



RÉTROSPECTIVE

**INTER
DISCIPLINAIRE**

2024

Valorisation de l'information historique sur les crues pour l'estimation des crues extrêmes

1. Résultats issus de thèses récentes RIVERLY
2. Trois exemples de valorisation de l'information historique

RHÔNE



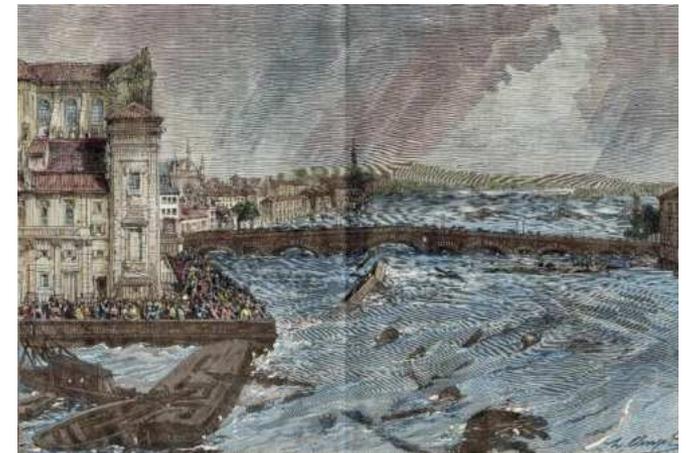
Napoléon III rendant visite aux victimes de la crue du Rhône de mai-juin 1856

RHIN



« Un cours d'eau n'a pas besoin de plus d'un lit pour s'écouler »

GARONNE

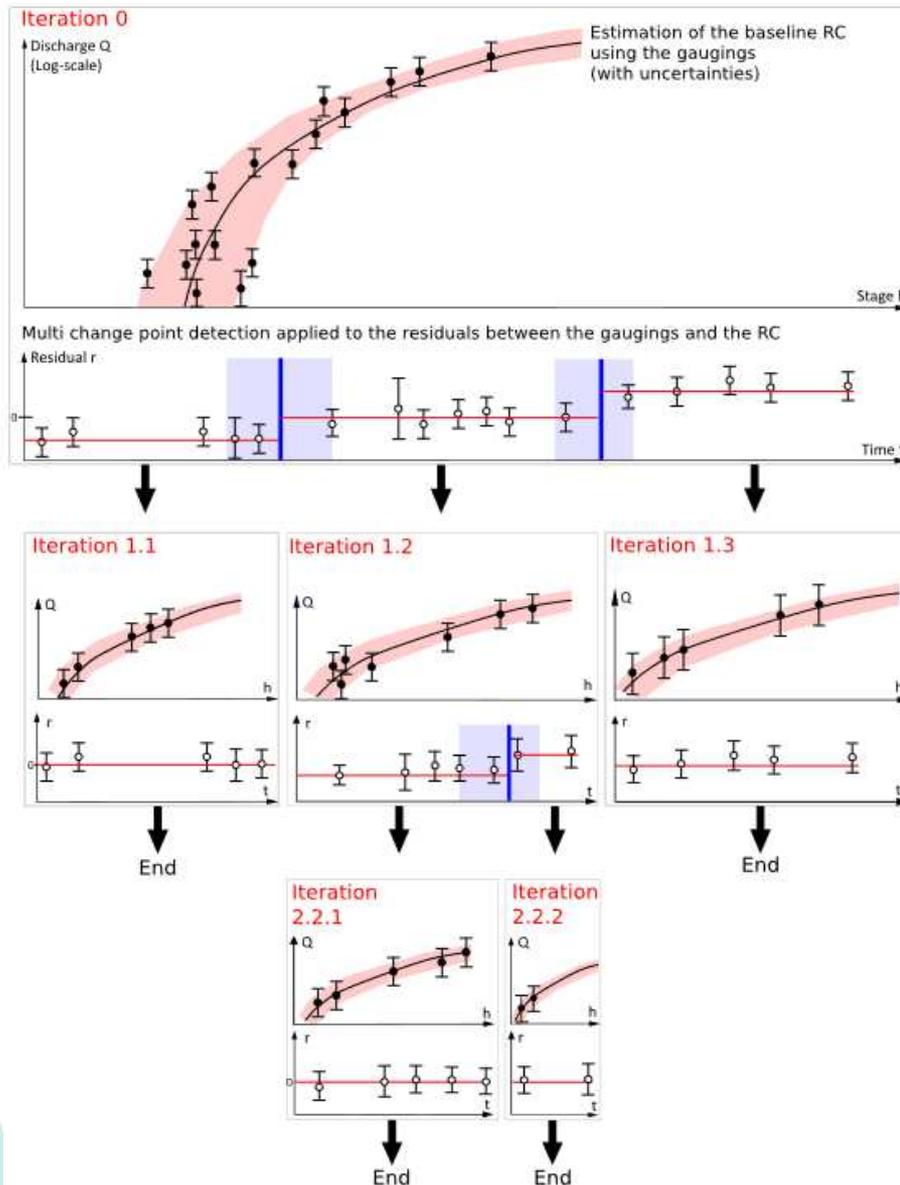


La crue de la Garonne à Toulouse en juin 1875

➤ Thèse de Matteo DARIENZO (2020)

Equipes HYR & HYBV

Encadrants : M. Lang, J. Le Coz, B. Renard



Procédure de segmentation à partir des jaugeages

⇒ décomposition d'une chronique en sous-périodes homogènes

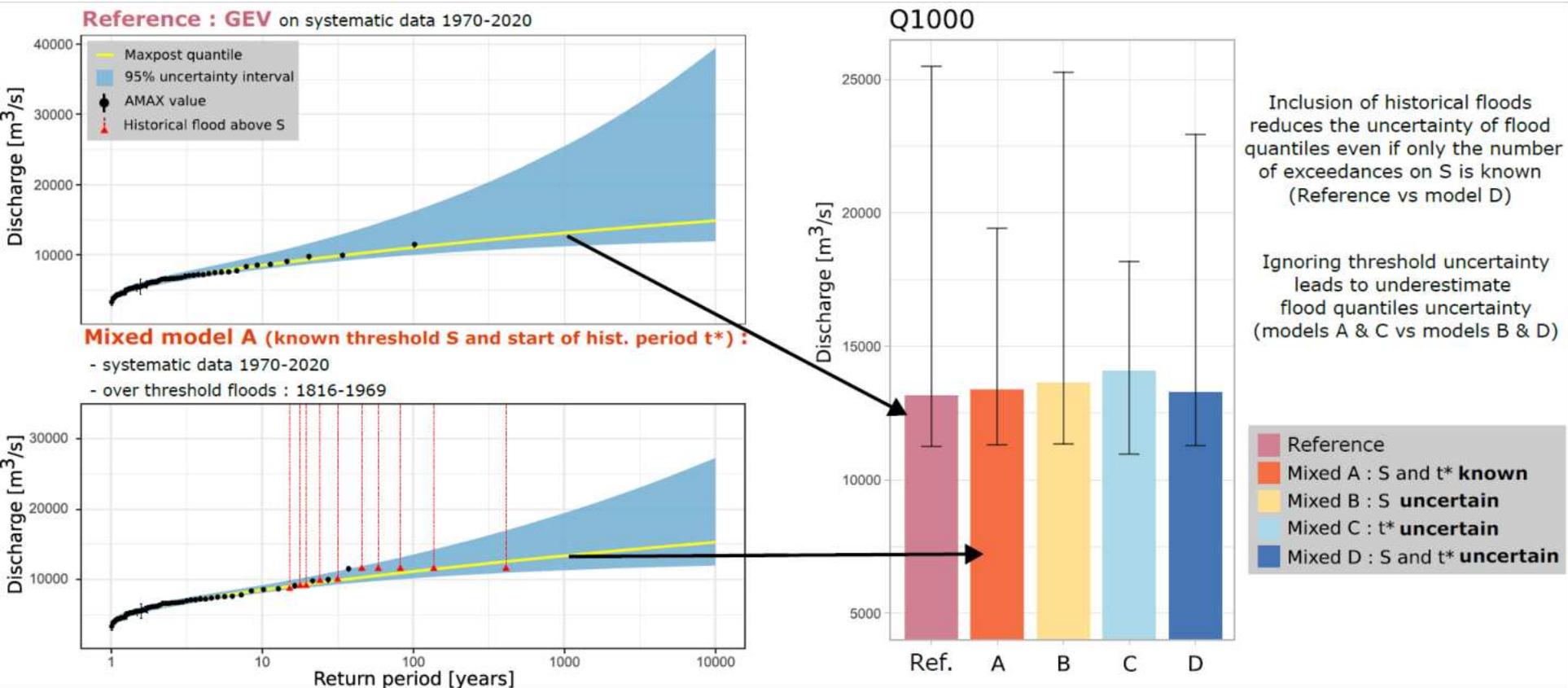
Avec la méthode BaRatin - SPD

(thèse *HYR & HYBV* de Valentin Mansanarez, 2016)

Reconstitution des débits de crue AVEC incertitudes

Thèse de Mathieu LUCAS (2019-2023) *Equipes HYBV & HYR*

Encadrants : M. Lang, B. Renard, J. Le Coz



Chaîne de propagation des incertitudes pour l'analyse de la distribution des crues

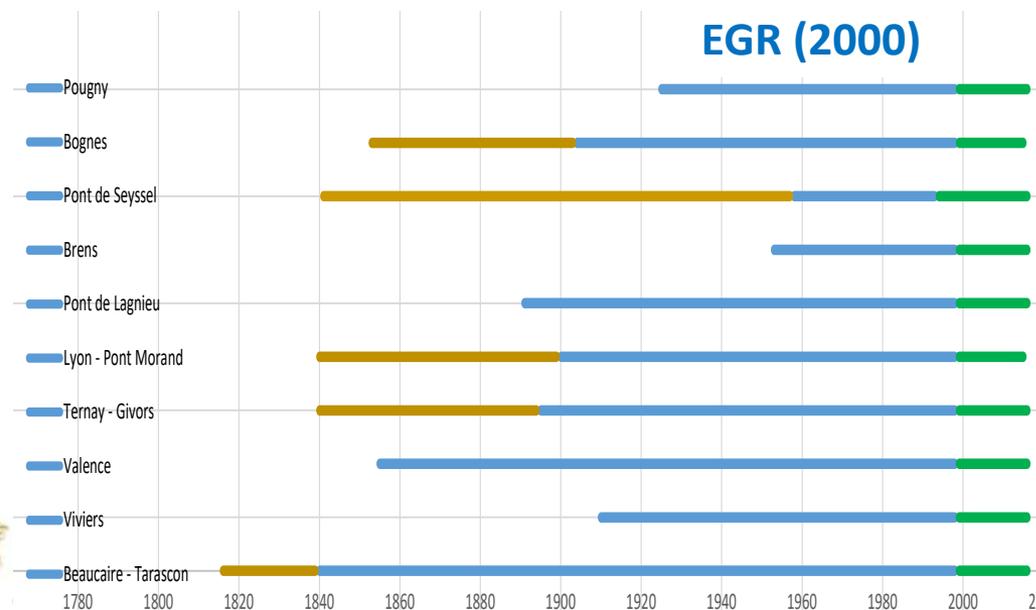
- ⇒ Introduction d'un modèle probabiliste considérant les incertitudes sur les crues historiques (seuil de perception, date de début de la période historique)

Actualisation de l'hydrologie des crues du Rhône

Bard & Lang (2017)



Etude antérieure EGR (2000)



Travail de collecte et de critique des données de débit
→ en moyenne, la taille des séries passe de 100 à 150 ans

+ 490 années-stations

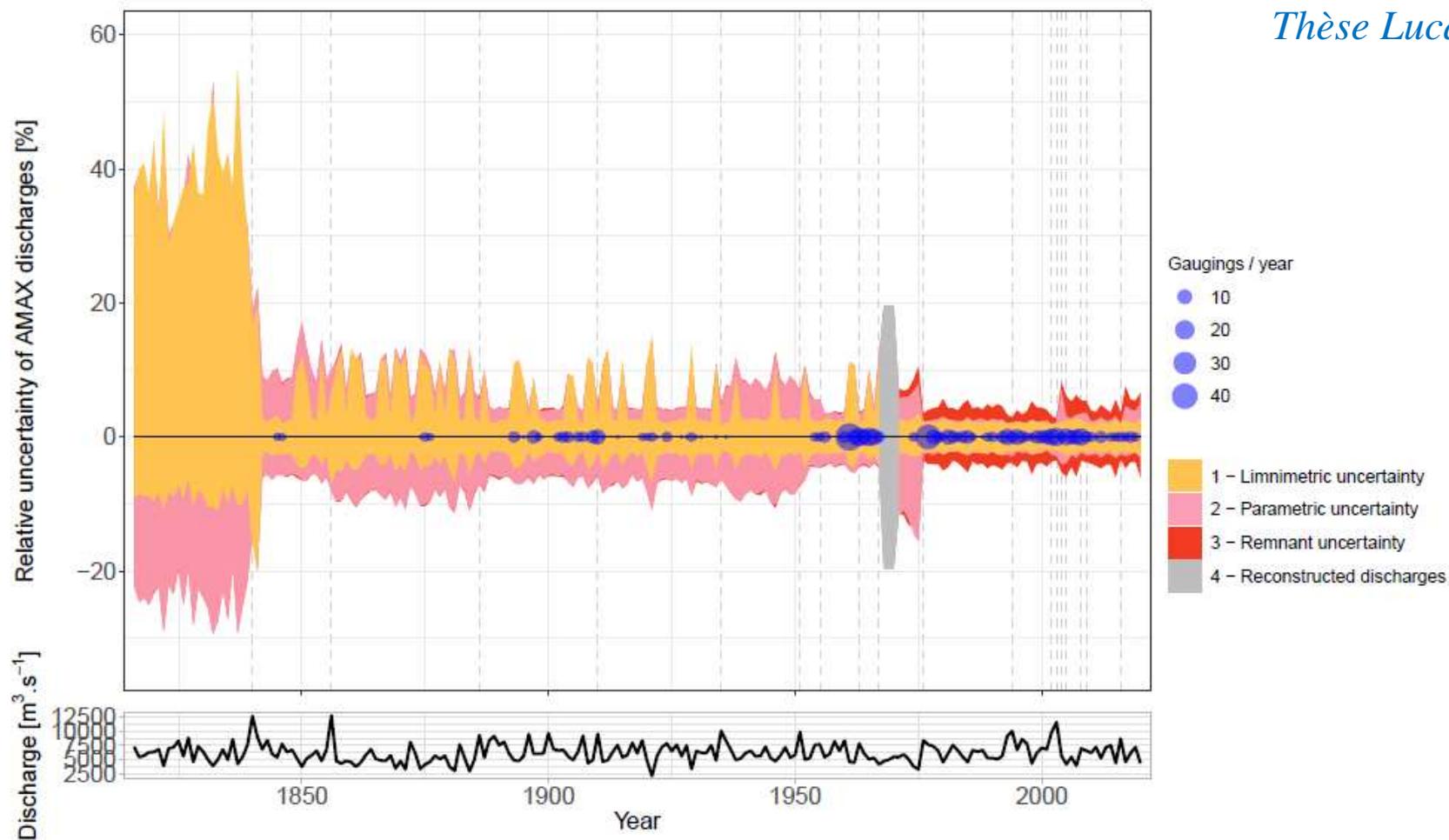
Stations hydrométriques

- ◇ simple niveau
- ⊗ double niveau
- △ ultra-sons
- virtuelle

0 25 50 75 100 km

➤ Débits de crue du Rhône à Beaucaire 1816-2020

Thèse Lucas (2023)



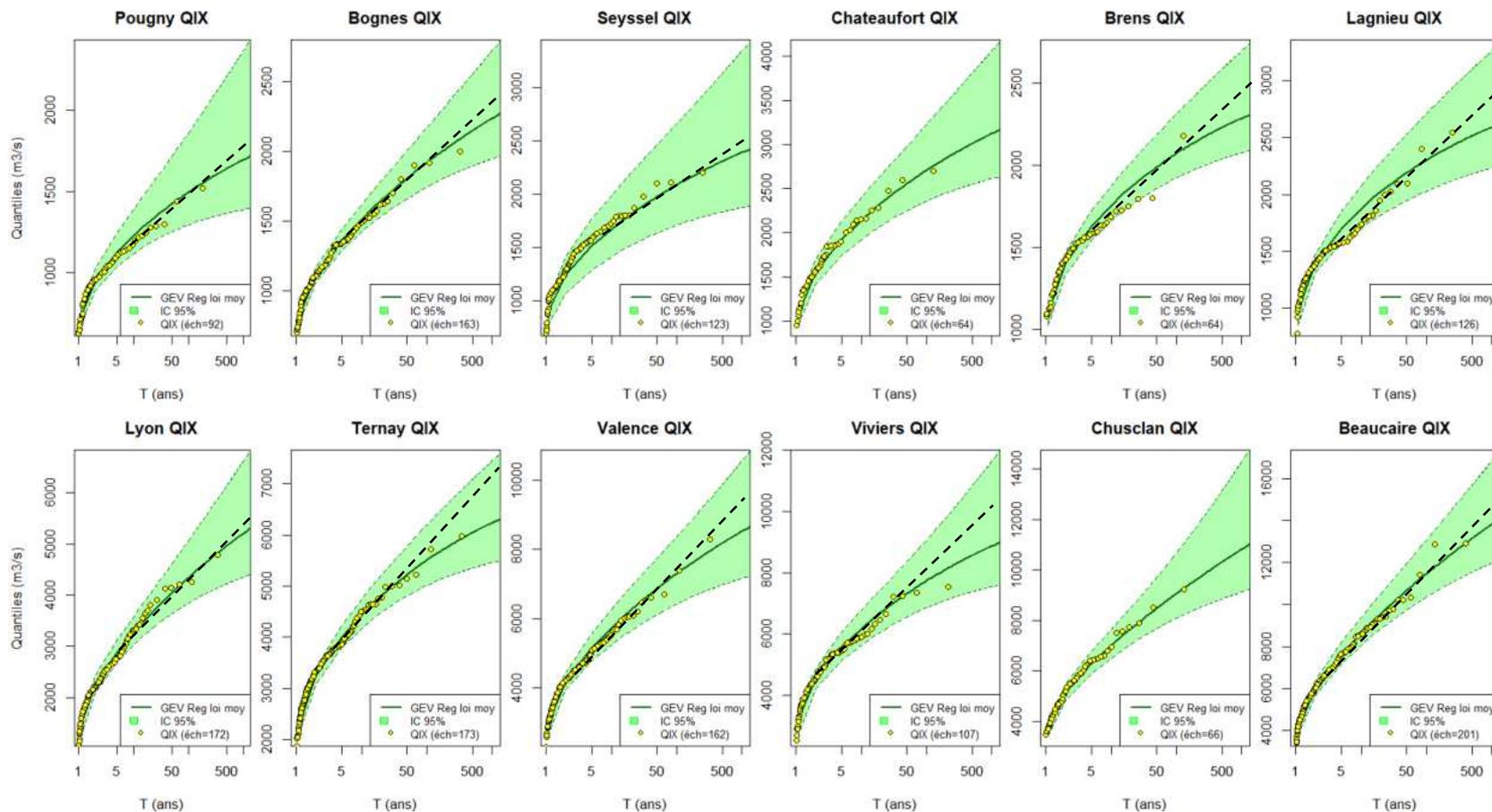
Décomposition des sources d'incertitudes (hauteur, courbe de tarage)

→ faible incertitude sur la période récente ($\pm 5\%$)

→ forte incertitude sur la période la plus ancienne ($\pm 30\%$)

➤ Révision à la baisse de la crue millénaire du Rhône

Bard & Lang (2017)



*Gumbel
EGR (2000)*

L'extrapolation par une loi GEV donne des résultats inférieurs (-2 à - 15 %) à ceux obtenus antérieurement avec une loi de Gumbel (étude EGR, 2000)

➔ valeurs retenues pour les Plans de Prévention du Risque Inondation, la sécurité des digues et des centrales nucléaires sur l'axe du Rhône

➤ Expertise sur les crues du Rhin supérieur (Lang *et al.*, 2022)

Partie aval du Rhin franco-allemand

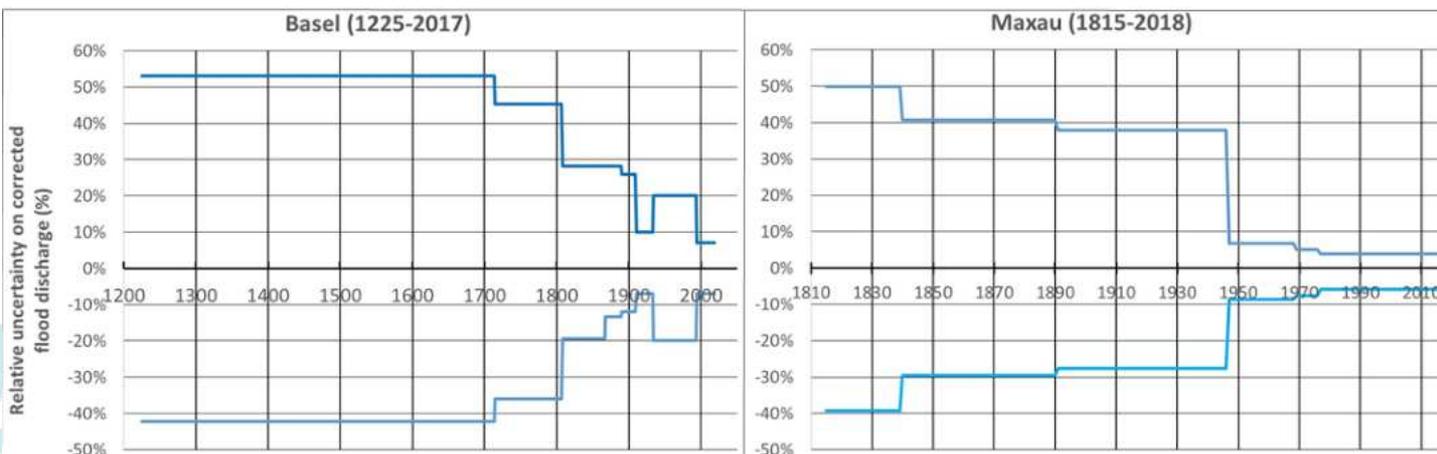
Q_{1000} (Allemagne) = Q_{100} (France)

$Q_{10\ 000}$ (Allemagne) = Q_{1000} (France)

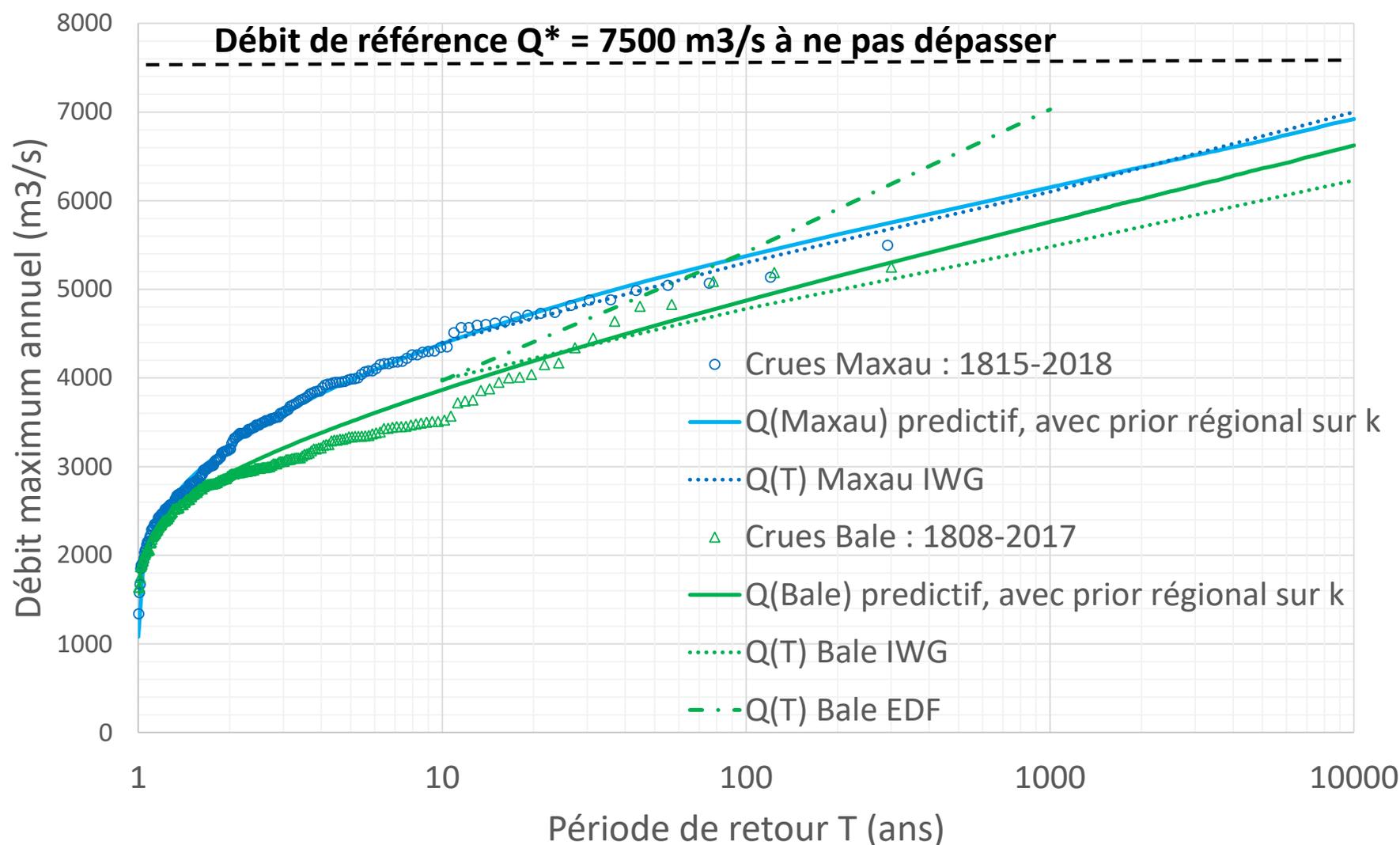
- Allemagne : crues du XIX^{ième} siècle non exploitées
- France : 6 crues hist. (1802-1932); pas de correction des débits
- INRAE : Max annuel à Maxau (1815-2018) et Bâle (1808-2017)
+ crues historiques à Bâle (1225-1807)

