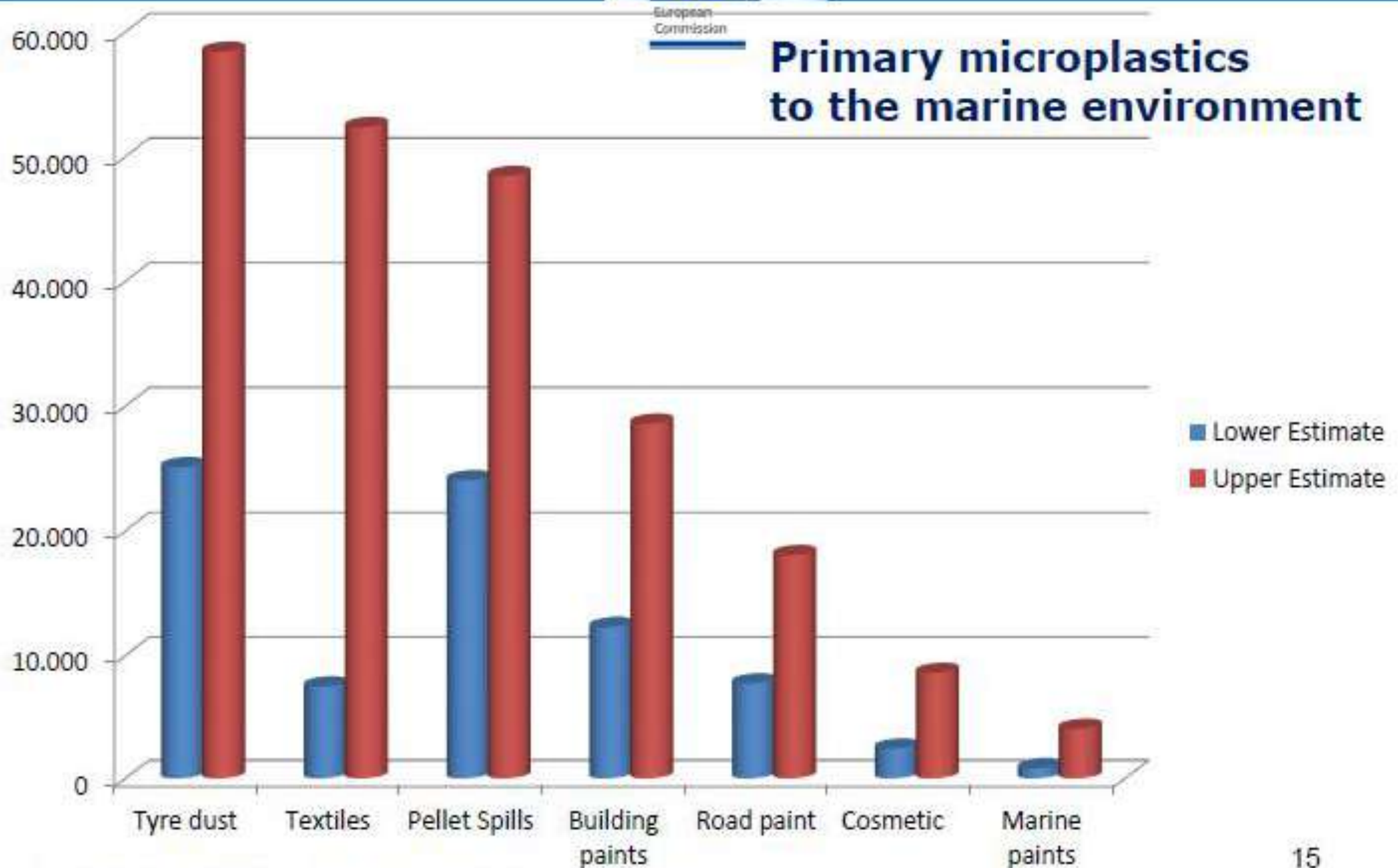


Micropolluants historiques

- Guerre 39-45 => perchlorates



le cas de microplastiques : lien avec la DCSMM



Source: Sherrington et al (2016) Eunomia report for European Commission DG ENV