Travail de collecte et de critique des données de débit

- ➔ l'incertitude sur les débits de crue varie de 5-7 % (période récente)
à 45-48% (période la plus ancienne)



➤ Expertise sur les crues du Rhin supérieur (Lang *et al.*, 2022)



Le débit de référence a une probabilité inférieure à 10^{-4} d'être dépassé

➔ la sécurité des digues du Rhin en aval de Strasbourg est considérée comme acceptable

➤ Expertise sur la crue de référence de la Garonne à Agen

(Lang *et al.*, 2022)

Crue Millénaire Majorée (CMM) à **Golfech**

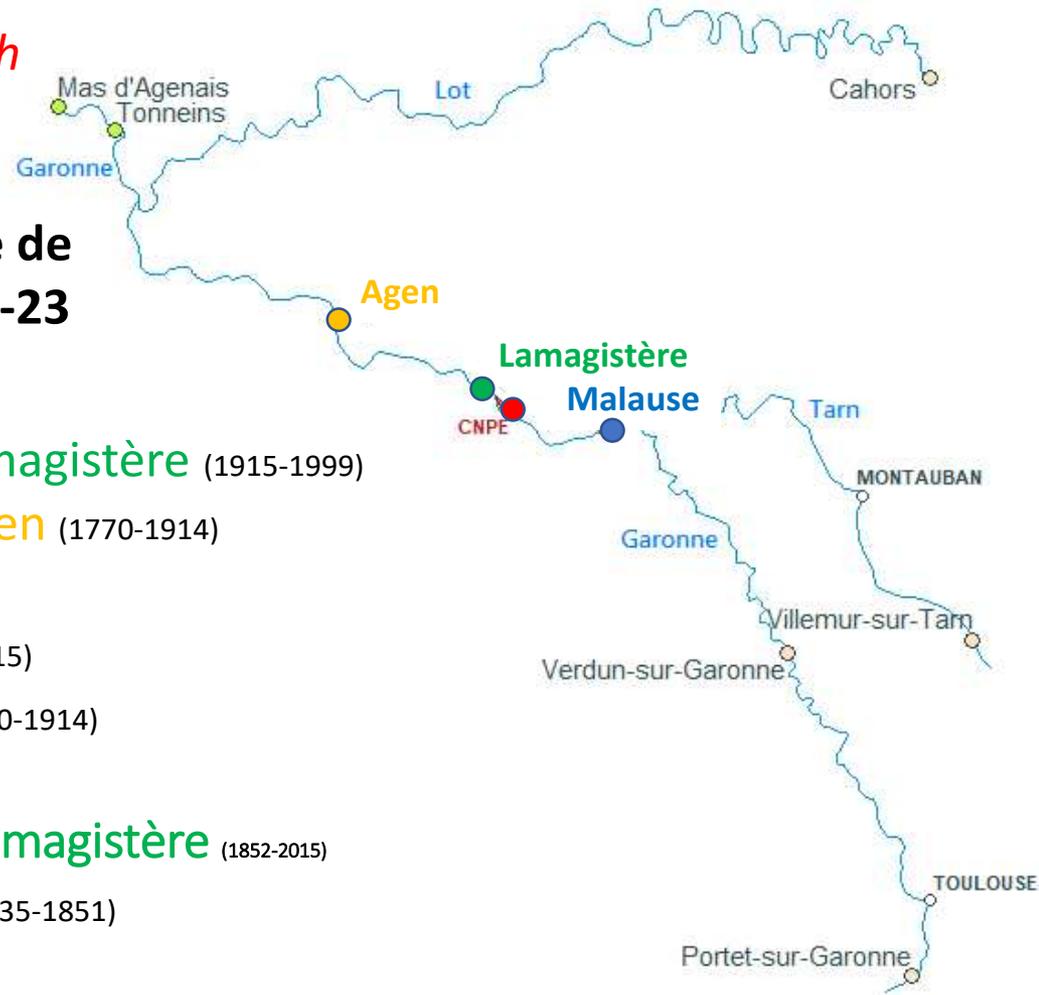
CMM = 12 600 m³/s (EDF)

vs CMM = 16 000 m³/s (IRSN)

➔ **Fermeture potentielle de la centrale de Golfech (2600 MW) dès l'hiver 2022-23**

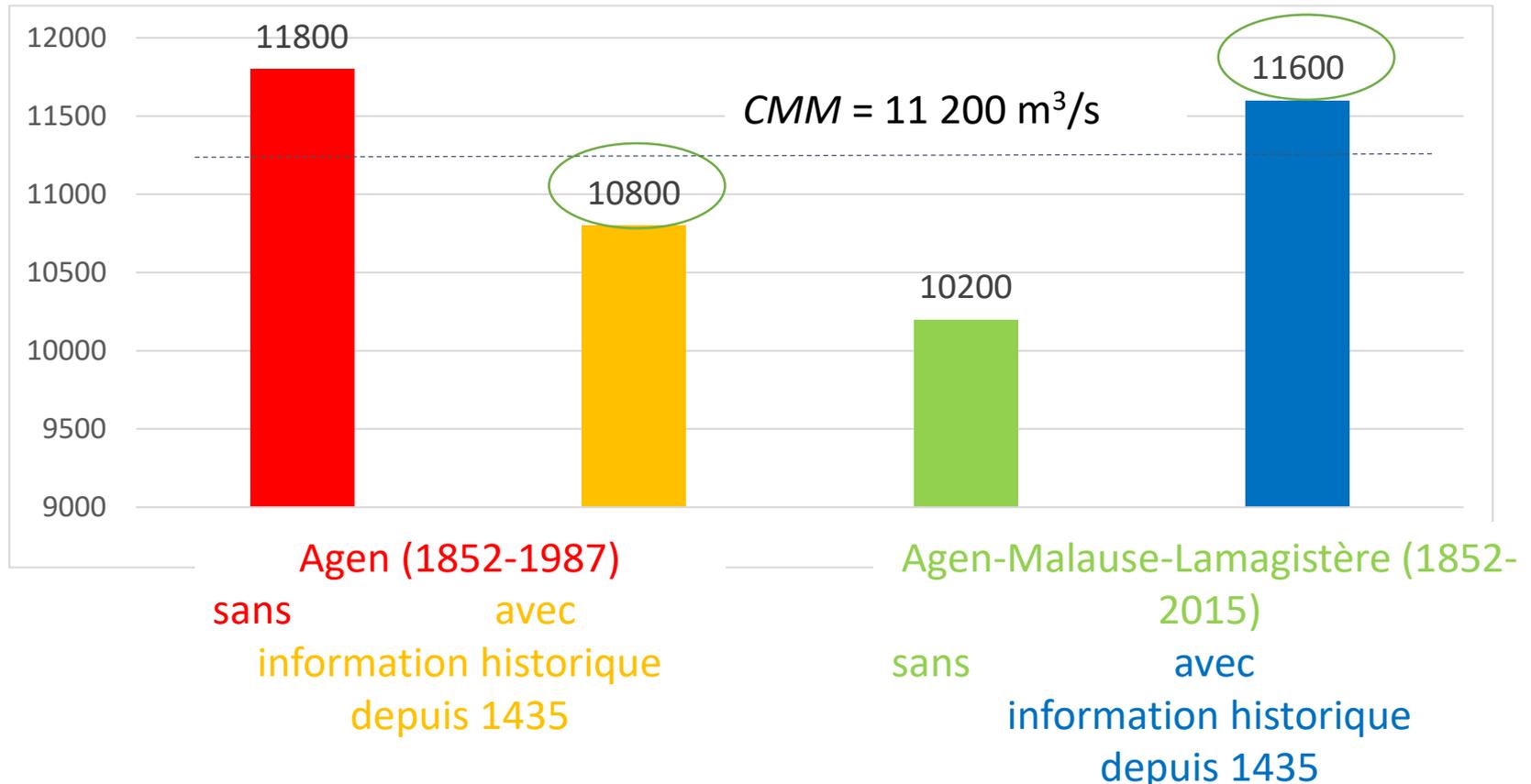
(26 réacteurs fermés sur 56)

- EDF (2000, 2017) : série **Malause-Lamagistère** (1915-1999)
+ 12 crues hist. **Agen** (1770-1914)
loi Exponentielle
- IRSN (2021) : série **Lamagistère** (1967-2015)
+ 12 crues hist. **Agen** (1770-1914)
loi Pareto généralisée
- INRAE (2023) : série **Agen -Malause-Lamagistère** (1852-2015)
+ 13 crues hist. **Agen** (1435-1851)
loi GEV



➤ Expertise sur la crue de référence de la Garonne à Agen

(Lang *et al.*, 2022)



Le débit de référence ($Q^* = 12\,600 \text{ m}^3/\text{s}$) utilisé pour la protection de la centrale de Golfech n'est pas remis en cause avec la nouvelle étude

➤ Conclusion

- L'information historique peut / ou pas permettre de mieux estimer les crues extrêmes

Deux effets opposés

réduction de l'incertitude d'échantillonnage

ET incorporation de données moins précises

- Travaux de thèse successifs (Mansanarez, 2016; Darienzo, 2020; Lucas, 2023)

Reconstitution des débits (périodes récente et ancienne) AVEC incertitudes

Modèle probabiliste adapté

manipulation d'un échantillon mixte (max annuel + collection de crues historiques supérieures à un seuil)

prise en compte des incertitudes sur les débits

- Exemples d'expertises ayant permis de donner une réponse sur les crues extrêmes

Rhône (PPRI, digues, centrales nucléaires), Rhin (digues), Garonne (centrale nucléaire)

- Articles scientifiques

Mansanarez et al. (2019). Shift happens! Adjusting stage-discharge rating curves to morphological changes at known times. *Water Resour. Res.*, 55, <https://doi.org/10.1029/2018WR023389>

Darienzo et al. (2021). Detection of stage-discharge rating shifts using gaugings: A recursive segmentation procedure accounting for observational and model uncertainties. *Water Resour. Res.*, 57, <https://doi.org/10.1029/2020WR028607>

Lucas et al. (2023). Are historical stage records useful to decrease the uncertainty of flood frequency analysis ? A 200-year long case study. *J. Hydrology*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129840>

➤ Influence de la contamination chimique sur la biodiversité microbienne et le développement de l'antibiorésistance et des microorganismes pathogènes dans les écosystèmes aquatiques

EMA: Ecotoxicologie Microbienne Aquatique
<https://ema.riverly.inrae.fr/>

LAMA: Laboratoire de chimie des milieux aquatiques
<https://lama.riverly.inrae.fr/>

➤ Une collaboration « historique »

EMA



LAMA



Depuis 2010:

- Une dizaine de projets communs
- Une trentaine d'articles communs

co-direction de 3 thèses



A.S. Lambert
(2012-15)



H. Rogue
(2022-)



I. Kgoni
(2024-)

+ collaborations sur 3 autres thèses



A. Mahamoud Ahmed
(2017-21)



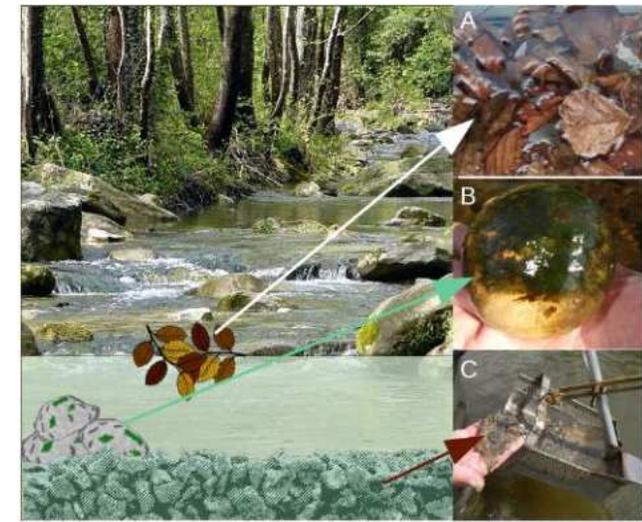
L. Kergoat
(2019-23)



A. Pérez Vasquez
(2024-)

INRAE

➤ Une collaboration « historique »



Communautés microbiennes naturelles



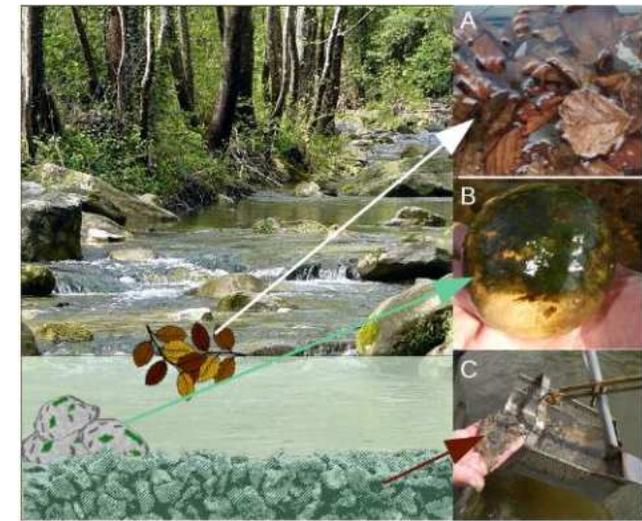
Contaminants chimiques
(pesticides, éléments traces métalliques, substances pharmaceutiques, produits de transformation)



INRAE

Ema/LAMA
Plénière RiverLy 9/12/2024

➤ Une collaboration « historique »



Communautés microbiennes naturelles



Contaminants chimiques

(pesticides, éléments traces métalliques, **substances pharmaceutiques**, produits de transformation)



INRAE

Ema/LAMA
Plénière RiverLy 9/12/2024

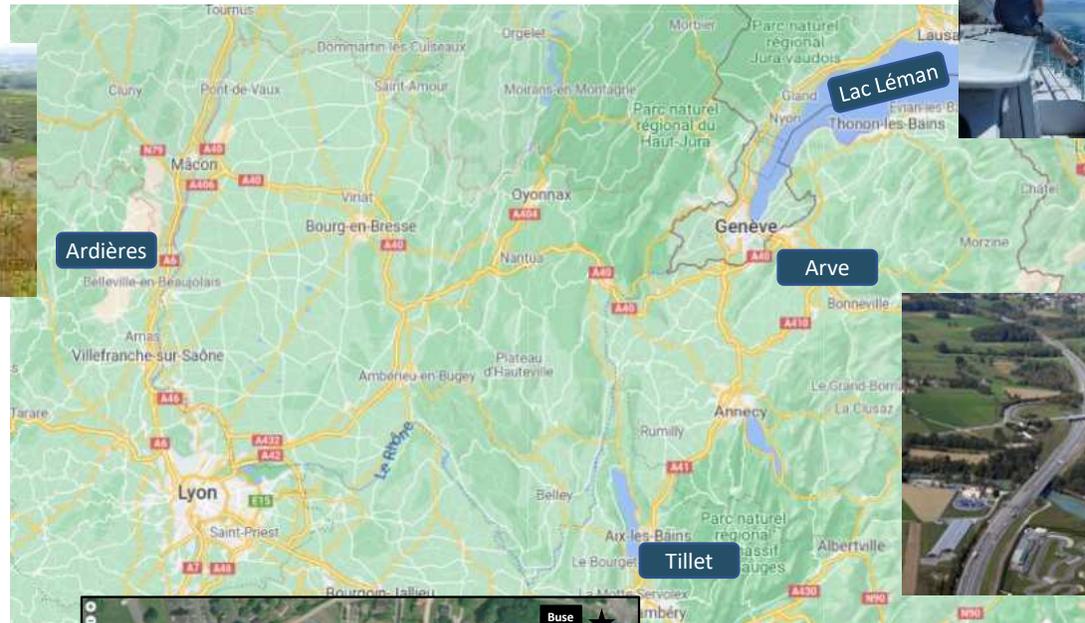
➤ Une contamination généralisée dans le monde



... qui concerne aussi nos écosystèmes



Zone agricole (viticole)



Bassin versant multi-usages



Rejets urbains et hospitaliers



Zone urbaine (Aix-les-Bains)
(sans rejet de station d'épuration)



➤ Les communautés microbiennes sont exposées

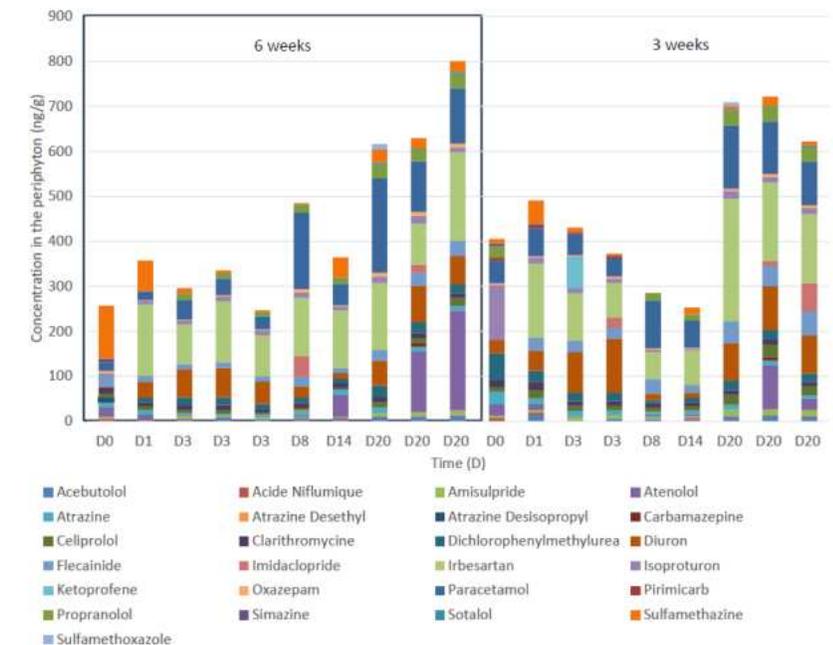
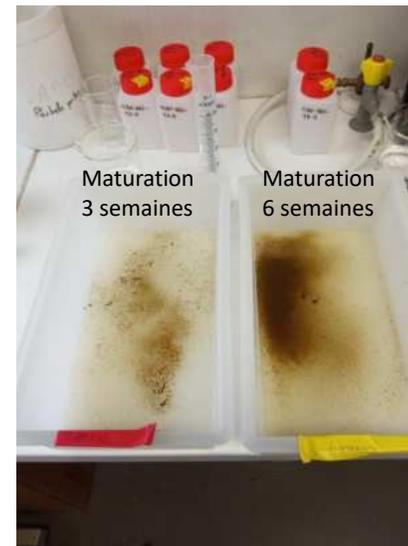


Des développements continus au sein du LAMA pour mieux caractériser cette exposition



ex. stage Aline Thiery (2024)

Étude *in situ* de la bioaccumulation de substances pharmaceutiques dans les communautés microbiennes périphytiques



INRAE

Ema/LAMA
Plénière RiverLy 9/12/2024

➤ Des effets sur la diversité et les activités microbiennes



frontiers | Frontiers in Environmental Science

TYPE Review
PUBLISHED 09 January 2023
doi: 10.3389/fenvs.2022.1093920

2023

Do pharmaceuticals affect microbial communities in aquatic environments? A review

Klaudia Świacka^{1*}, Jakub Maculewicz², Dorota Kowalska² and Michael R. Grace³

¹Department of Marine Ecosystems Functioning, Institute of Oceanography, University of Gdańsk, Gdynia, Poland, ²Department of Environmental Analysis, Faculty of Chemistry, University of Gdańsk, Gdańsk, Poland, ³Water Studies Centre, School of Chemistry, Monash University, Melbourne, Vic, Australia

 antibiotics



Review

An Overview of the Impact of Pharmaceuticals on Aquatic Microbial Communities

Isabel Pinto^{1,2}, Manuel Simões^{1,2} and Inês B. Gomes^{1,2,*}

2022

¹ LEPABE—Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
² ALiCE—Associate Laboratory in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
* Correspondence: ibgomes@fe.up.pt



INRAE

Ema/LAMA

Plénière RiverLy 9/12/2024

➤ Des effets sur la diversité et les activités microbiennes



frontiers | Frontiers in Environmental Science

TYPE Review
PUBLISHED 09 January 2023
doi: 10.3389/fenvs.2022.1093920

2023

Do pharmaceuticals affect microbial communities in aquatic environments? A review

Klaudia Świacka^{1*}, Jakub Maculewicz², Dorota Kowalska² and Michael R. Grace³

¹Department of Marine Ecosystems Functioning, Institute of Oceanography, University of Gdańsk, Gdynia, Poland, ²Department of Environmental Analysis, Faculty of Chemistry, University of Gdańsk, Gdańsk, Poland, ³Water Studies Centre, School of Chemistry, Monash University, Melbourne, Vic, Australia

Review

An Overview of the Impact of Pharmaceuticals on Aquatic Microbial Communities

Isabel Pinto^{1,2}, Manuel Simões^{1,2} and Inês B. Gomes^{1,2,*}

¹ LEPABE—Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
² ALiCE—Associate Laboratory in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
* Correspondence: ibgomes@fe.up.pt

2022

Des effets parfois inattendus...

frontiers in Microbiology

ORIGINAL RESEARCH
published: 07 May 2021
doi: 10.3389/fmicb.2021.643719



Laura Kergoat

Environmental Concentrations of Sulfonamides Can Alter Bacterial Structure and Induce Diatom Deformities in Freshwater Biofilm Communities

Laura Kergoat¹, Pascale Besse-Hoggan², Martin Lereboure², Jérémie Beguet³, Marion Devers³, Fabrice Martin-Laurent², Matthieu Masson¹, Soizic Morin⁴, Amélie Roinat¹, Stéphane Pesce¹ and Chloé Bonninaeu^{1*}

+ Thèse Hélène Rogue, en cours

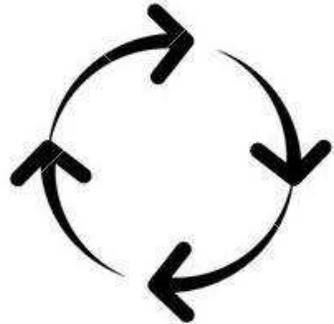


INRAE

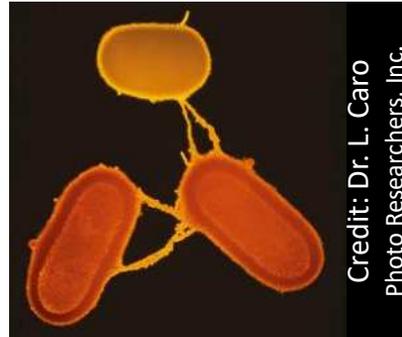
Ema/LAMA

Plénière RiverLy 9/12/2024

➤ Une adaptation des communautés microbiennes à ces substances



**Des temps de
génération courts**
(de quelques heures à
quelques jours)



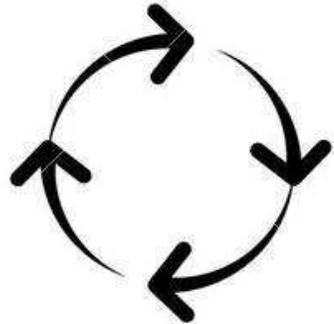
Credit: Dr. L. Caro
Photo Researchers, Inc.

**Une grande
plasticité**
(physiologique et/ou
génétique)

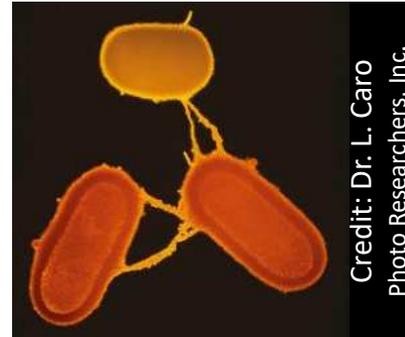


**Une forte redondance
fonctionnelle**
(une fonction écologique
→ ≠ microorganismes)

➤ Une adaptation des communautés microbiennes à ces substances



**Des temps de
génération courts**
(de quelques heures à
quelques jours)



Credit: Dr. L. Caro
Photo Researchers, Inc.

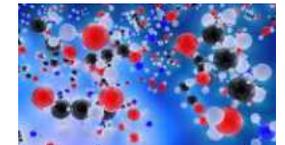
**Une grande
plasticité**
(physiologique et/ou
génétique)



**Une forte redondance
fonctionnelle**
(une fonction écologique
→ ≠ microorganismes)



**Contamination
environnementale**



➔ chronique et à faibles doses
(favorise l'adaptation à moyen-long terme)

➤ Une adaptation des communautés microbiennes à ces substances

Adaptation à la biodégradation



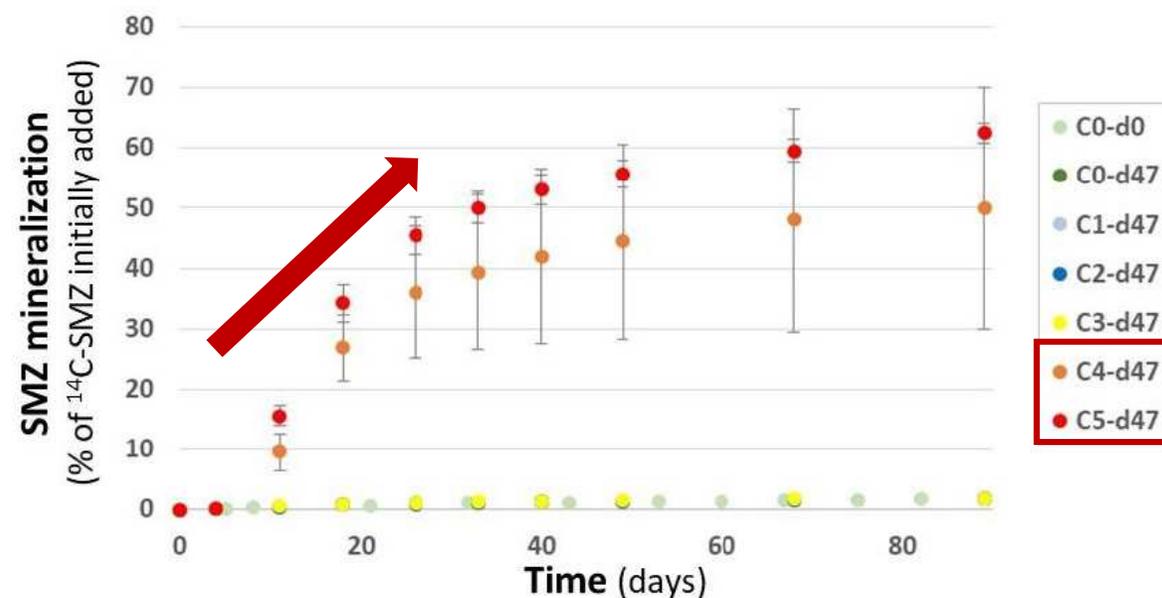
toujours
Hélène 😊



Exposition chronique (47 jours) à une gamme de concentrations croissantes en sulfaméthazine



Marion Devers
UMR Agroécologie



Développement de capacités de biodégradation dans les sédiments exposés aux 2 concentrations les plus fortes

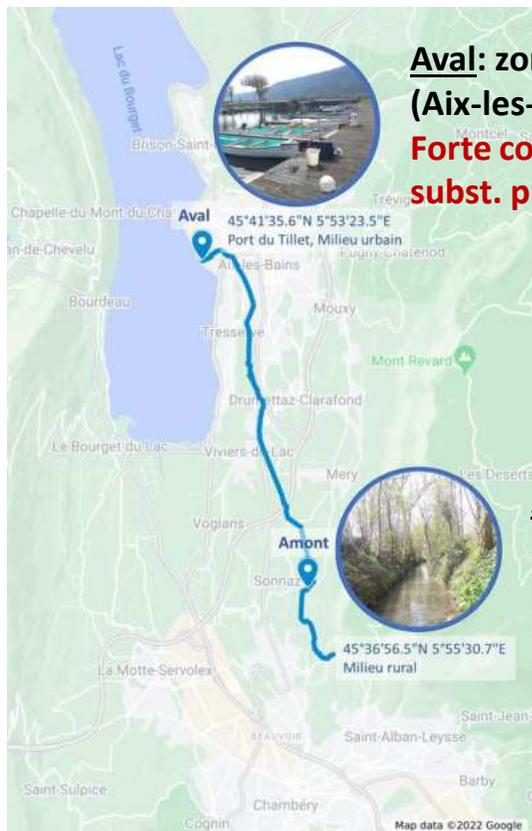
➤ Une adaptation des communautés microbiennes à ces substances

Augmentation des capacités de tolérance

Rivière Tillet (affluent lac du Bourget)

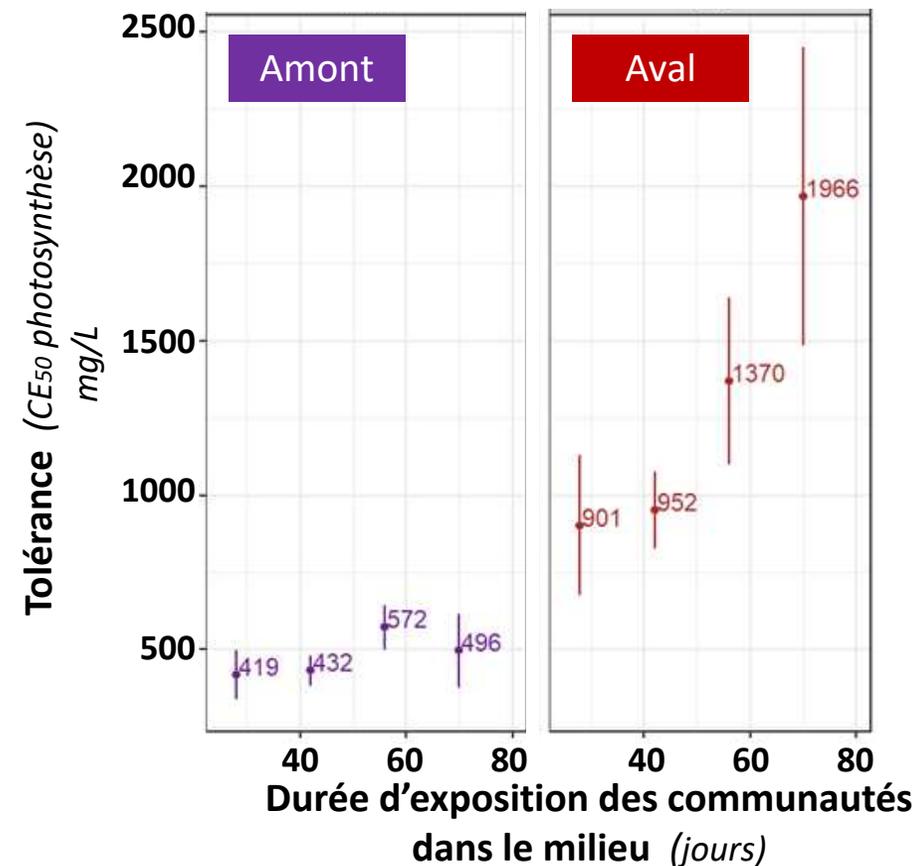


Et encore Hélène
😊
(à l'air libre cette fois!)



Aval: zone urbaine
(Aix-les-bains)
**Forte contamination aux
subst. pharmaceutiques**

Amont: zone peu
anthropisée
**Peu de contamination
= référence**



Augmentation de la tolérance des communautés à certaines substances présentes dans le milieu (ici le diclofénac)

➤ Une adaptation des communautés microbiennes à ces substances

Développement des résistances aux antibiotiques

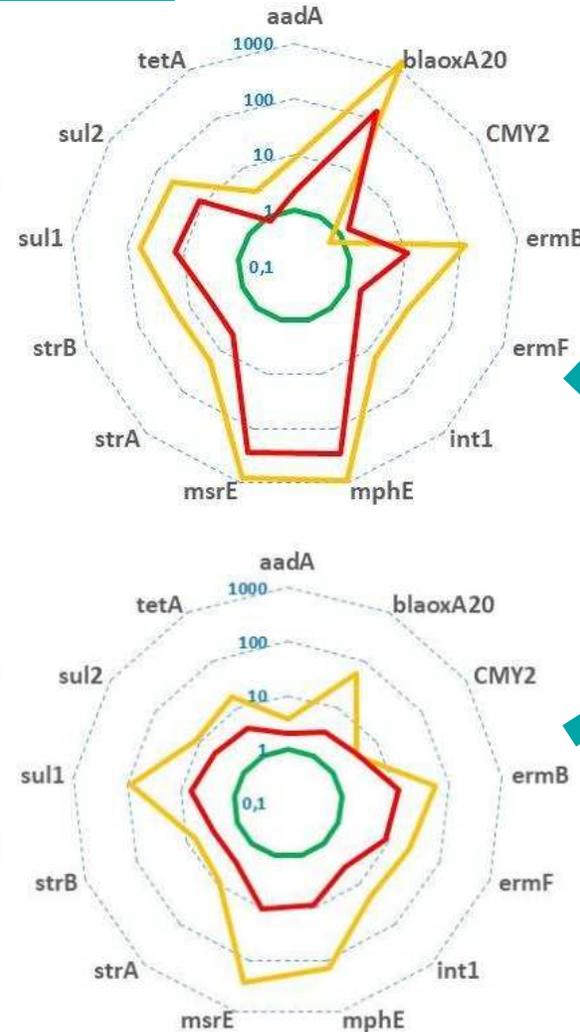
Tillet – novembre 2021



Dr. Ed Topp

 Agriculture and Agri-Food Canada

- *sul1* } sulfonamides
- *sul2* }
- *strA* } streptomycine
- *strB* }
- *ermB* } erythromycine
- *ermF* }
- *tetA* → tetracycline
- *mphE* } macrolides
- *msrE* }
- *bla_{oxA20}* carbapénèmes
- *CMY2* → bêta-lactamine
- *aadA* → streptomycine/spectinomycine



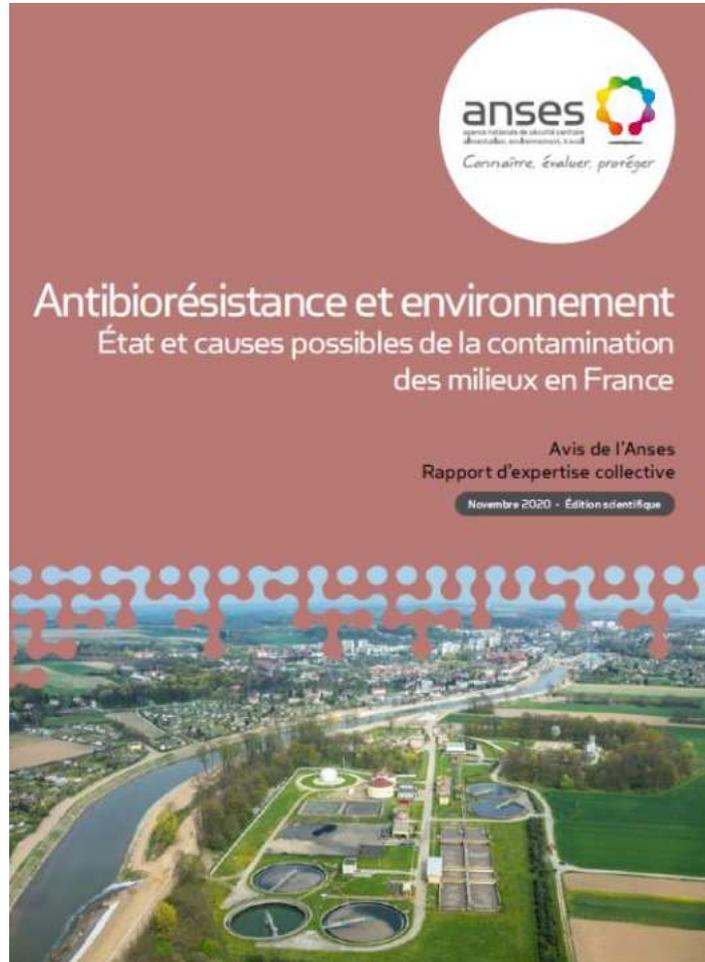
3 stations:

- Amont
- Buse (rejet)
- Aval

Abondance de la plupart des **gènes de résistance** plus élevée au niveau de la buse.

Données projet PharmaTOX
ZABR/AE RM&C 2021-24
Pesce *et al.*

➤ Développement de la résistance aux antibiotiques



Un fort risque environnemental et sanitaire

INRAE

Ema/LAMA

Plénière RiverLy 9/12/2024

➤ Développement de la résistance aux antibiotiques

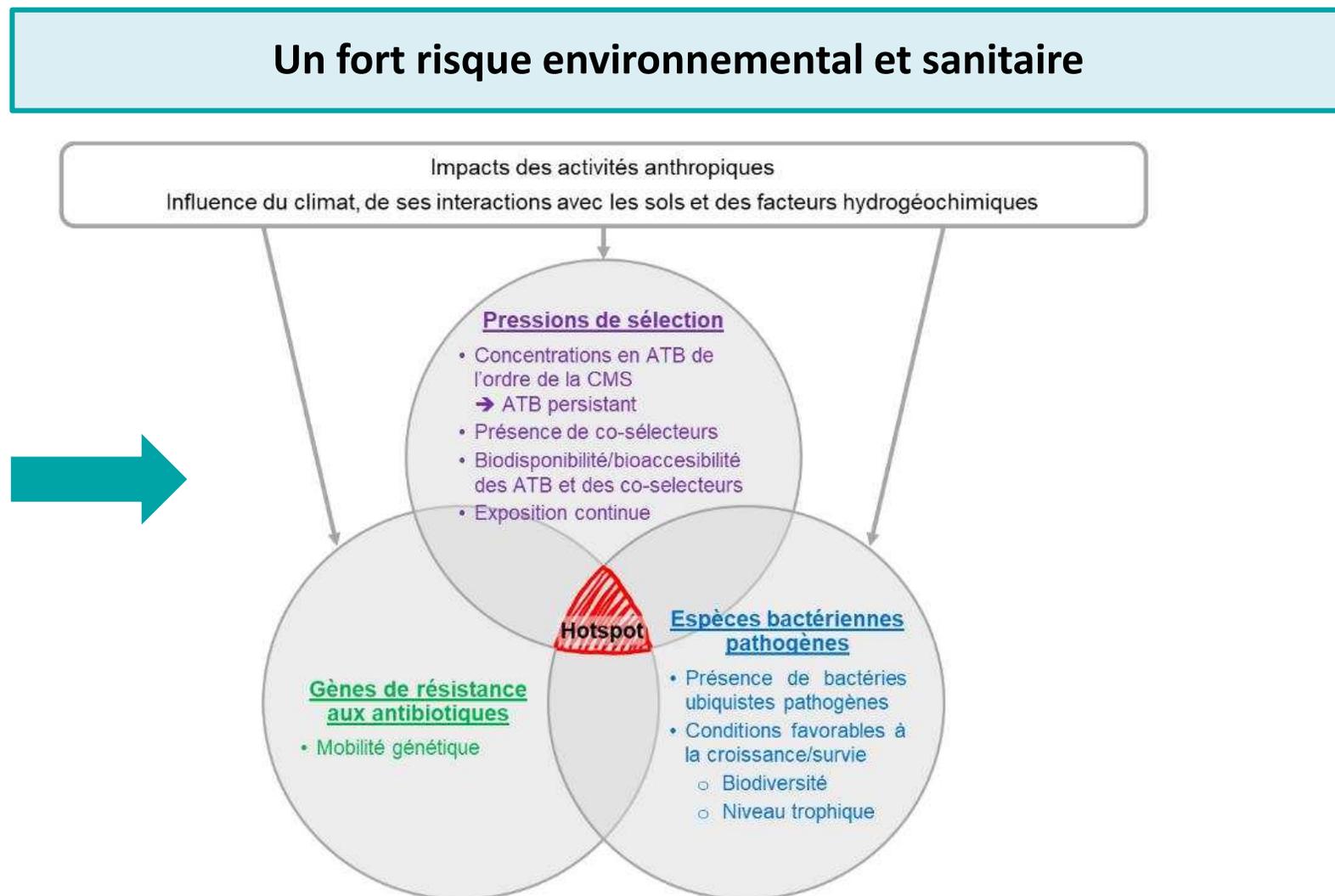
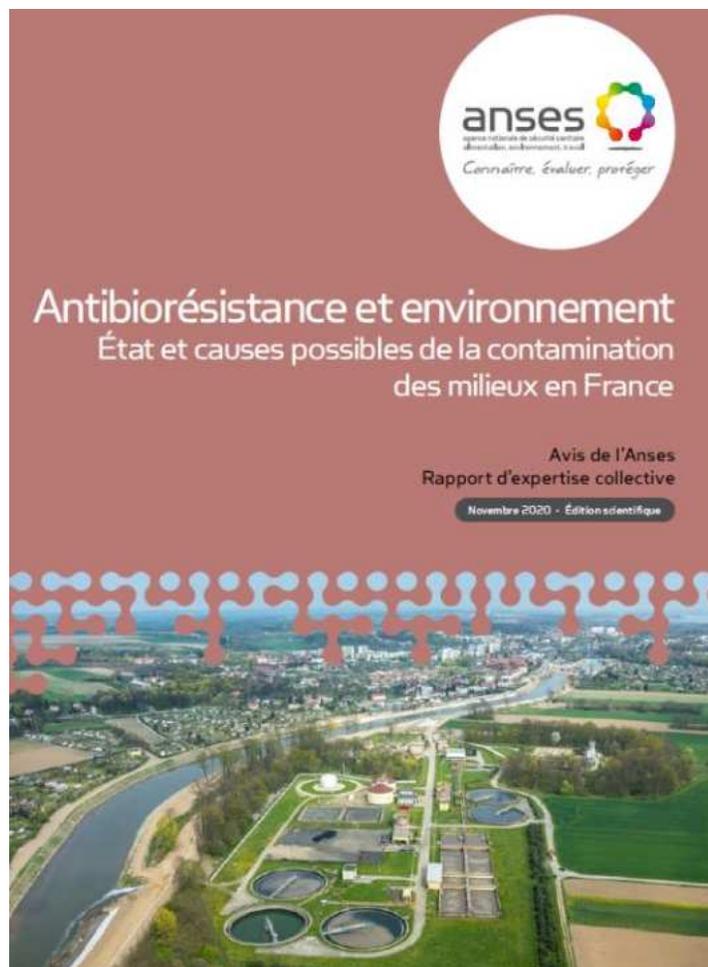


Figure 5. Conditions environnementales favorables au transfert de gènes de résistance aux antibiotiques vers des espèces bactériennes pathogènes.

➤ Développement de la résistance aux antibiotiques

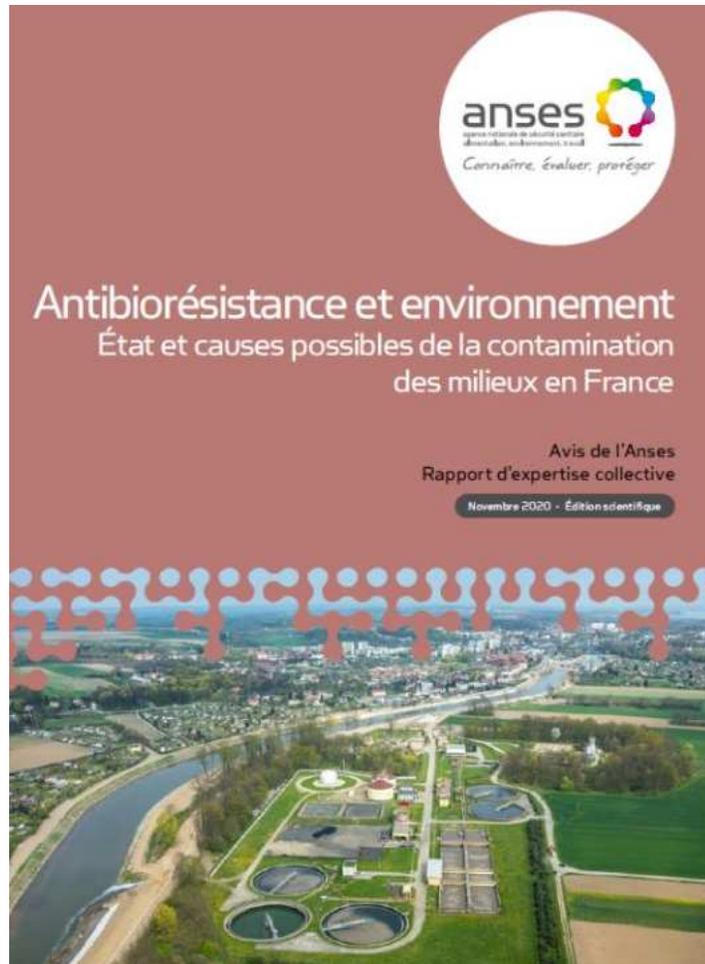
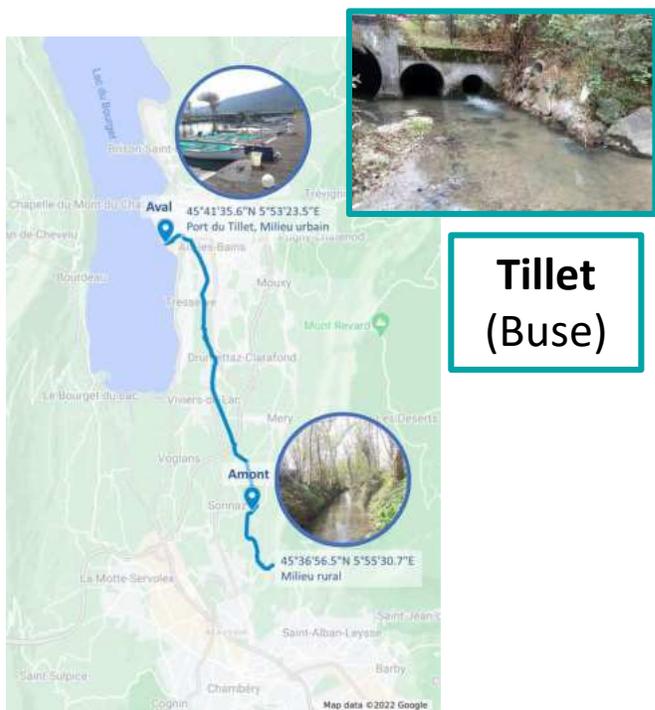


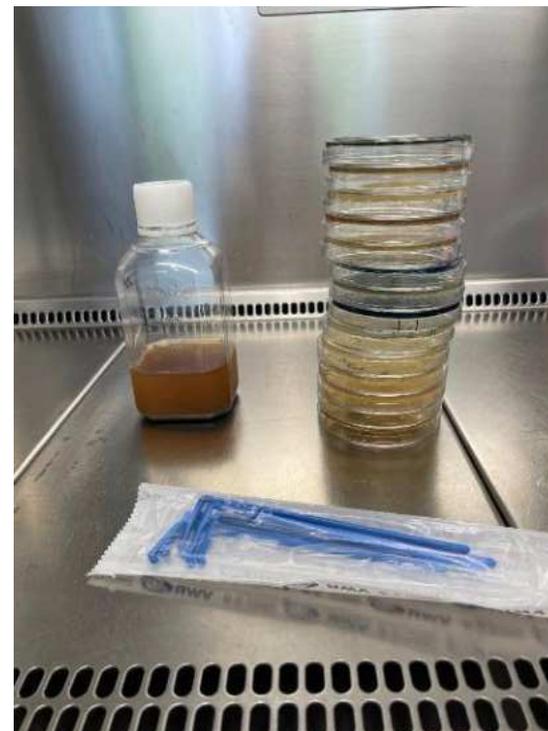
Figure 5. Conditions environnementales favorables au transfert de gènes de résistance aux antibiotiques vers des espèces bactériennes pathogènes.

➤ Quid des microorganismes pathogènes ?

Laboratoire de bactériologie



Cultures microbiologiques à partir des échantillons environnementaux:
recherche de bactéries pathogènes résistantes aux antibiotiques



Crédit photo: Dr Lucie Amoureux (CHU Dijon)



Lucie Amoureux
(accueil délégation 2023)

MCF-PH CHU Dijon

➤ Quid des microorganismes pathogènes ?



Centre Hospitalier Universitaire
Dijon Bourgogne



Agroécologie
Dijon
Unité de Recherche

Laboratoire de bactériologie



Cultures microbiologiques à partir des échantillons environnementaux:
recherche de bactéries pathogènes résistantes aux antibiotiques
(quelques résultats préliminaires)



Détection de pathogènes résistants incluant des bactéries productrices de bêta-lactamases à spectre élargi (BLSE):

Entérobacteries résistantes aux céphalosporines de troisième génération (C3G) :

- *Escherichia coli* BLSE (plusieurs profils de résistance)
- *Klebsiella pneumoniae* BLSE
- *Enterobacter cloacae* BLSE
- *Citrobacter freundii*



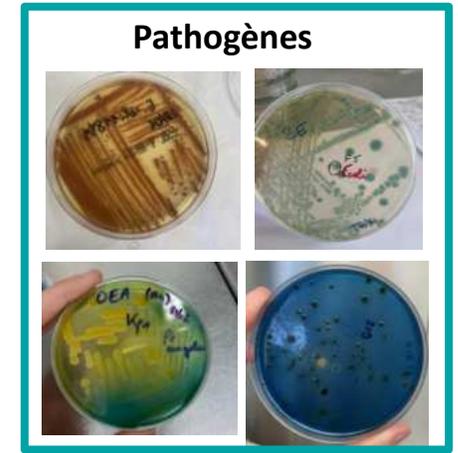
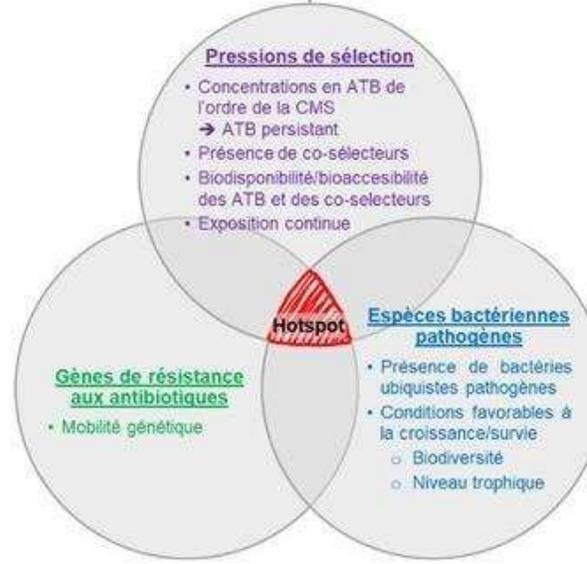
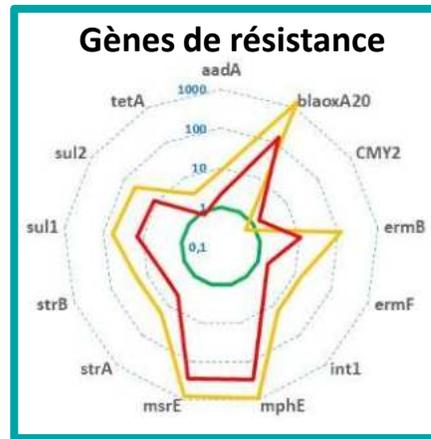
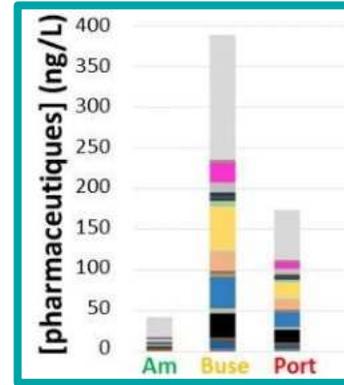
+ **collaboration UMR LEM**

Benoit Cournoyer

➤ Des risques pour la santé... ???



**Tillet
(Buse)**



Crédit photo: Dr Lucie Amoureux (CHU Dijon)

Quels risques pour les organismes (y compris l'homme) dans et à proximité de ce cours d'eau?
 ➔ **importance des approches « one-health »**

➤ En conclusion

La contamination généralisée de l'environnement par les résidus de médicaments :

- Impact la diversité et la structure des communautés microbiennes et fragilise certaines fonctions écologiques
- Favorise l'adaptation des communautés microbiennes à ces substances (biodégradation, tolérance et résistance)
- Favorise le développement des microorganismes résistants aux antibiotiques et la dispersion du matériel génétique impliqué dans ces résistances
- Augmente probablement le risque de prolifération de microorganismes pathogènes et multi-résistants.

Des questions en suspens:

- Quelle est la contribution de la contamination chimique vs contamination microbiologique des milieux ?
- Y-a-t-il des seuils d'exposition aux différentes substances qui augmentent significativement le développement des résistances? Quelles sont les substances présentant le plus grand risque?
- Les transferts de microorganismes ou de matériel génétique entre les différents compartiments sont-ils importants?
- L'environnement représente-t-il uniquement un puits de microorganismes résistants et/ou pathogènes ou est-il également une source pour certains organismes?
- etc.



➤ En conclusion

Projet Pharm-ERA (2024-2028): Doctoral Network (Horizon Europe-MSCA-DN)

horizon europe

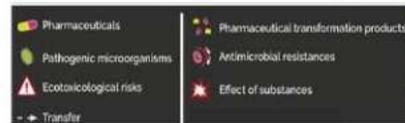
Marie Skłodowska-Curie Actions DOCTORAL NETWORKS - 2022

Pharm-ERA (2,7M€) 2024-2028

Improving monitoring and Environmental Risk Assessment of PHARMaceuticals, antimicrobial resistance and pathogens from terrestrial to aquatic environments



Financement de **10 thèses** **interdisciplinaires, internationales et intersectorielles** autour de la **dissémination des substances pharmaceutiques, de l'antibiorésistance et des microorganismes pathogènes** depuis les milieux terrestres vers les milieux aquatiques et des **risques et impacts écologiques** que cela engendre.



Séminaire de lancement – Lyon – 25-29 novembre 2024



INRAE

Ema/LAMA
Plénière RiverLy 9/12/2024

<https://pharm-era.hub.inrae.fr/>



Réunion projet CommuSED (2021)



Séminaire PharmaAQUA (2022)

**Merci à tous les membres (actuels et passés)
des équipes EMA et LAMA**



Lancement Pharm-ERA (2024)



Réunion projet PharmaTOX (2022)



et merci pour votre attention...



INRAE

Ema/LAMA

Plénière RiverLy 9/12/2024

Restaurer la continuité écologique des cours d'eau : que sait-on et comment passer collectivement à l'action ?

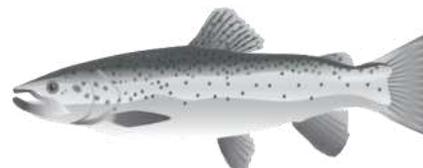
Restoring ecological connectivity of streams: what do we know and how can we collectively move to action?

Alp, M., Arnaud, F., Barthélémy, C., Bernez, I., Clemens, A., Cottet, M., Dufour, S., Germaine, M.-A. Gramaglia, C., Grivel, S., Le Pichon, C., Lespez, L., Lusson, M., Navratil, O., Piégay, H., Prunier, J.G., Rollet, A.-J., Tales, E., Lamouroux, N.



Restoration de la continuité écologique une vive controverse en France (et ailleurs ...)

- « Pourquoi dépenser des millions d'argent public pour 2 saumons ? »
- « Le patrimoine historique est détruit pour la restauration de la connectivité, mais les truites meurent toujours »



[Tribune] La continuité écologique des
cours d'eau en question

Enquête – Eau, rivières, océans

La bataille des moulins engage le destin des rivières

14/06/2024

Les truites meurent, les moulins meurent, les dogmes survivent



Continuité écologique : pourquoi ça bloque encore ?

PUBLIÉ LE 10/06/2015 Par SYLVIE LUNEAU - Club : Club Techni Cités

3 | RÉAGIR

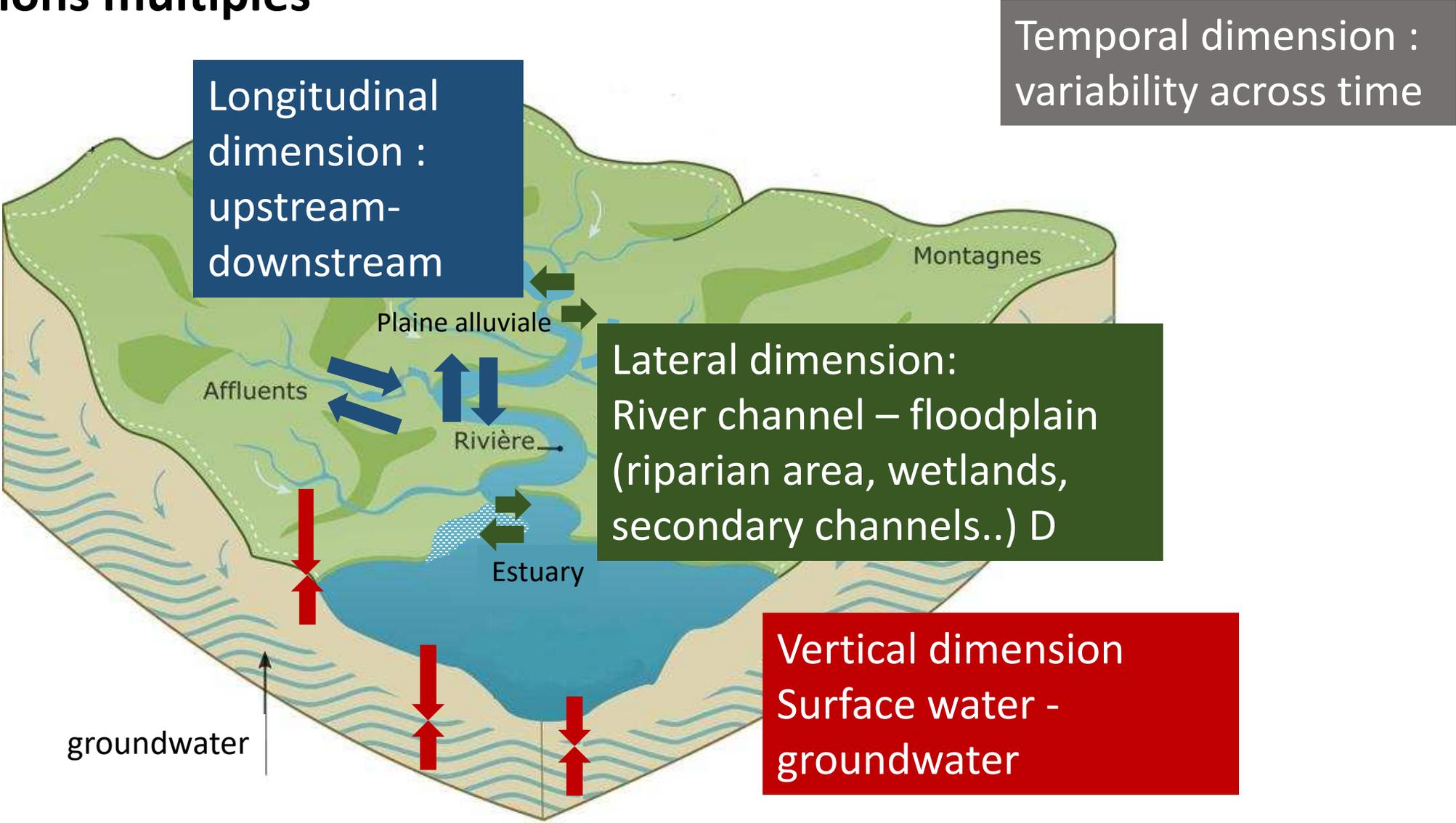


Franco Hydro Électricité

Parmi les 66 candidatures présentées le 3 juin aux Trophées de l'eau 2015 de l'agence de l'eau Loire-Bretagne, plusieurs concernaient l'effacement d'ouvrages hydrauliques pour restaurer la continuité écologique des cours d'eau. Ces effacements se font souvent dans un contexte de négociations difficiles. Les lois Grenelle prévoyaient que 2 000

Continuité écologique : de quoi parle-t-on ?

Les dimensions multiples



Continuité écologique : de quoi parle-t-on ?

Flux et processus (dynamiques) de bassins concernés

Fluxes

Water flow



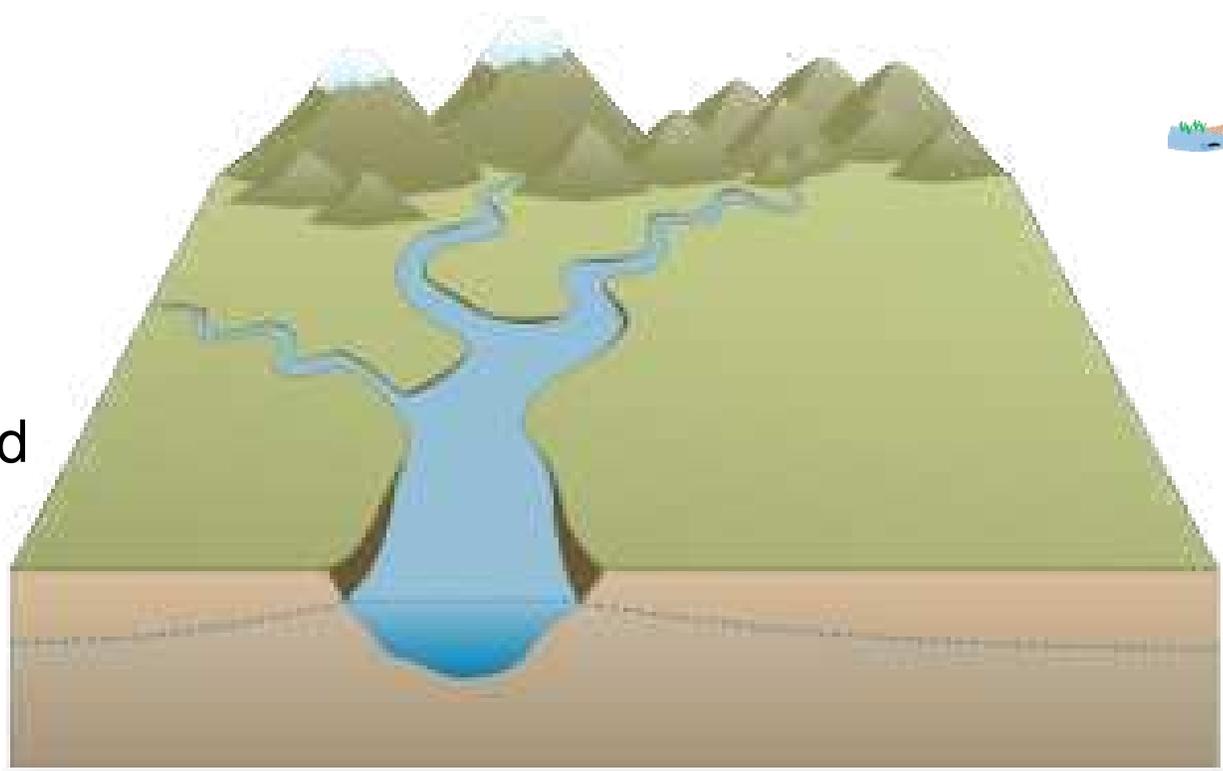
Flow of matter

Sediments
Suspended and diluted matter



Biological fluxes

Organisms
Genes
Organic matter



Patterns in space and time

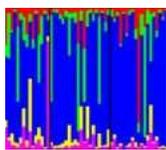


River morphology,
hydraulic and thermal
habitat distribution

Biogeochemical
processes



Organism community
structure



Distribution and genetic
structure of populations

Continuité écologique : de quoi parle-t-on ?

Enjeux écologiques



Continuité écologique : de quoi parle-t-on ? usages et loisirs



Continuité écologique : de quoi parle-t-on ?

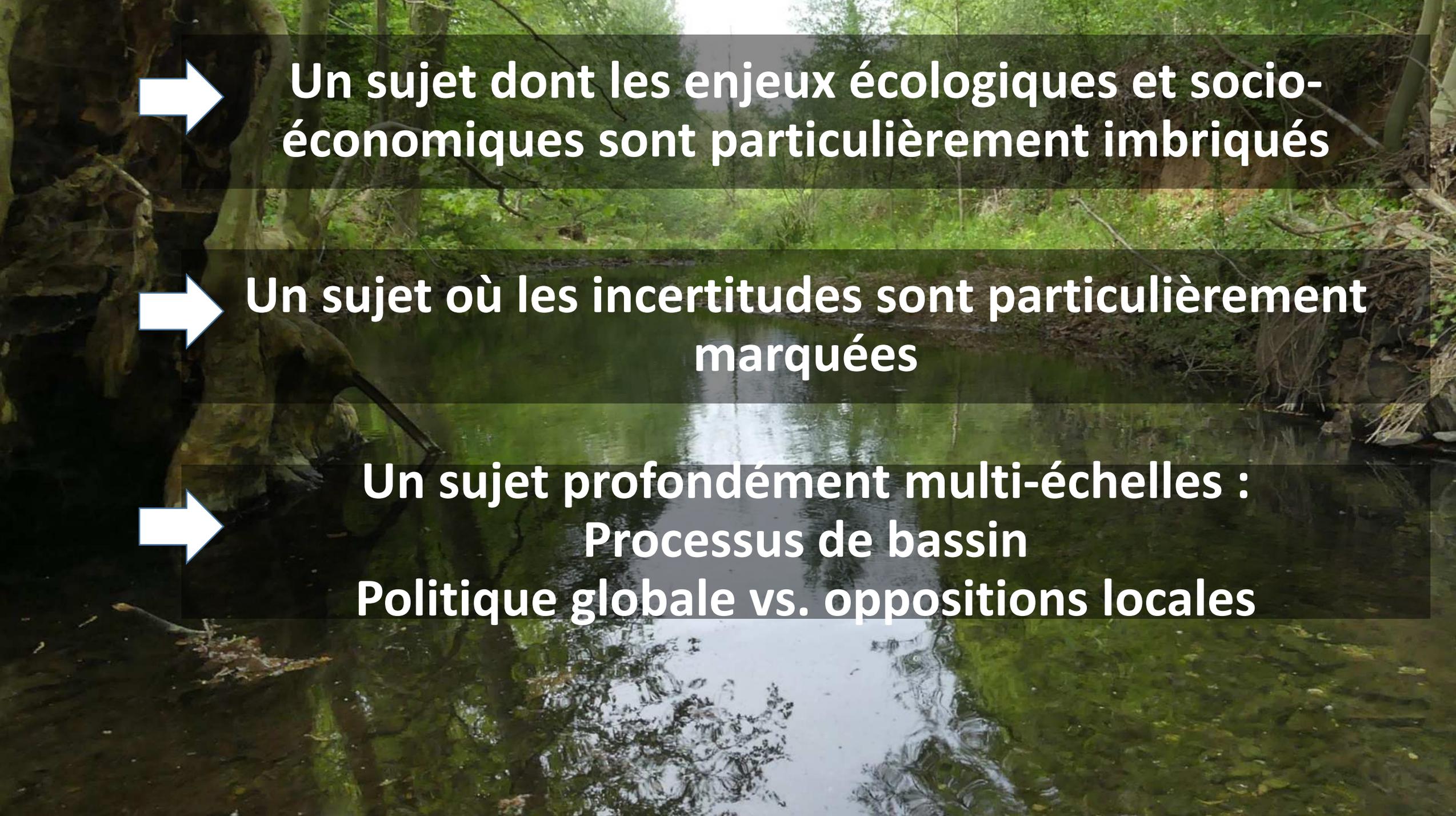
Risques



Continuité écologique : de quoi parle-t-on ?

Perceptions et valeurs

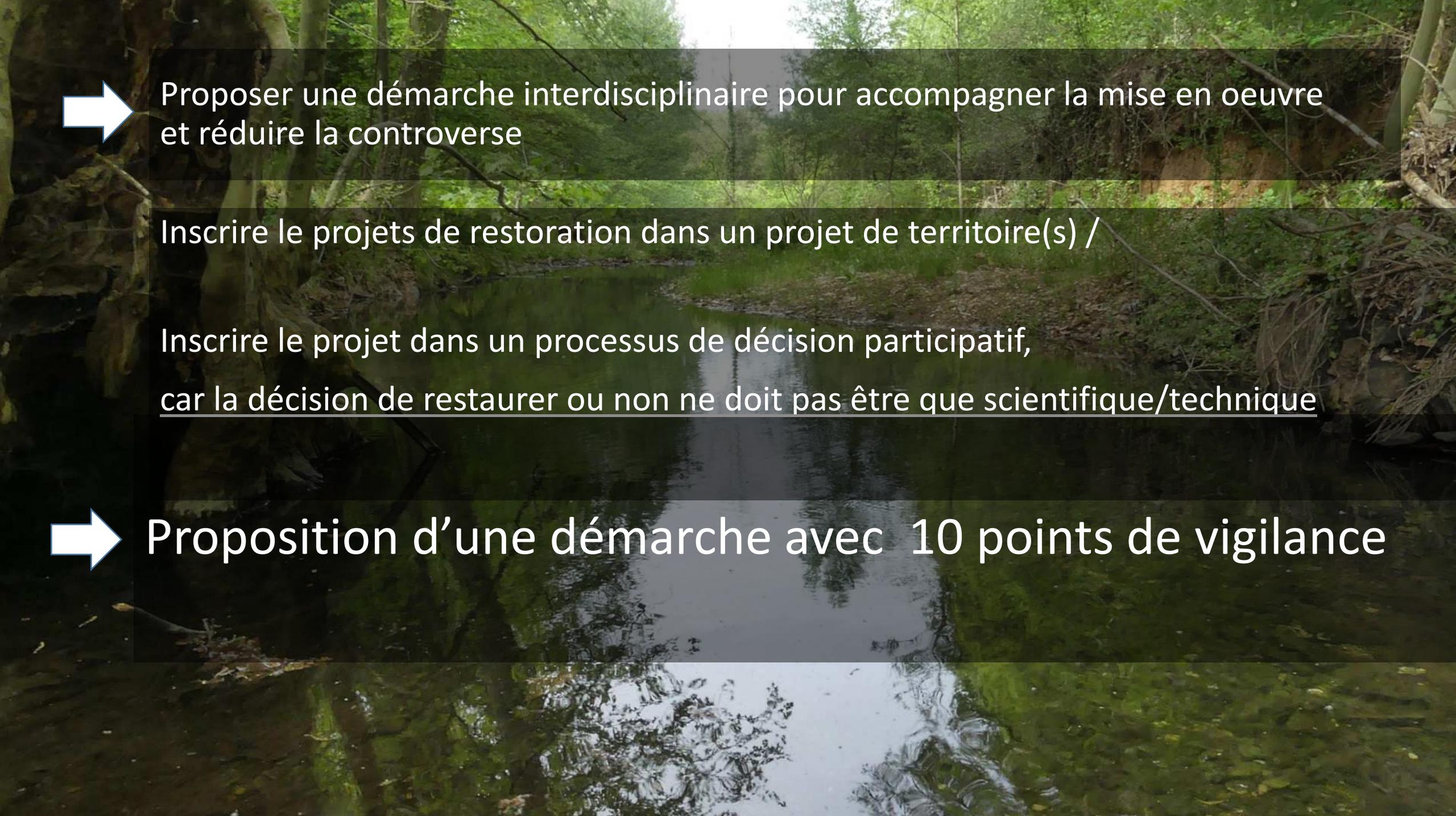




Un sujet dont les enjeux écologiques et socio-économiques sont particulièrement imbriqués

Un sujet où les incertitudes sont particulièrement marquées

**Un sujet profondément multi-échelles :
Processus de bassin
Politique globale vs. oppositions locales**



➔ Proposer une démarche interdisciplinaire pour accompagner la mise en oeuvre et réduire la controverse

Inscrire le projets de restoration dans un projet de territoire(s) /

Inscrire le projet dans un processus de décision participatif,
car la décision de restaurer ou non ne doit pas être que scientifique/technique

➔ Proposition d'une démarche avec 10 points de vigilance

Etapes de la démarche territoriale

A : Diagnostic du territoire

- Biophysique et socio-économique
- Réalisé à différentes échelles spatio-temporelles

B : Co-construction du projet de gestion

- Formulation des objectifs et des scénarios alternatifs
- Concertation sur le choix de restaurer ou pas, puis concertation sur les scénarios techniques

C : Mise en œuvre des actions

Projet de restauration

- Mise en œuvre des suivis pour évaluer l'état initial et les effets par rapport aux objectifs
- Mise en œuvre de l'opération

Points de vigilance liés à un projet de restauration en réflexion

PV1 : Acquérir une connaissance de l'histoire du territoire

PV2 : Identifier le **périmètre territorial** avec une **hiérarchisation** entre les sites les plus pertinents comme cibles d'action

PV3 : Identifier, pour la réalisation du projet de restauration **les sources d'incertitude, les freins et les leviers**. Si nécessaire, traiter en premier lieu d'autres pressions sur le milieu.

PV4 : Identifier les **acteurs institutionnels** concernés, **les représentants des différents acteurs du territoire** et **les interlocuteurs locaux clefs**

PV5 : **Impliquer** très en amont les acteurs clefs identifiés lors du diagnostic dans la co-construction des scénarios

PV6 : **Communiquer sur les limites et les incertitudes** associées aux différents scénarios techniques proposés

PV7 : Définir un **cadre spatio-temporel de suivi adapté aux objectifs** et démarrer les suivis plusieurs années avant l'opération

PV8 : Choisir des **protocoles de suivi standardisés**, inclure l'évaluation participative

PV9 : Choisir la **temporalité de l'opération de la restauration** par rapport aux calendriers biologique et politique et par rapport aux autres mesures de gestion

PV10 : Impliquer les acteurs concernés et communiquer sur le projet à toutes les étapes



Exemple Sélune



- Communication incomplète avec les riverains
- -> grande peur de la friche
- -> fort mouvement local anti-suppression des deux barrages
- (les gestionnaires passent complètement à côté de l'attachement des riverains au lac de la retenue: les cabanons des pêcheurs, l'économie de tourisme autour de ce lac, la pêche des poissons blancs)
- Germaine et al., 2019 <https://journals.openedition.org/paysage/569>



Bras de contournement
d'un plan d'eau La
Bazouge-de-Chémeré,
France
Syndicat de Bassin entre
Mayenne et Sarthe

Projet Rhonergia
(Rhône, 2024)

Exemples de Communication sur scénarios



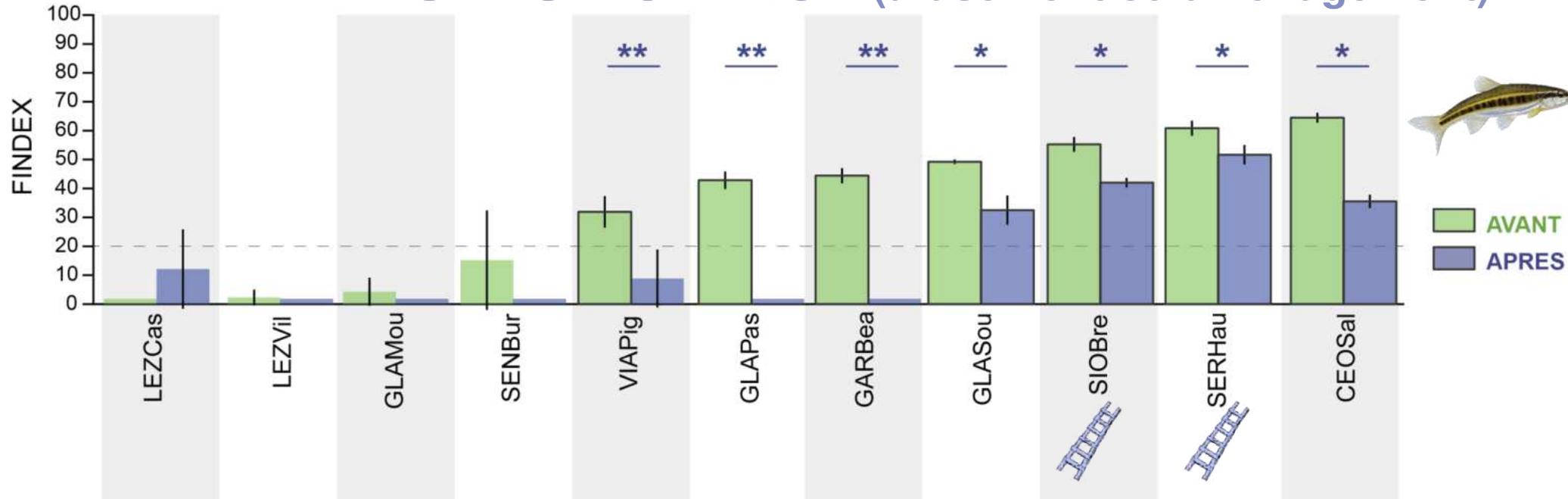
Le FINDEX : 11 cas d'étude sur le vairon (*Phoxinus phoxinus*)



(d'après J. Prunier et al., 2023, Conservation Letters, DOI: 10.1111/conl.12939)

-> Un exemple de suivi écologique de la suppression des seuils par une approche génétique

APRES RESTAURATION (arasement ou aménagement)



Diagnostic, planification et évaluation

We thank:

Simon Blanchet, Hervé Capra, Olivier Dézerald, Bertrand Morandi, Christophe Piscart, Josée Peress, Nicolas Poulet, Marlène Rolan-Meynard, Pierre Sagnes, Benoît Terrier and Anne Vivier for their participation in the literature search and discussions

Image sources:

- Xavier Seigneuret & le Syndicat de Bassin entre Mayenne et Sarthe; Mark David Thompson
- <https://ian.umces.edu/media-library>
- <https://thenounproject.com/>

Funding



Thank you for your attention!

Etapes de la démarche territoriale

Points de vigilance liés à un projet de restauration en réflexion

A : Diagnostic du territoire

- Biophys
- Réalisé
- tempore

B : Co-

- Formula
- scénario
- Concert
- ou pas,
- scénario

C : Mis

Projet

- Mise
- évaluer l'état initial et les effets
- par rapport aux objectifs
- Mise en œuvre de l'opération

PV1 : Acquérir une connaissance de l'histoire du territoire

PV2 : Identifier le **périmètre territorial** avec une **hiérarchisation** entre les sites les

Réflexions (qui serviront de conclusion !)

Cela n'est pas nouveau ... trop simple ? peut être utile néanmoins :

- Mise en contexte et check-list « courte »
- La check-list est très rarement suivie en pratique

Conceptuel, trop compliqué ? A priori non :

- Les moyens / temps peuvent être adaptés pour chaque point
- Ainsi, penser « global » ne freine pas l'action, mais évite les écueils

Méthode : utilité de la combinaison :

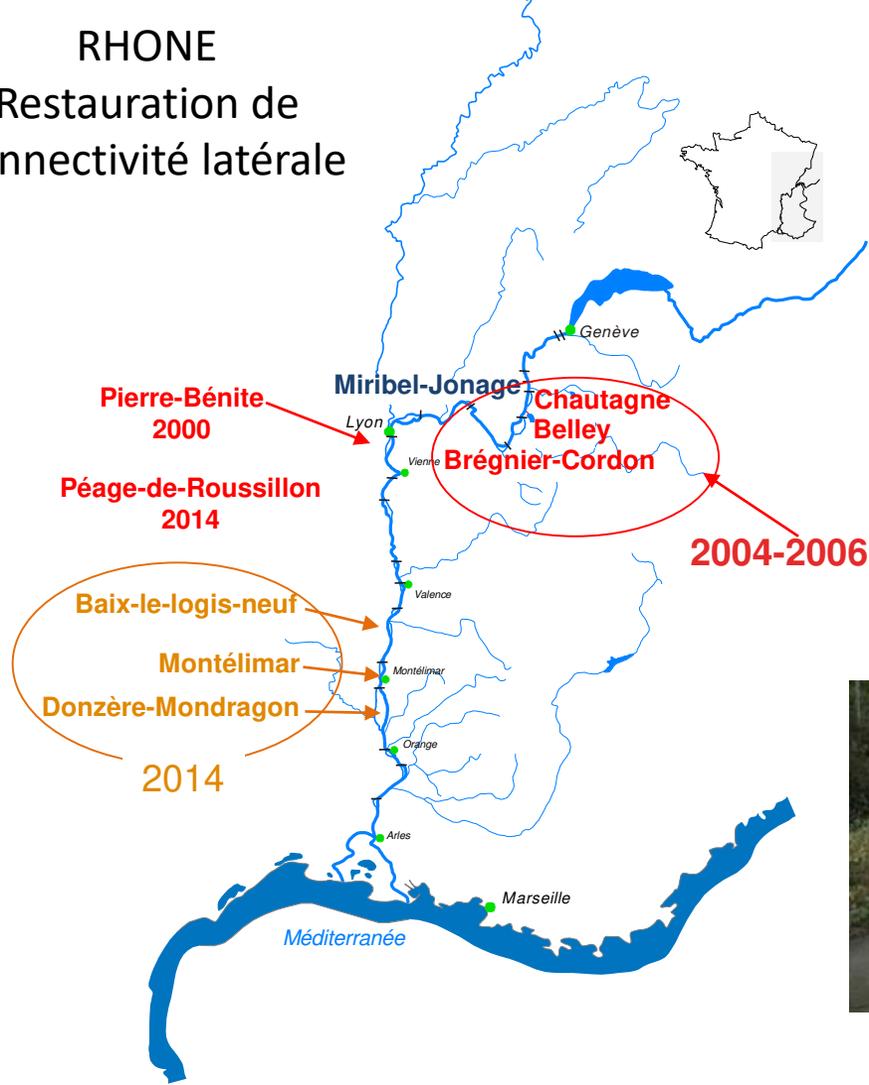
« **démarche + outils** pour comparer des **scénarios** d'action »

PV9 : Choisir la **temporalité de l'opération de la restauration** par rapport aux calendriers biologique et politique et par rapport aux autres mesures de gestion

PV10 : Impliquer les acteurs concernés et communiquer sur le projet à toutes les étapes

RHONE

Restauration de Connectivité latérale



- 9 sites
- Plus de 40 bras secondaires restaurés
- Suivi > 30 ans, avant-après, test de prédictions
- co-construction forte



Lamouroux N., Gore J.A., Lepori F. & Statzner B. (2015) The ecological restoration of large rivers needs science-based, predictive tools meeting public expectations: an overview of the Rhône project. **Freshwater Biology**, 60, 1069-1084.



avant



après

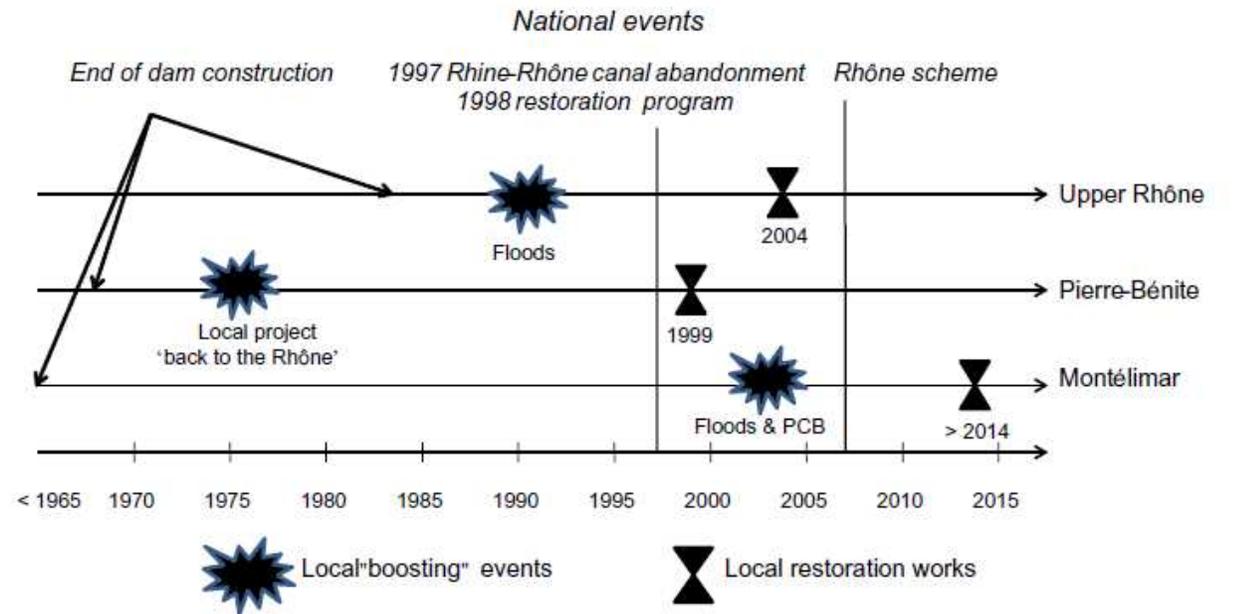
ESPACE NATURE
Îles & LÔNES
 du RHÔNE



smicelaid



Des individus motivés (champions)
 -> des syndicats communaux engagés
 Ex : une constante sur différents sites du Rhône



Rhône : la motivation locale s'est révélée plus forte que les approches top_down



Retrouver le Rhône « de notre enfance »
 Concilier « crues et environnement »



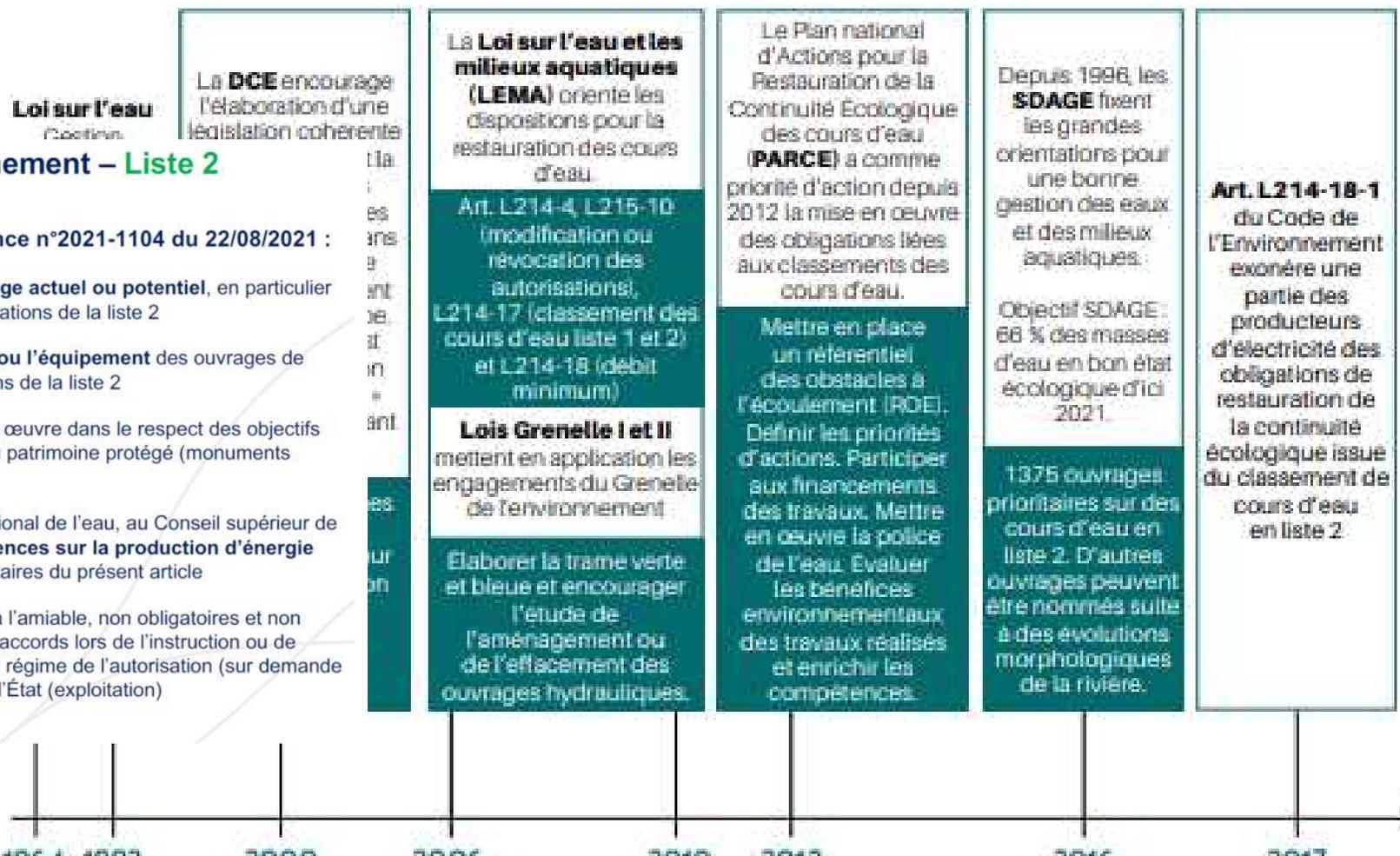
Un site olympique
 Un port international

CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Article L.214-17 du code de l'environnement – Liste 2

Dispositions introduites par la loi Climat-Résilience n°2021-1104 du 22/08/2021 :

- Pour tous les ouvrages, non remise en cause de l'**usage actuel ou potentiel**, en particulier aux fins de production d'énergie, pour remplir les obligations de la liste 2
- Pour les moulins à eau, seuls l'**entretien, la gestion ou l'équipement** des ouvrages de retenue peuvent être prévus pour remplir les obligations de la liste 2
- Les mesures en application de la liste 2 sont mises en œuvre dans le respect des objectifs de protection, de conservation et de mise en valeur du patrimoine protégé (monuments historiques, sites patrimoniaux protégés)
- À partir de 2022, bilan triennal transmis au Comité national de l'eau, au Conseil supérieur de l'énergie et au parlement pour l'**évaluation des incidences sur la production d'énergie hydraulique** des dispositions législatives et réglementaires du présent article
- **Article L.214-17-1 CENV** : processus de conciliation à l'amiable, non obligatoires et non contraignants, portés par un médiateur, en cas de désaccords lors de l'instruction ou de l'exploitation des installations hydrauliques relevant du régime de l'autorisation (sur demande des porteurs de projet (instruction, exploitation) ou de l'État (exploitation))



Note technique du 30 avril 2019 relative à la mise en œuvre du plan d'action pour une politique apaisée de restauration de la continuité écologique des cours d'eau 30 avril 2019

Adressée aux services de l'État et ses établissements publics, cette note technique détaille les modalités de mise en œuvre du plan d'action pour une politique apaisée de la restauration de la continuité écologique des cours d'eau.



➤ Approche intégrée biogéochimique, géographique et hydrologique pour déterminer les sources de contaminants sur des bassins versants d'usage mixte

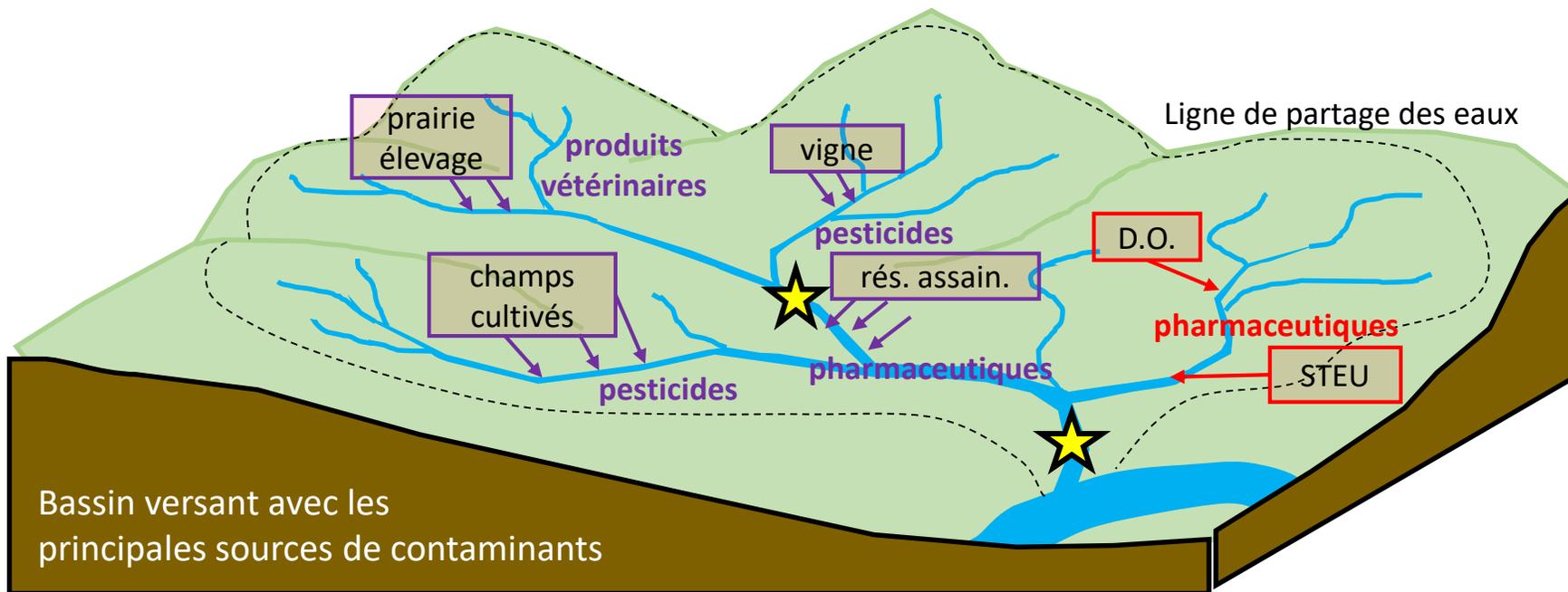
F. Branger, M. Masson, O. Grandjouan, M. Coquery

➤ Contexte : nombreuses sources de contamination dans les bassins versants méso-échelles à usage mixte

Les sources principales de contaminants :

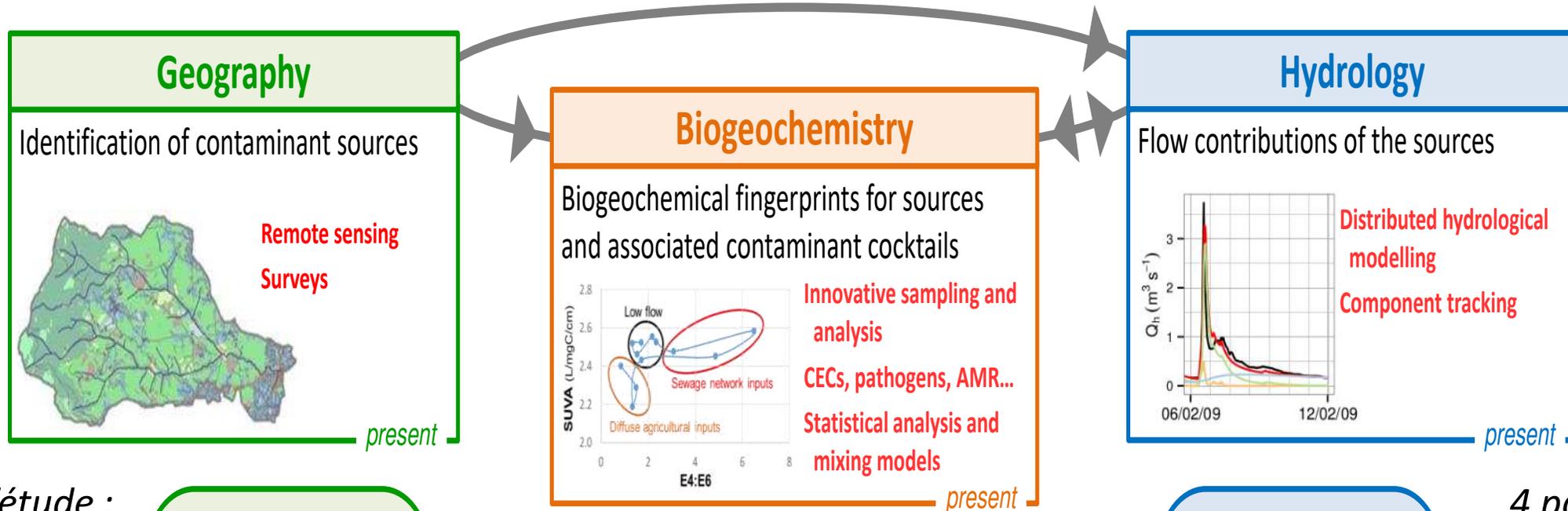
- > rejets domestiques / agricoles
- > rejets ponctuels / diffus
- + hétérogénéité spatiale sur ces bassins versants
- + fortes variations temporelles (hydrologie, saison, usages des produits)

=> Besoin d'identifier et quantifier les différents flux de pollution qui contribuent majoritairement à la dégradation de l'état de eaux à l'exutoire des bassins versants pour engager des actions de réduction des apports



Hypothèse : chaque source de contaminant possède une composition biogéochimique particulière liée à l'occupation des sols et aux pratiques. Par exemple, les cortèges microbiens peuvent renseigner sur l'origine de l'eau (espèces animales, ...)

➤ Approche intégrée biogéochimique, géographique et hydrologique pour déterminer les sources de contaminants sur des bassins versants d'usage mixte



2 sites d'étude :
BV Yzeron - OTHU (69)
BV Claduègne - OHMCV (07)

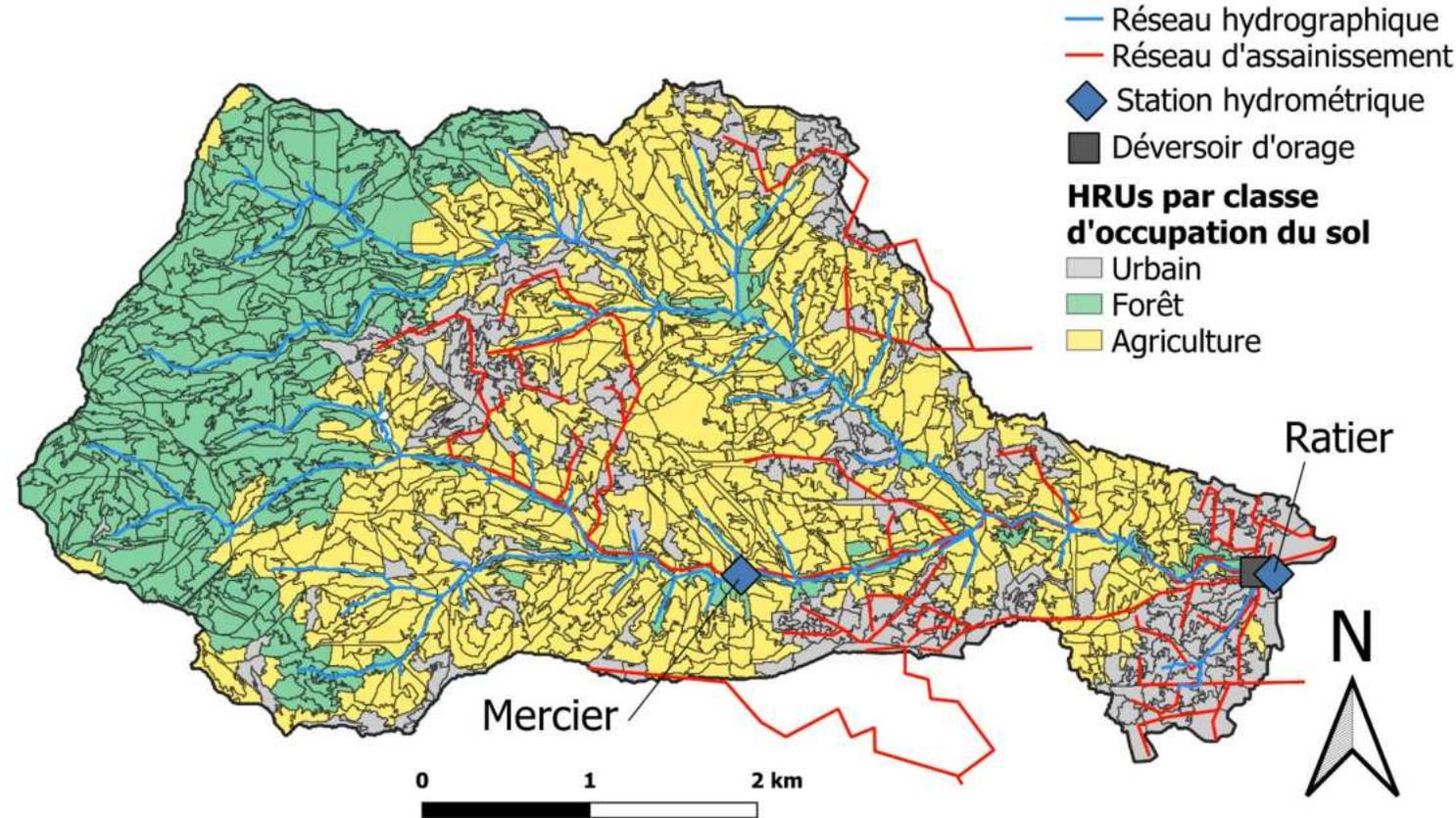
4 partenaires :
INRAE RiverLy
Univ Lyon 1 LEM
IRD-UGA IGE
UGA PACTE

Objectifs : identifier et caractériser les sources de contaminants (ponctuelles, diffuses) et prédire la qualité chimique et microbiologique des eaux à l'exutoire d'un bassin versant selon des scénarios futurs d'évolution (mutation de l'usage des sols, changement climatique)

➤ Outils disponibles : modèle hydrologique distribué J2000P

- Version péri-urbaine du modèle J2000 : prise en compte du réseau d'assainissement et des déversoirs d'orage
- Pas de temps **horaire**
- Maillage en unités de réponses hydrologiques (**HRU**)
- **Performance en débit** (période 2014-2023)

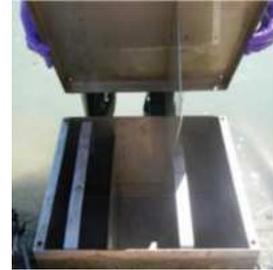
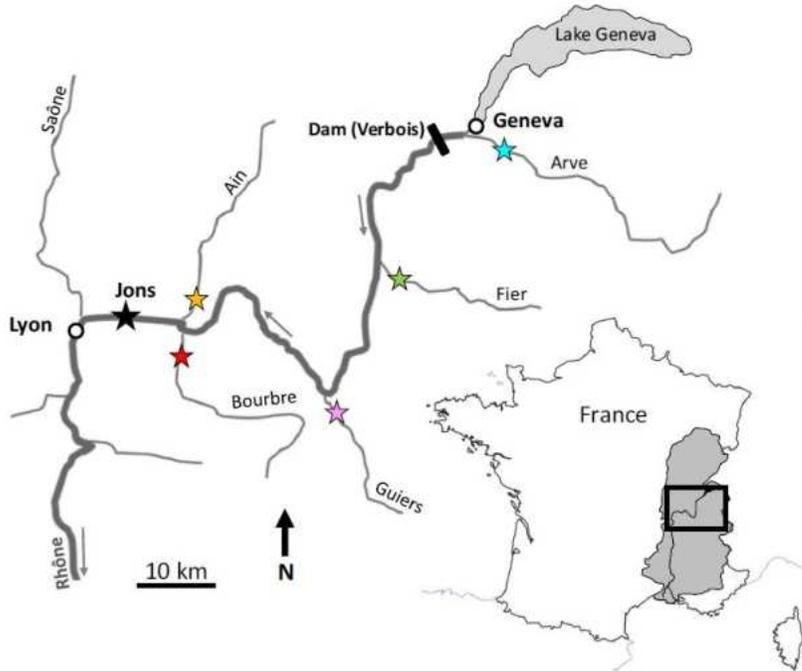
Critère	Mercier		Ratier	
	Horaire	Journalier	Horaire	Journalier
Biais	-12	-12	6	6
NSE	0.54	0.63	0.58	0.64



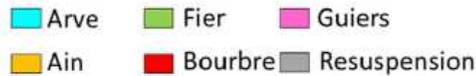
Mais obtient-on les « bonnes réponses pour les bonnes raisons » ?
(Kirchner, 2006)

➤ Outils disponibles : modèle de mélange géochimique

Modèle de mélange développé principalement au LAMA pour estimer les contributions des MES à l'échelle des affluents du Rhône



Bassin versant du Haut-Rhône



Crue sur le Fier



Chasse de barrage

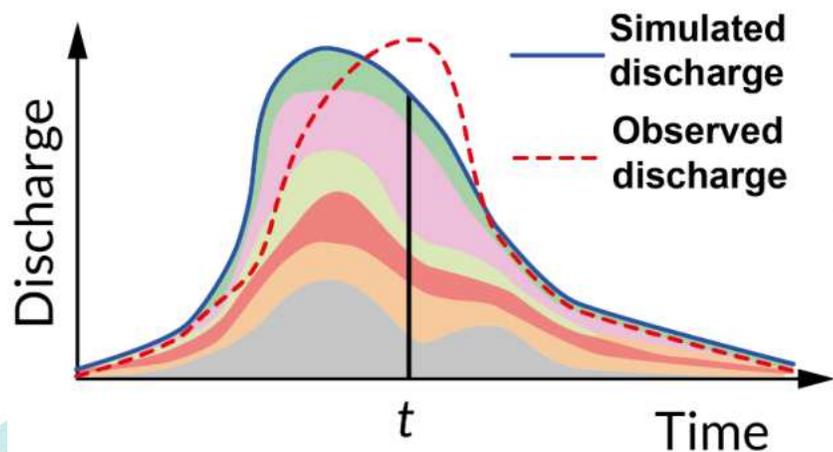
Dabrin et al., Journal of Soils and Sediments, 2021

➤ Méthodologie de travail

Aspect hydrologie

Module de décomposition spatiale du débit

Décomposition du débit par J2000P-Ratier



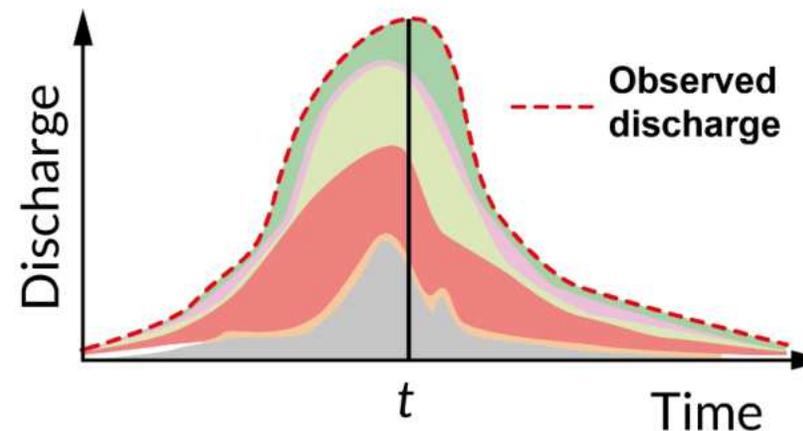
Aspect biogéochimie

Prélèvements des sources

Prélèvements des évènements

Modèle de mélange

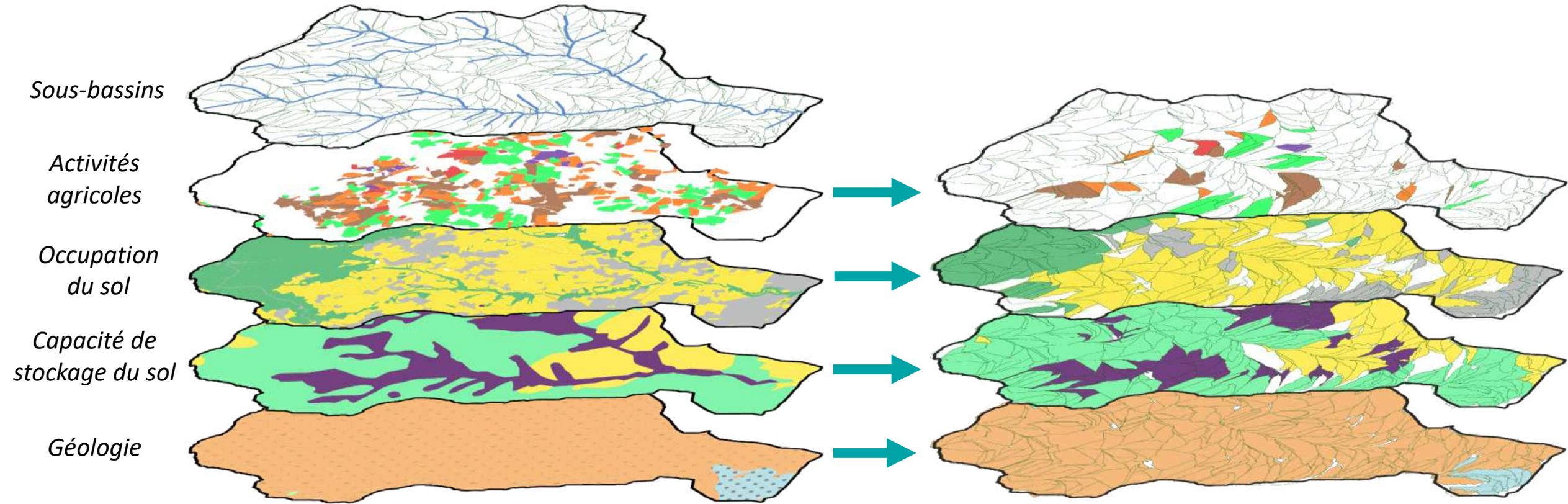
Décomposition biogéochimique du débit



VS

Modélisation hydrologique + biogéochimie

➤ Identification des sources - Méthodologie



Sélection des sous-bassins homogènes

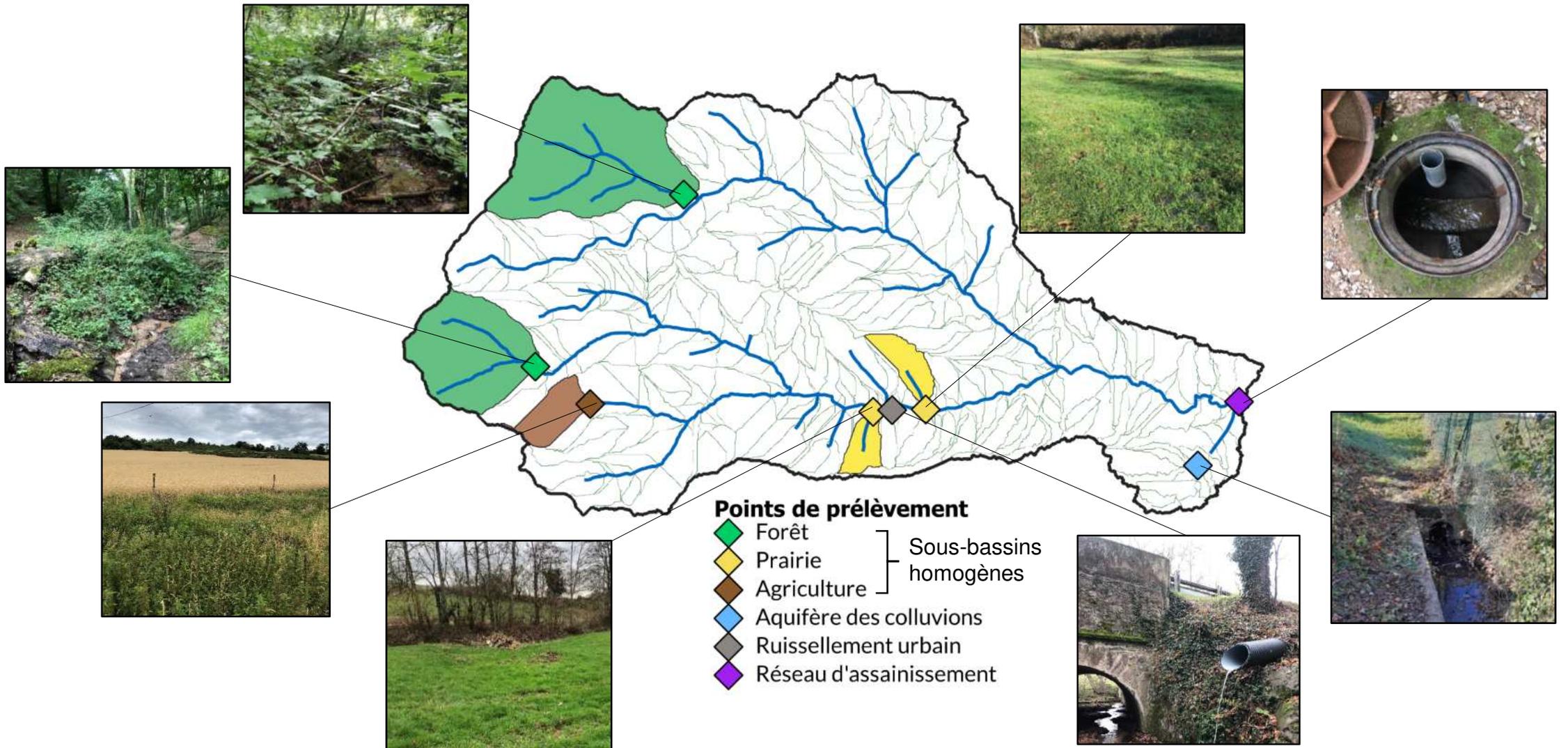


INRAE

Approche intégrée biogéochimique, géographique et hydrologique pour déterminer les sources de contaminants sur des bassins versants d'usage mixte

Plénière RIVERLY - 09/12/2024

➤ Identification et prélèvements des sources



6 sources identifiées et échantillonnées dans différentes conditions hydrologiques et météorologiques

➤ Identification et prélèvements des événements



Station du Mercier



Station du Ratier

Type	Évènement prélevé	Cumul de pluie (mm)	Pic de débit Ratier (L/s)
Petit événement hivernal	Mars 2019	7	125
	Mars 2023	18	450
Évènement orageux estival	Juin 2022	57	420
	Septembre 2022	9	460
Évènement majeur	Mai 2021	92	2 500
	Octobre 2021	89	1 125

6 événements hydrologiques échantillonnés selon 3 types d'événements différents
Prélèvements par temps sec

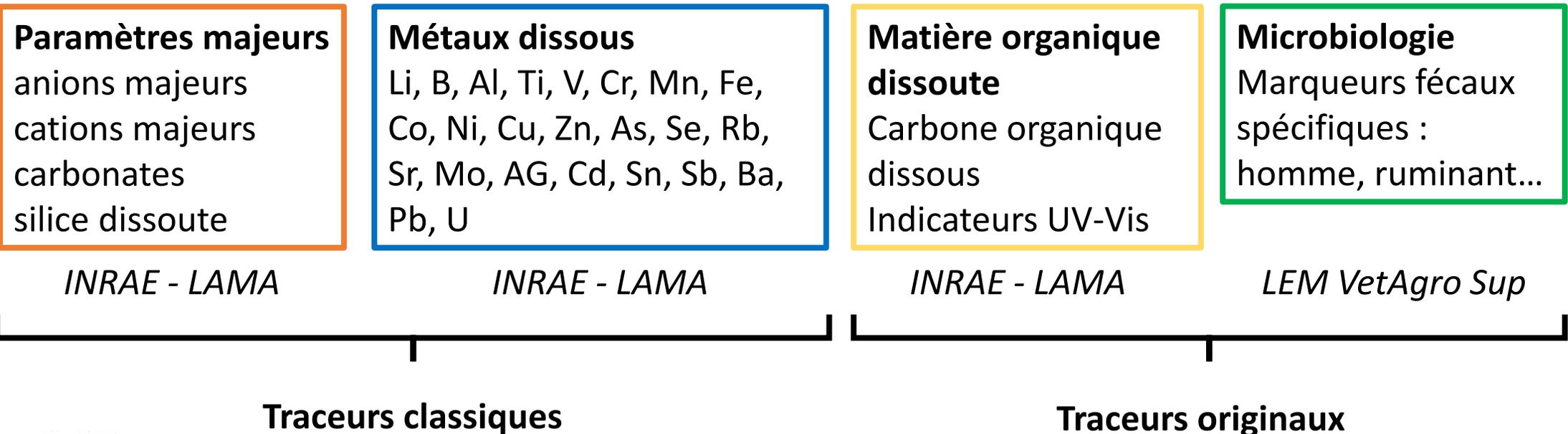


➤ Analyse des échantillons obtenus

Au total :

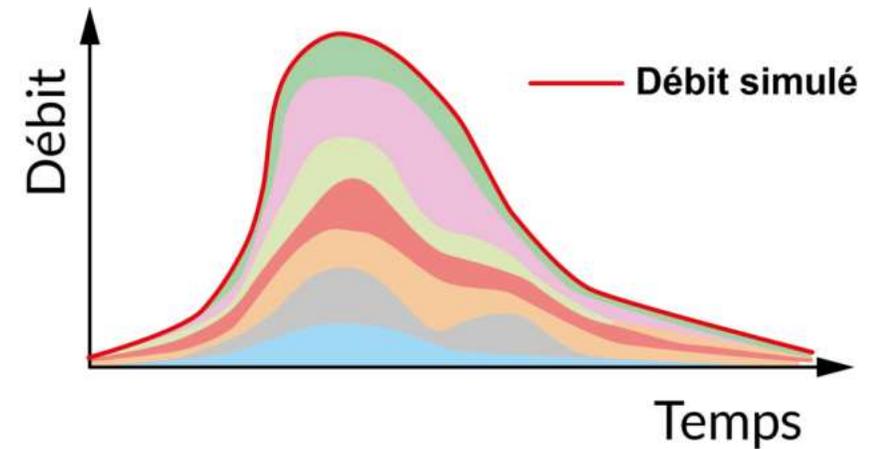
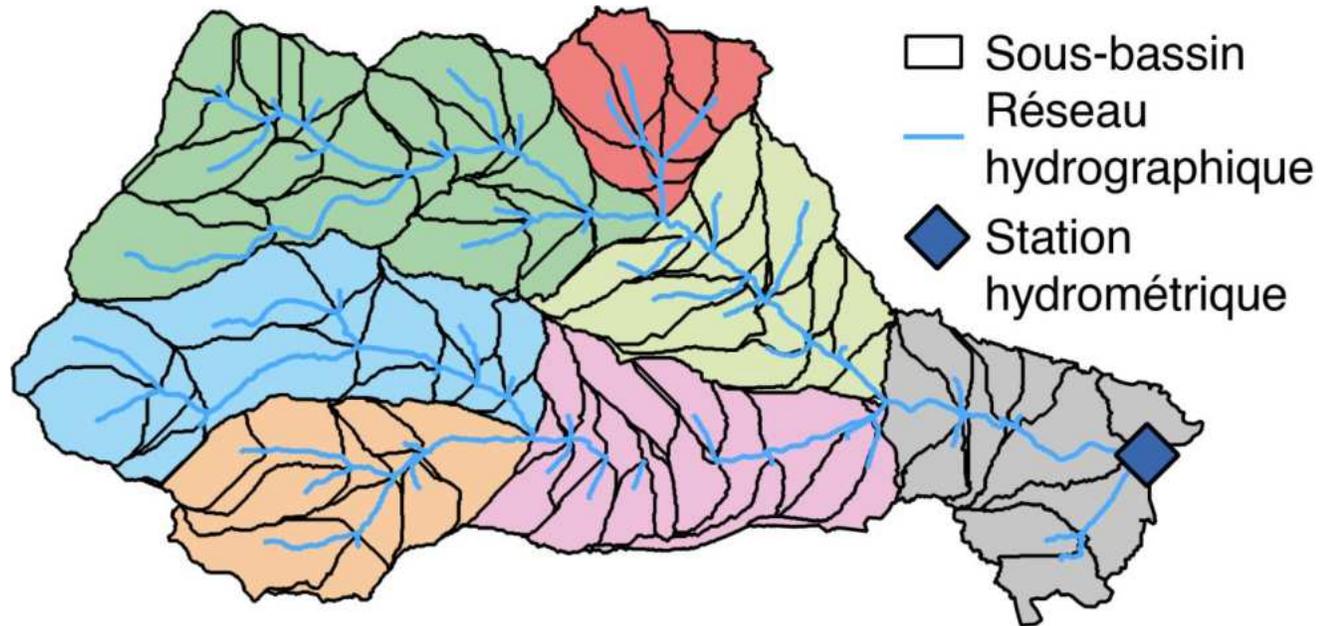
- 44 échantillons de sources
- 126 échantillons de mélange pour les événements
- 49 échantillons de mélange par temps sec

**Base de données de plus de
20 000 paramètres**

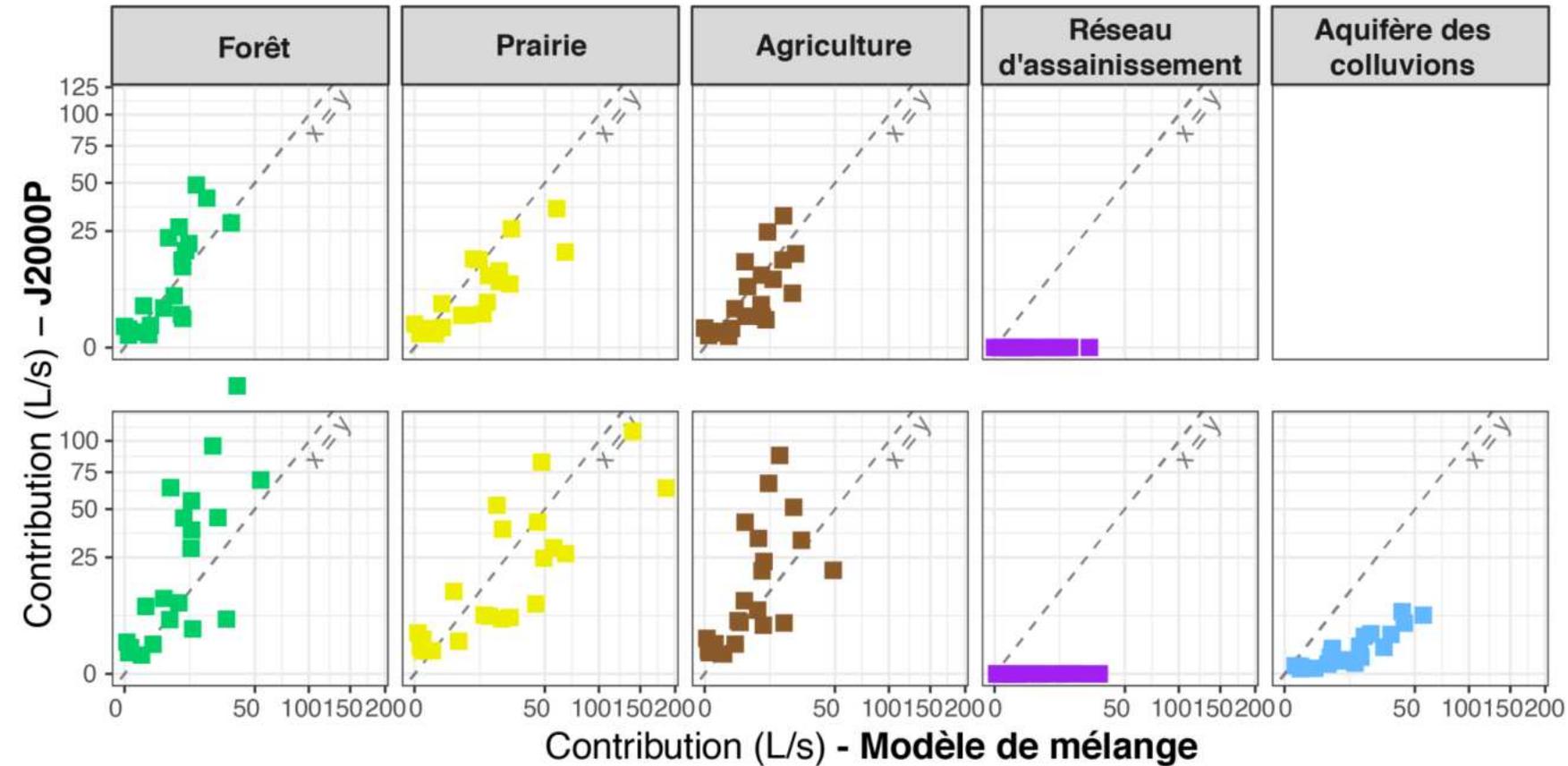


➤ Développement de J2000P

- Développement d'un module de décomposition spatiale (traçage de la contribution de chaque brin de rivière)



➤ Résultats - Comparaison des contributions par temps sec



Simulations Mercier plus cohérentes que Ratier

Sous-estimation pour le réseau d'assainissement

=> Pas de transfert des eaux usées par temps sec

Sous-estimation pour l'aquifère des colluvions

=> Réserves souterraines des colluvions mal définies



INRAE

Approche intégrée biogéochimique, géographique et hydrologique pour déterminer les sources de contaminants sur des bassins versants d'usage mixte

Plénière RIVERLY - 09/12/2024

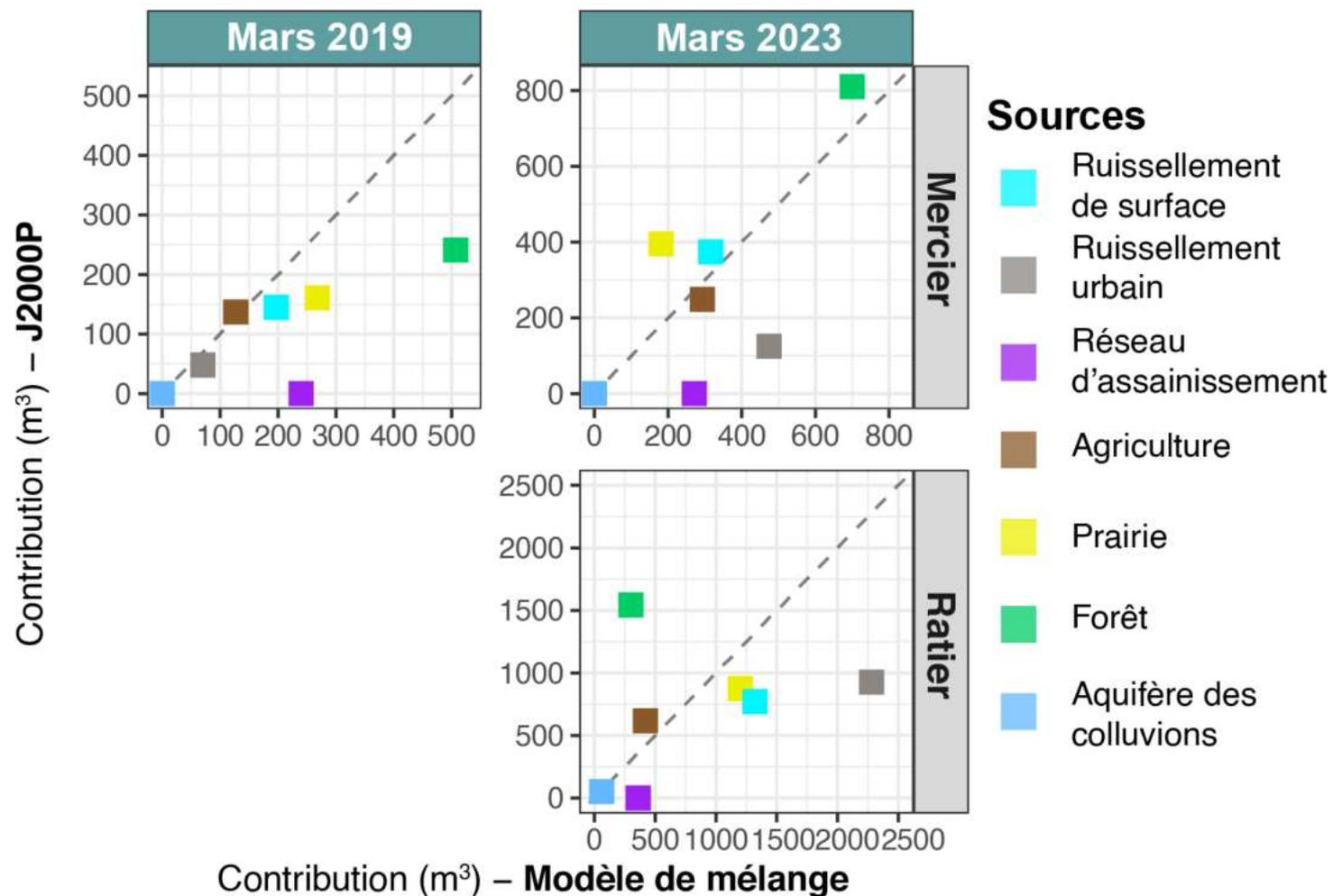
➤ Résultats - Comparaison des contributions pour les événements

Petits événements hivernaux

Contributions cohérentes pour forêt, prairie, agriculture et ruissellement de surface

Sous-estimation par J2000P pour le réseau d'assainissement

=> Pas de débordement du réseau simulé



INRAE

Approche intégrée biogéochimique, géographique et hydrologique pour déterminer les sources de contaminants sur des bassins versants d'usage mixte

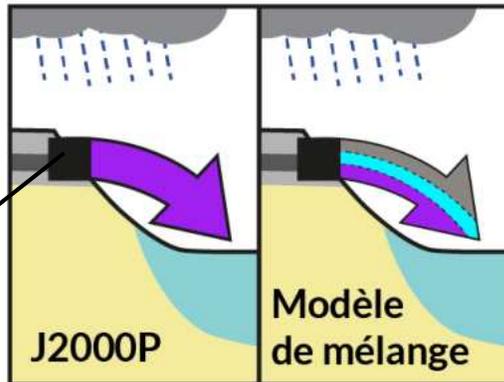
Plénière RIVERLY - 09/12/2024

➤ Résultats - Comparaison des contributions pour les événements

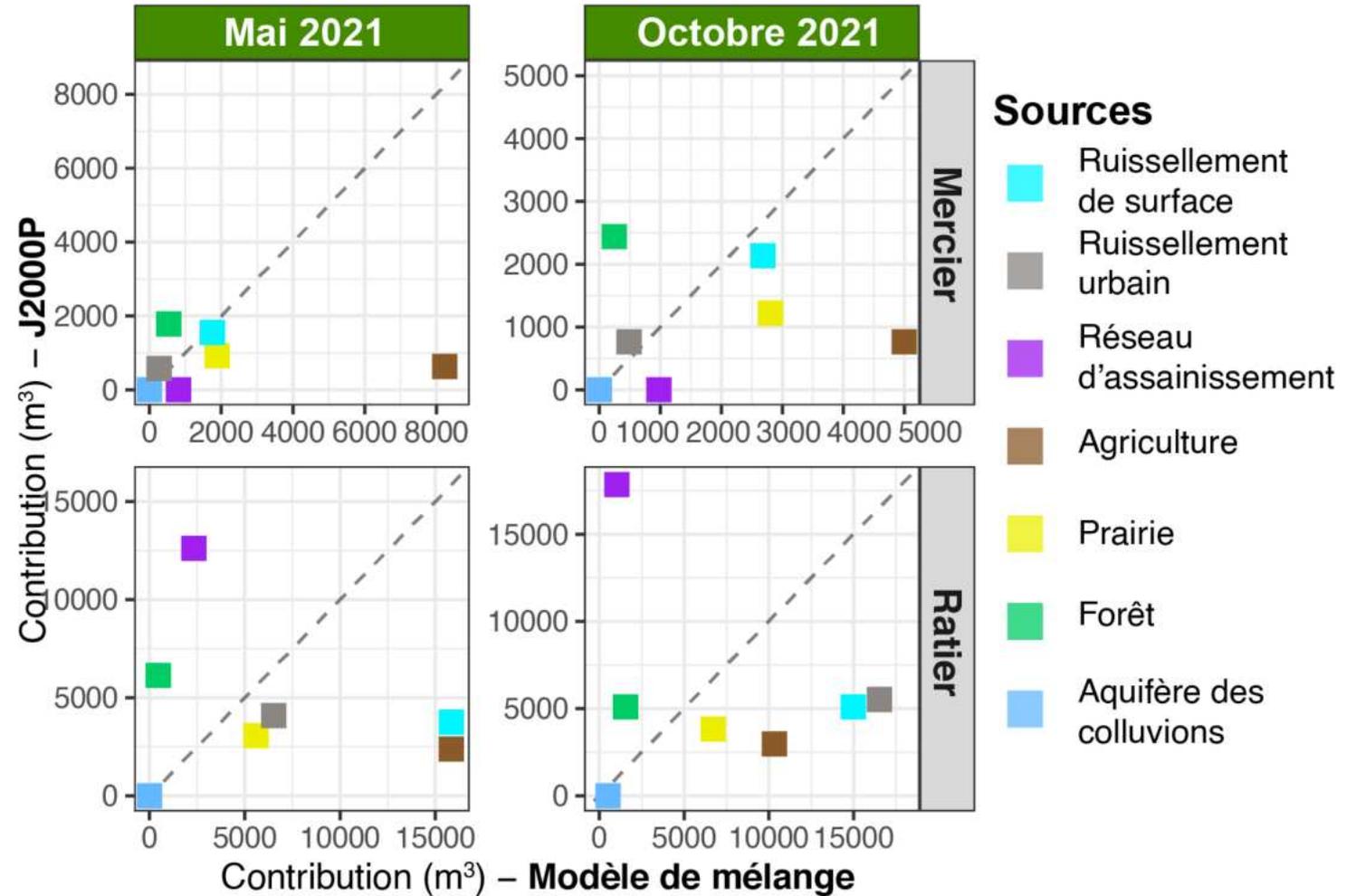
Événements majeurs

Sur-estimation par J2000P pour le réseau d'assainissement sur le Ratier

=> Différence de définition pour la contribution du réseau d'assainissement



Mais aussi surestimation du volume d'eau partant dans le réseau



➤ Apports de l'interdisciplinarité

- Pour l'hydrologie
 - Meilleure compréhension des écoulements dans le bassin versant
 - Mise en avant des forces et des faiblesses du modèle J2000P et recommandations d'amélioration

- Pour la biogéochimie
 - Visualisation des limites du modèle (approximations faites dans la définition des sources)
 - Amélioration du modèle (meilleure définition des sources)

- Exploration plus fine des liens entre qualité (biogéochimie) et nature des écoulements (surface / souterrain, occupation du sol)
- Projection de qualité de l'eau dans le futur (métaux, contaminants organiques)



> Perspectives

- Eaux souterraines
 - Temps de trajet et temps de résidence, isotopes de l'eau

- Etude de la variabilité des empreintes selon le trajet de l'écoulement
 - Ruissellement de surface, écoulement de subsurface



INRAE

RiverLy

➤ Les produits de transformation : de l'identification aux effets

Christelle MARGOUM et Arnaud CHAUMOT pour
les équipes LAMA, Ecotox, EMA, Polldiff



Appel à projets de recherche 2019
« Produits phytopharmaceutiques : de
l'exposition aux impacts sur la santé
humaine et les écosystèmes »



➤ **TAPIOCA (2021-2024):**
Caractériser l'exposition chronique aux produits de
transformation des produits phytopharmaceutiques et
leurs effets écotoxiques dans les milieux aquatiques



Equipes LAMA, Ecotox, EMA, Polldiff

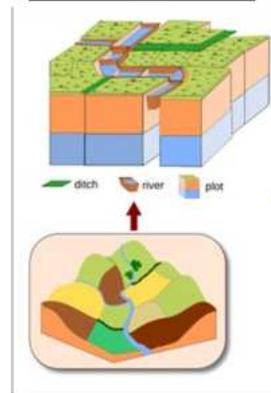
➤ Contexte : devenir et impact des produits phytopharmaceutiques (PPP)



-> peu de connaissances sur la nature, la présence et les impacts des produits de transformation (TP) des produits phytopharmaceutiques (PPP)

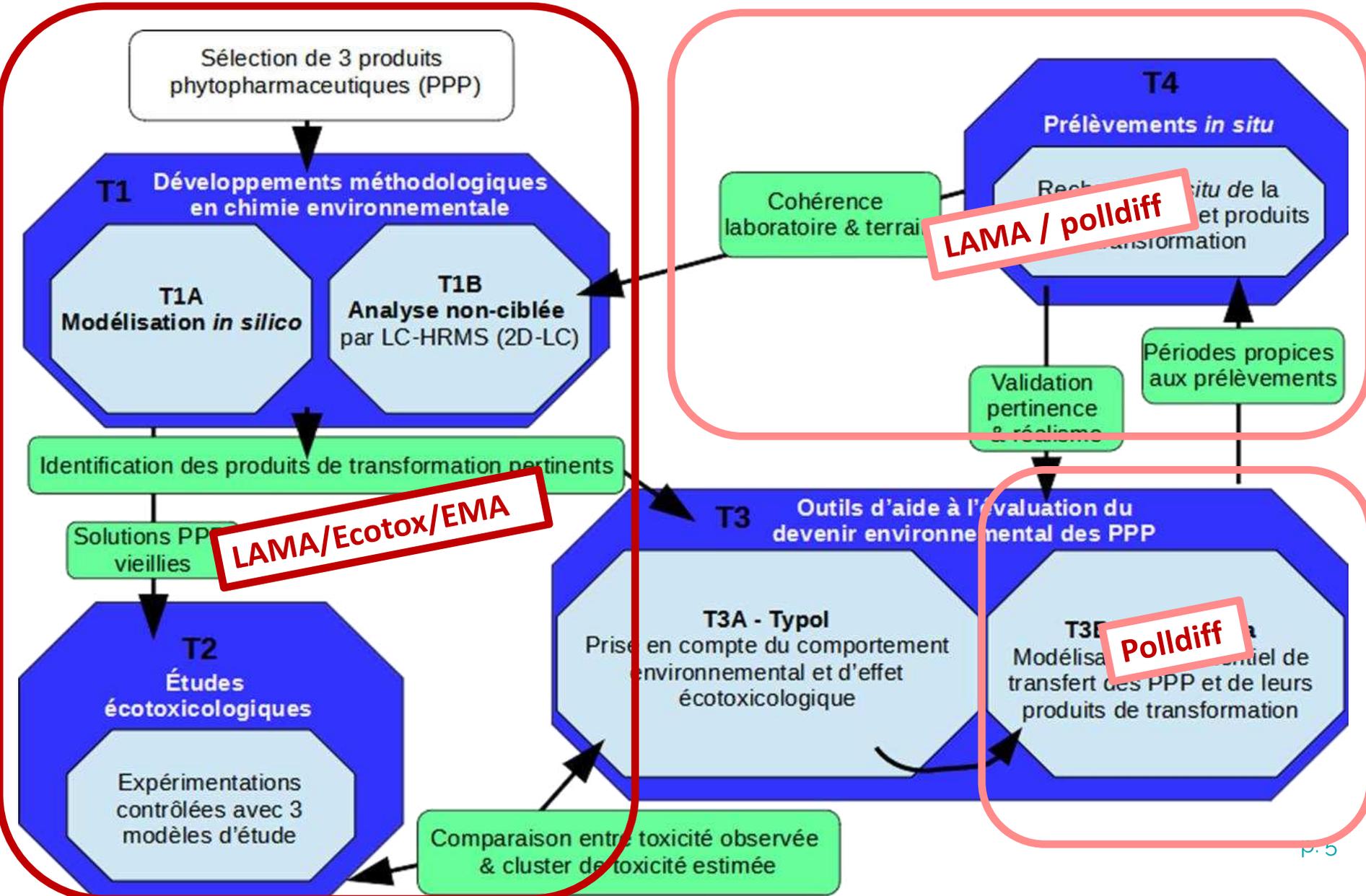
➤ Hypothèses et objectifs de TAPIOCA

- 1. les TP sont nombreux** et présents en faible quantité dans l'eau
 - développer des stratégies et méthodes d'analyses pour détecter et identifier les TP de PPP
- les TP ont un **potentiel écotoxique, éventuellement différent** de leur molécule mère
 - évaluer les effets de PPP et TP associés sur les communautés microbiennes et les macroinvertébrés aquatiques
- 3. l'apparition des TP évolue dans le temps** en fonction de la molécule mère et de l'environnement
 - tester l'apport d'outils de prédiction des propriétés de dissipation et de transferts de TP de PPP



Couplages d'approches analytiques, écotoxicologiques et de modélisations pour améliorer les connaissances sur les TP

➤ Organisation du projet TAPIOCA/implication RiverLy



➤ Pesticides et TP testés

Sélection de 3 pesticides :

Fenoxycarbe	Terbuthylazine	Tébuconazole	+/- glyphosate
insecticide	herbicide	fongicide	contaminant ubiquiste

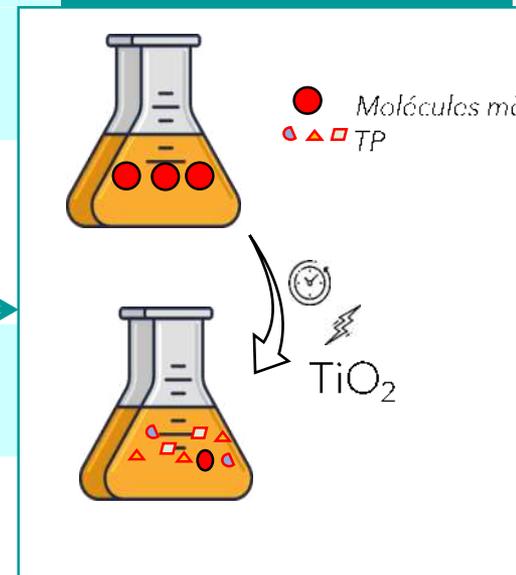
+ leurs TP :

quelques produits commercialement disponibles

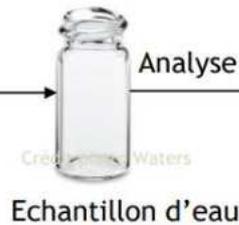
	Terbuthylazine-2-hydroxy	Tebuconazole-hydroxy	AMPA
	Terbuthylazine-desethyl		

ou obtenus par photodégradation contrôlée
=> solutions de pesticides « vieillis »

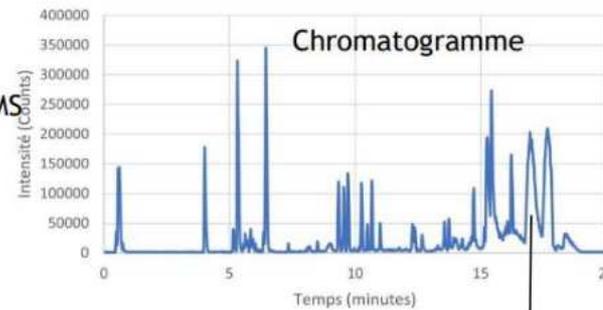
Fenoxycarbe vieilli	Terbuthylazine vieillie	Tebuconazole vieilli
---------------------	-------------------------	----------------------



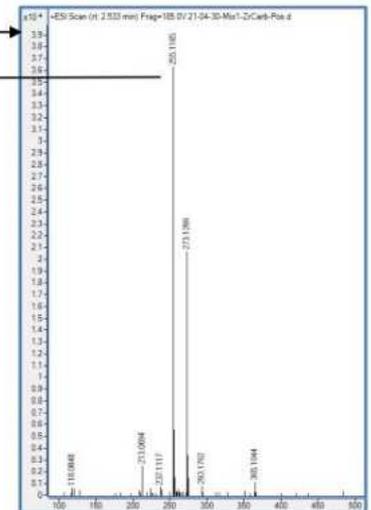
➤ Analyse des PPP et TP par chromatographie couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (LC-HRMS)



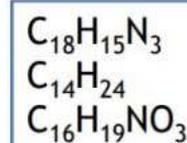
Analyse par LC-HRMS



Pour chaque pic, un spectre de masse



Pour chaque masse mesurée, une ou plusieurs formules brutes (selon la résolution du spectromètre de masse)



➤ Stratégie analytique de recherche et d'identification de TP inconnus

Thèse K. Rocco, 2023



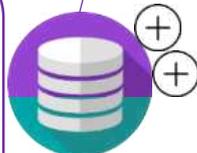
1/ Outils de prédictions *in silico*
-> construction de BDD de TP

2/ Analyse non ciblée de l'échantillon par LC-HRMS



Dégradation
(schémas réactionnels)

Liste de TP potentiels
= 291 pour tébuconazole,
23 pour terbuthylazine et
11 pour fenoxycarbe

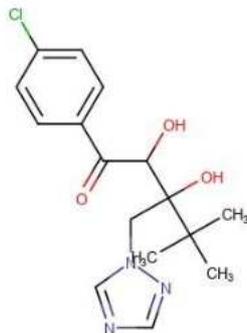


+ Rétention chromatographique

+ Fragmentation MS



Analyse SUSPECTÉE



TP 106
(tébuconazole)

... + confirmation avec le standard analytique



➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques

 ➤ Une approche multi-espèces en conditions contrôlées



Approche expérimentale au laboratoire pour mettre en évidence des relations de cause à effets



7 à 20 jours

18 jours

4h à 28 jours

➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques

CONTRÔLE DES CONDITIONS D'EXPOSITION

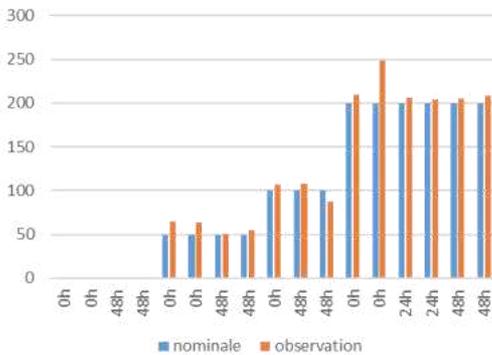
Protocole exposition

- Témoin + 3 concentrations (4 réplicats) : 50 / 100 / 200 µg/L , 14 jours (7+7 = 2 tests)
- Solution vieillie: four UV 1h (titane + filtration)
- Semi-statique - Renouvellement tous les 48h

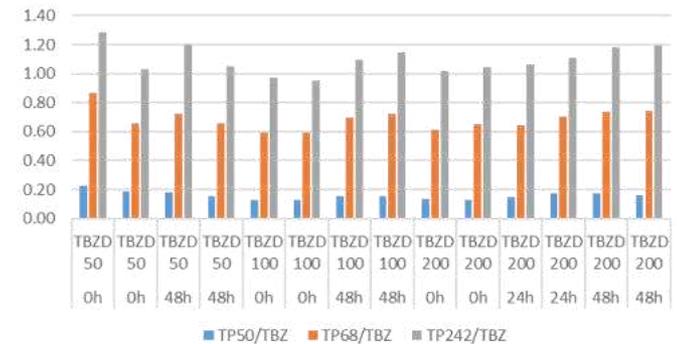
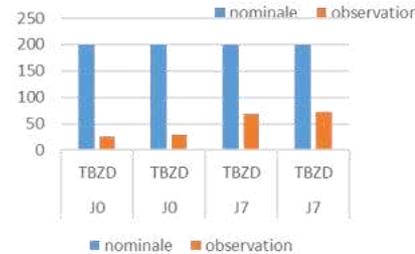
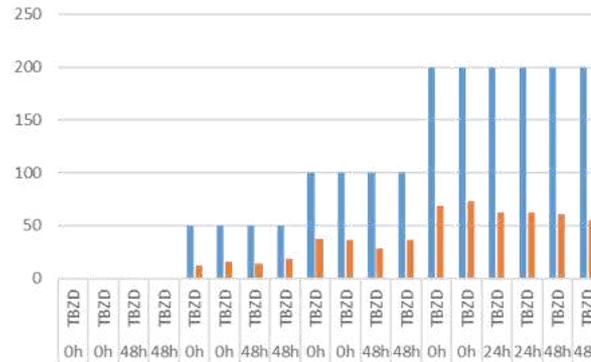


Exposition: stabilité

TEBUCONAZOLE manip 1



TEBUCONAZOLE / degradation manip 1



➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques



▶▶ La dégradation des produits phyto-sanitaires modifie-t-elle leur toxicité envers les organismes cibles ?



	Fenoxycarbe <i>vieilli</i>	<p style="text-align: center;">?</p>		
	Tebuconazole <i>TP : tebuconazole-OH</i>		<p style="text-align: center;">?</p>	
	Terbuthylazine <i>vieilli ou TP</i>			<p style="text-align: center;">?</p>

➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques



La **dégradation** des produits phyto-sanitaires modifie-t-elle leur toxicité envers les organismes cibles ?



Fenoxycarbe
vieilli

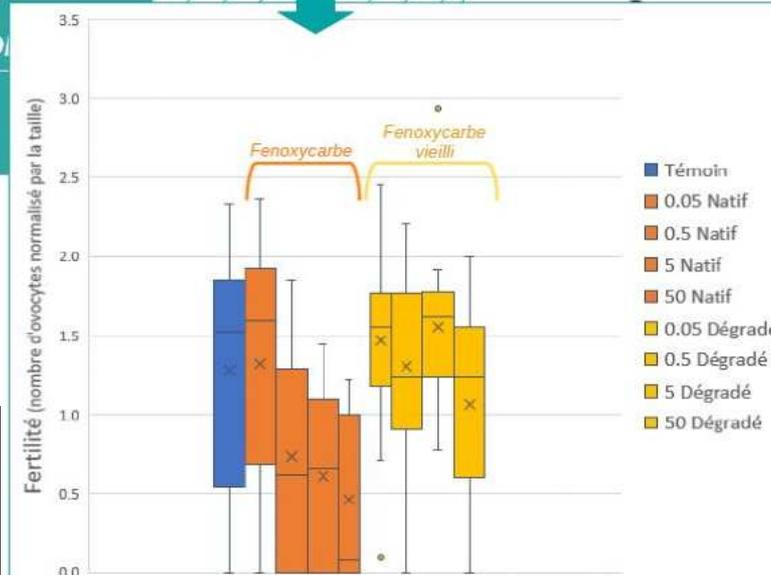
Reprotoxicité
~~Reprotoxicité~~



Tebuconazole
TP : tebuconazole



Terbuthylazine
vieilli ou TP



?



➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques



➤ La **dégradation** des produits phyto-sanitaires modifie-t-elle leur toxicité envers les organismes cibles ?



Fenoxycarbe
vieilli

Reprotoxicité
Reprotoxicité



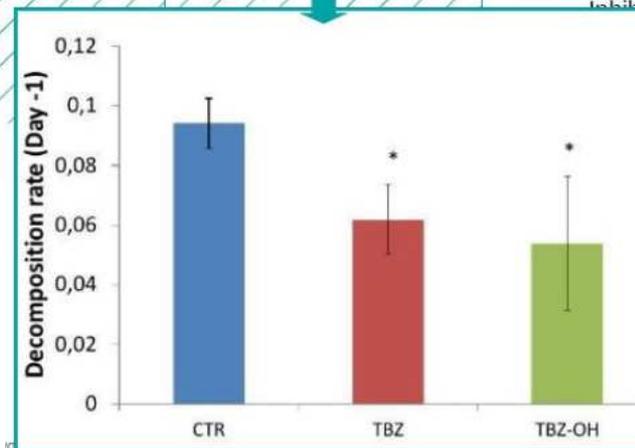
Tebuconazole
TP : tebuconazole-OH

Inhibition décomposition
Inhibition décomposition



Terbuthylazine
vieilli ou TP

Inhibition
Inhibition



➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques

			
 Fenoxycarbe <i>vieilli</i>	Reprotoxicité Reprotoxicité		
 Tebuconazole <i>TP : tebuconazole-OH</i>		Inhibition décomposition Inhibition décomposition	
 Terbuthylazine <i>vieilli ou TP</i>			Inhibition photosynthèse Inhibition photosynthèse

➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques



Quels **dommages collatéraux** de l'exposition aux produits phyto-sanitaires et à leurs produits de dégradation pour les organismes **non-cibles** ?

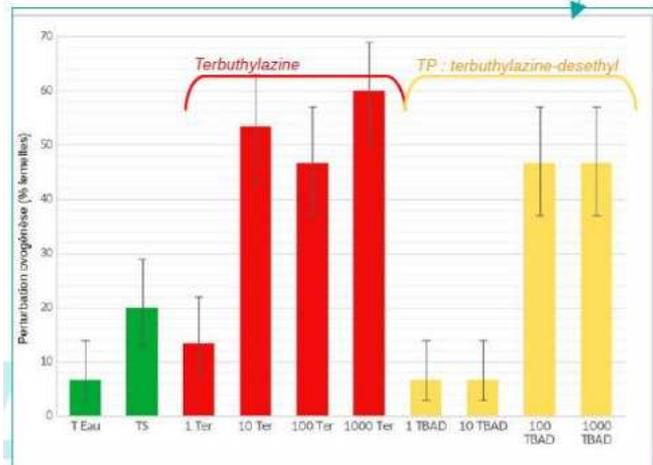


Terbuthylazine

Toxicité pour la reproduction

Terbuthylazine-desethyl

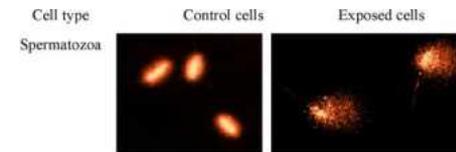
Toxicité pour la reproduction



➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques



➤ Quels **dommages collatéraux** de l'exposition aux produits phyto-sanitaires et à leurs produits de dégradation pour les organismes **non-cibles** ?

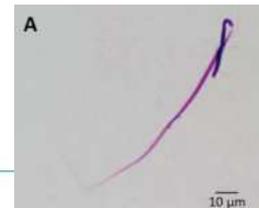
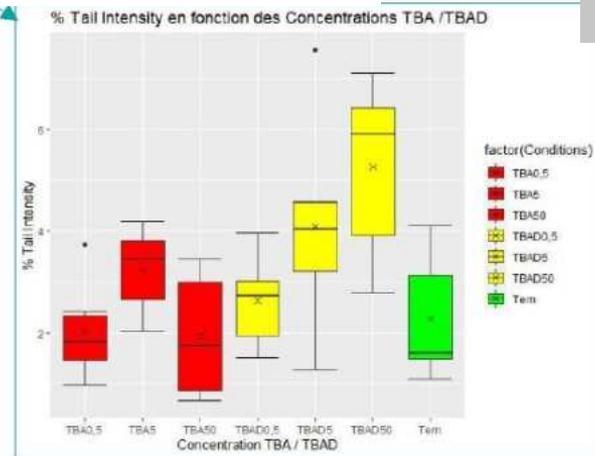
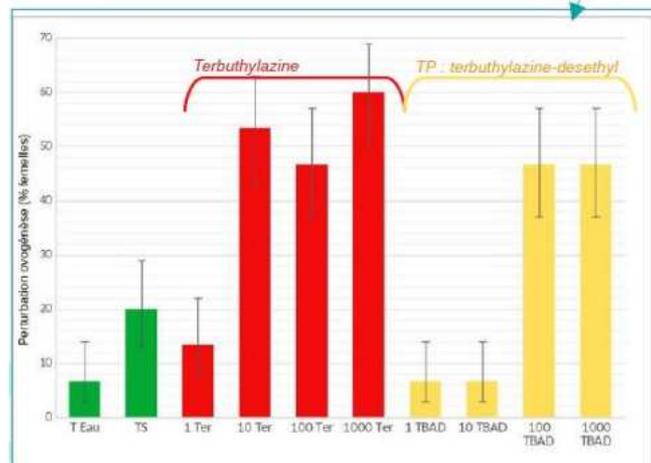


Terbuthylazine

Toxicité pour la reproduction

Terbuthylazine-desethyl

Toxicité pour la reproduction +
génomotoxicité



Nouvelle toxicité !!!!

➤ Identifier les effets écotoxiques des TP sur les organismes aquatiques



 Fenoxycarbe <i>vieilli</i>	Reprotoxicité Reprotoxicité		<i>faible toxicité pour les paramètres observés (photosynthèse, biomasse...)</i>
 Tebuconazole <i>TP : tebuconazole-OH</i>	<i>Pas de toxicité pour les paramètres observés (alimentation, survie...)</i>	Inhibition décomposition Inhibition décomposition	<i>faible toxicité pour les paramètres observés (photosynthèse, biomasse...)</i>
 Terbutylazine <i>vieilli ou TP</i>	Toxicité Toxicité +		Inhibition photosynthèse Inhibition photosynthèse

- Dans la majorité des cas étudiés, les produits de dégradation des produits phytosanitaires sont moins toxiques que les substances mères mais ce n'est pas toujours le cas

=> comment détecter ces exceptions ?

- L'étude de la toxicité des pesticides sur les organismes cibles mais aussi non-cibles permet de détecter des effets toxiques inattendus
=> importance de conduire des tests d'écotoxicité pour les **substances mères et leurs produits de transformation** sur **plusieurs espèces**

➤ Une approche interdisciplinaire pour :

- croiser des questions de recherche sur le **devenir et l'effet** des substances chimiques présentes dans l'environnement ;
- confronter et prendre en compte les **spécificités/contraintes/exigences** de chaque discipline ;
- améliorer **la robustesse** (labo/expé/terrain/modélisation) à chaque étape du projet pour le réalisme et la qualité des résultats acquis.

➡ au final, peu d'obstacles pour beaucoup de bénéfices

Merci !

La modélisation hydraulique 2D des habitats piscicoles

Théophile TERRAZ, Hervé

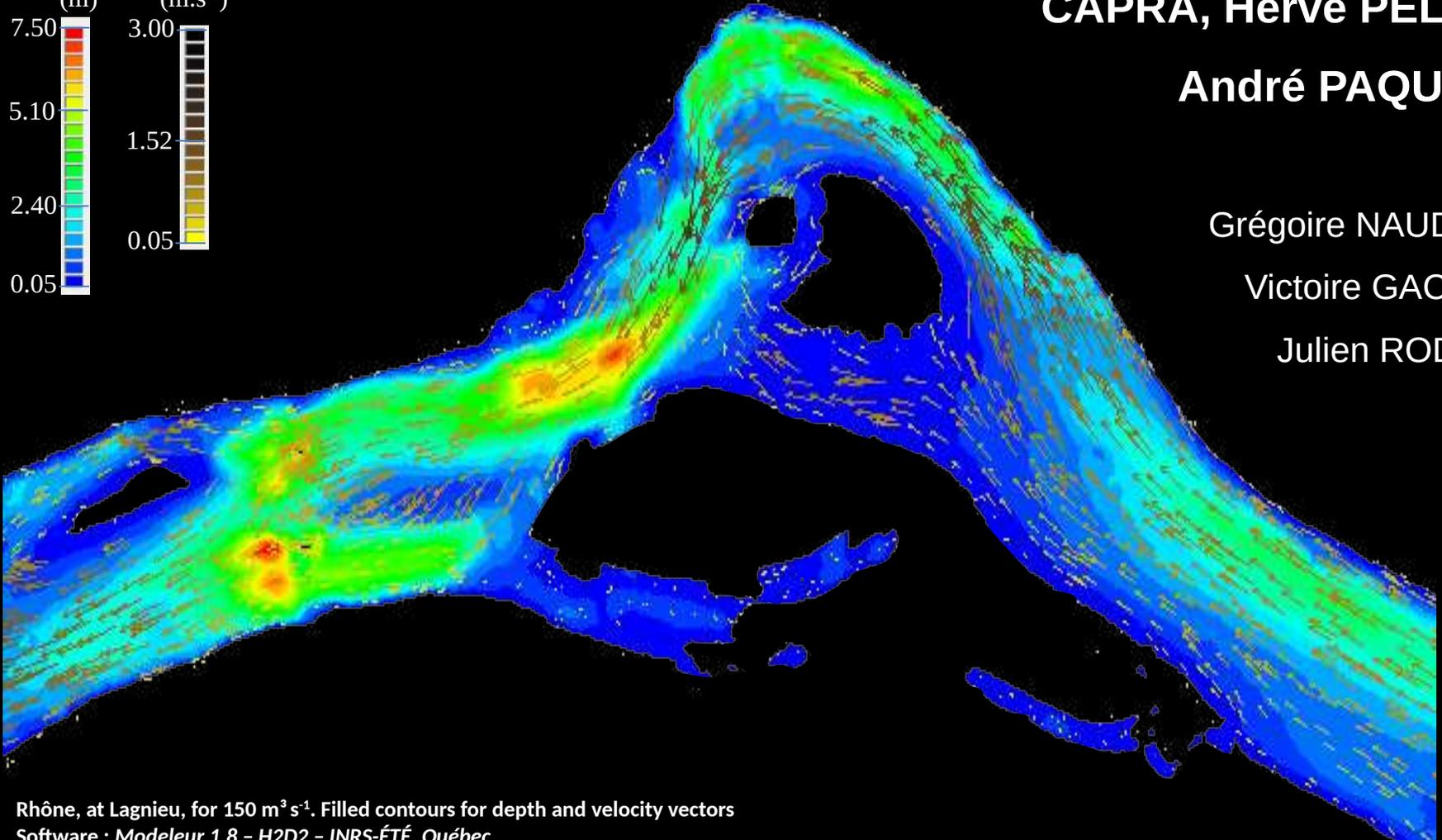
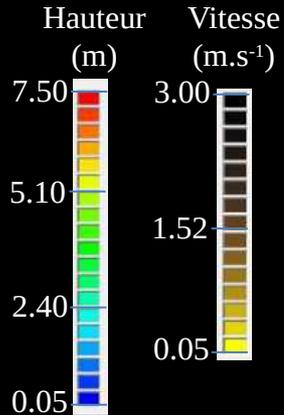
CAPRA, Hervé PELLA,

André PAQUIER

Grégoire NAUDET,

Victoire GACHE,

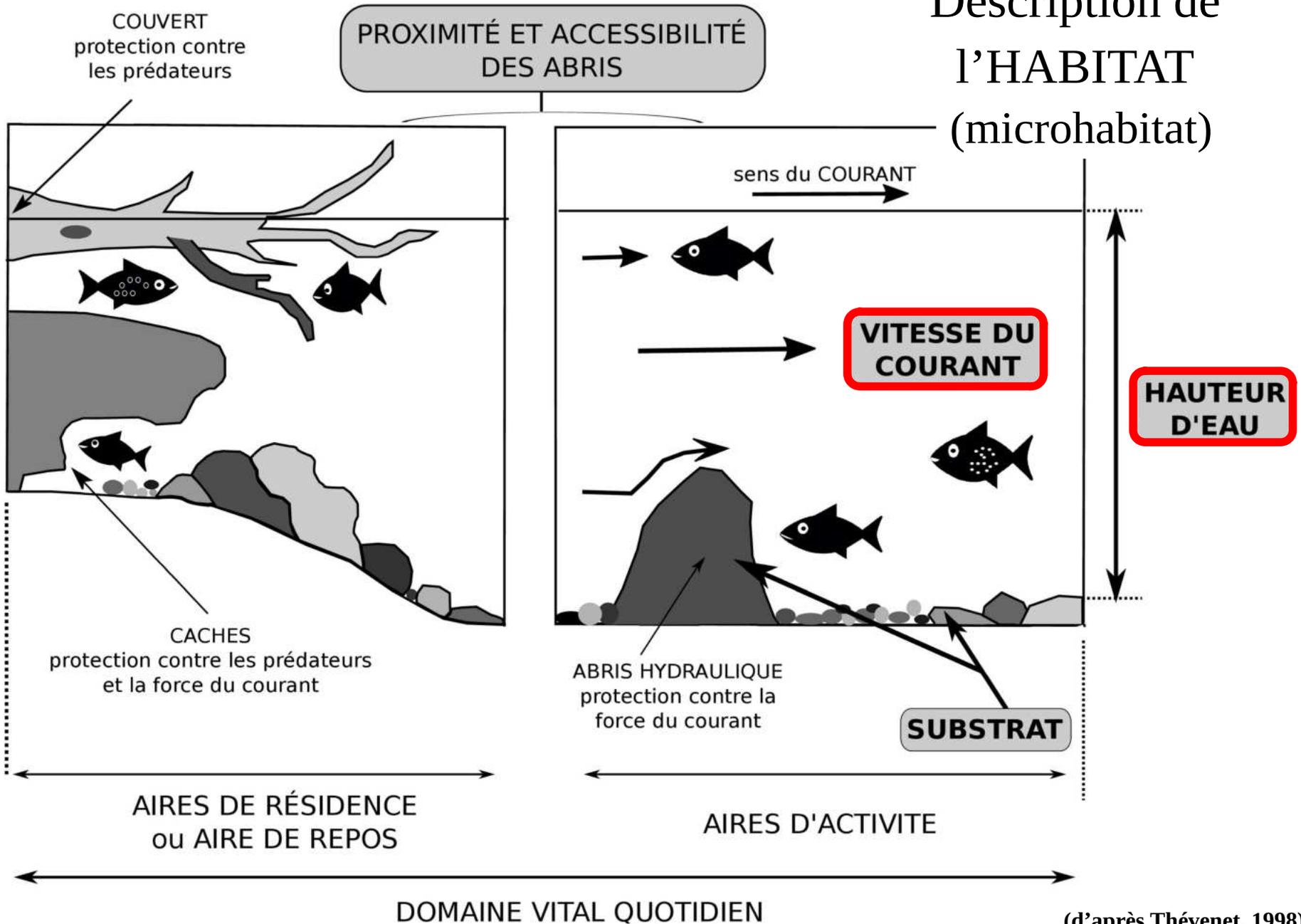
Julien RODIER



Rhône, at Lagnieu, for 150 m³ s⁻¹. Filled contours for depth and velocity vectors

Software : *Modeleur 1.8 - H2D2 - INRS-ÉTÉ, Québec*

Description de l'HABITAT (microhabitat)



(d'après Thévenet, 1998)

Quantifier la disponibilité d'habitat



250 m³/s
(29/09/2004)



770 m³/s
(07/03/2006)

Rubar20

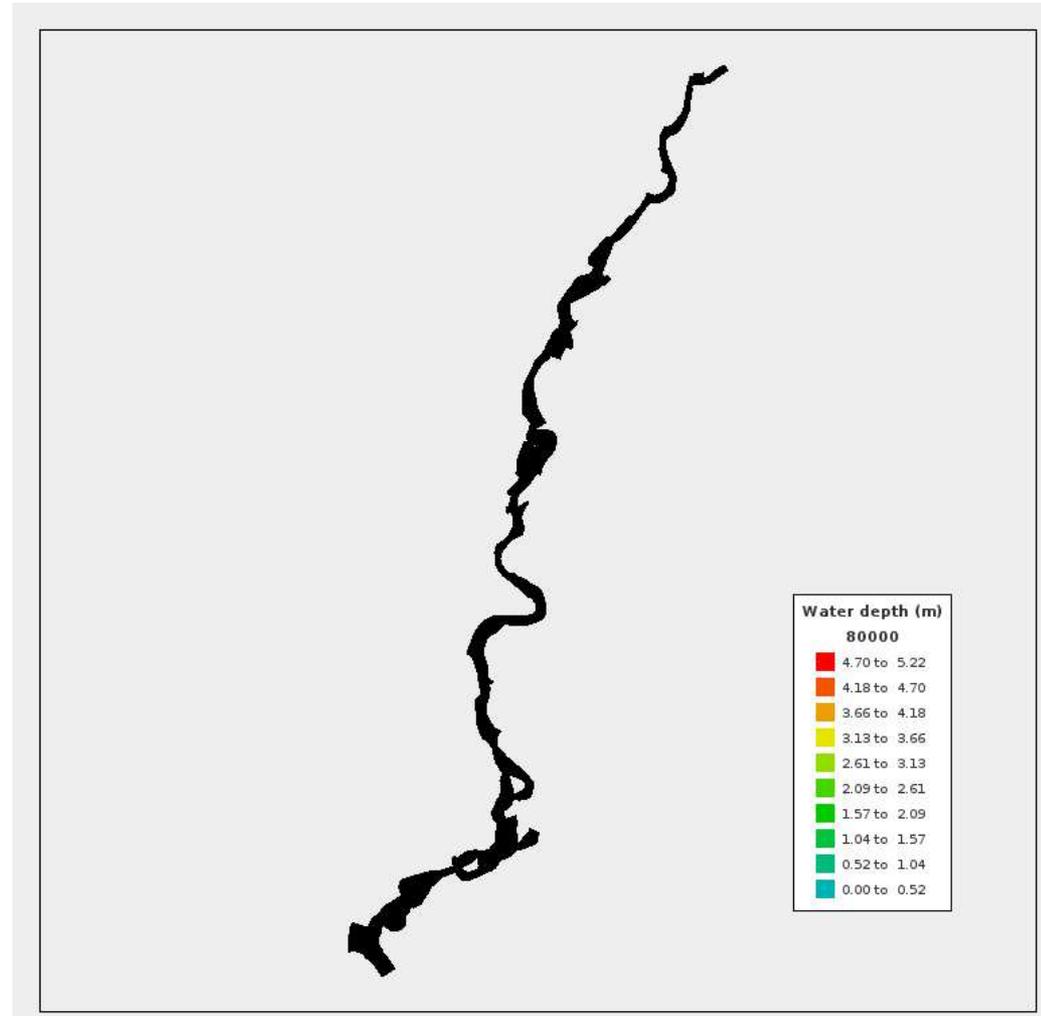
- Equations de de Saint Venant 2D (valeurs moyennées sur la verticale)
- Schéma volume finis explicite d'ordre 2
- Calcul vitesses, hauteurs d'eau et débits
- Écoulement transitoire, prise en compte des mailles sèches
- Parallélisation par décomposition de domaine

L'AIN...



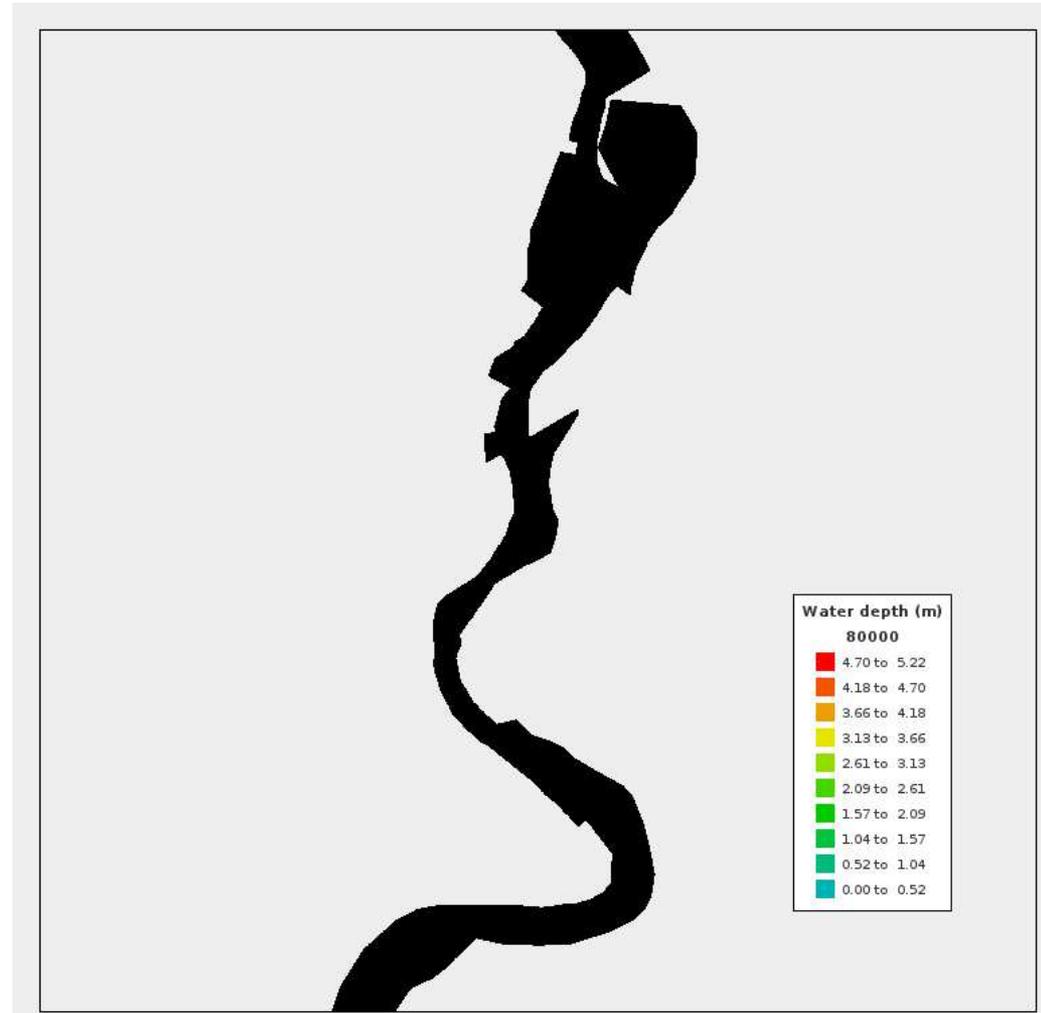
Modèle de l'Ain

- ~2M de mailles
~2m50 de côté
- 38 km
- 47h de calcul sur
28 cœurs



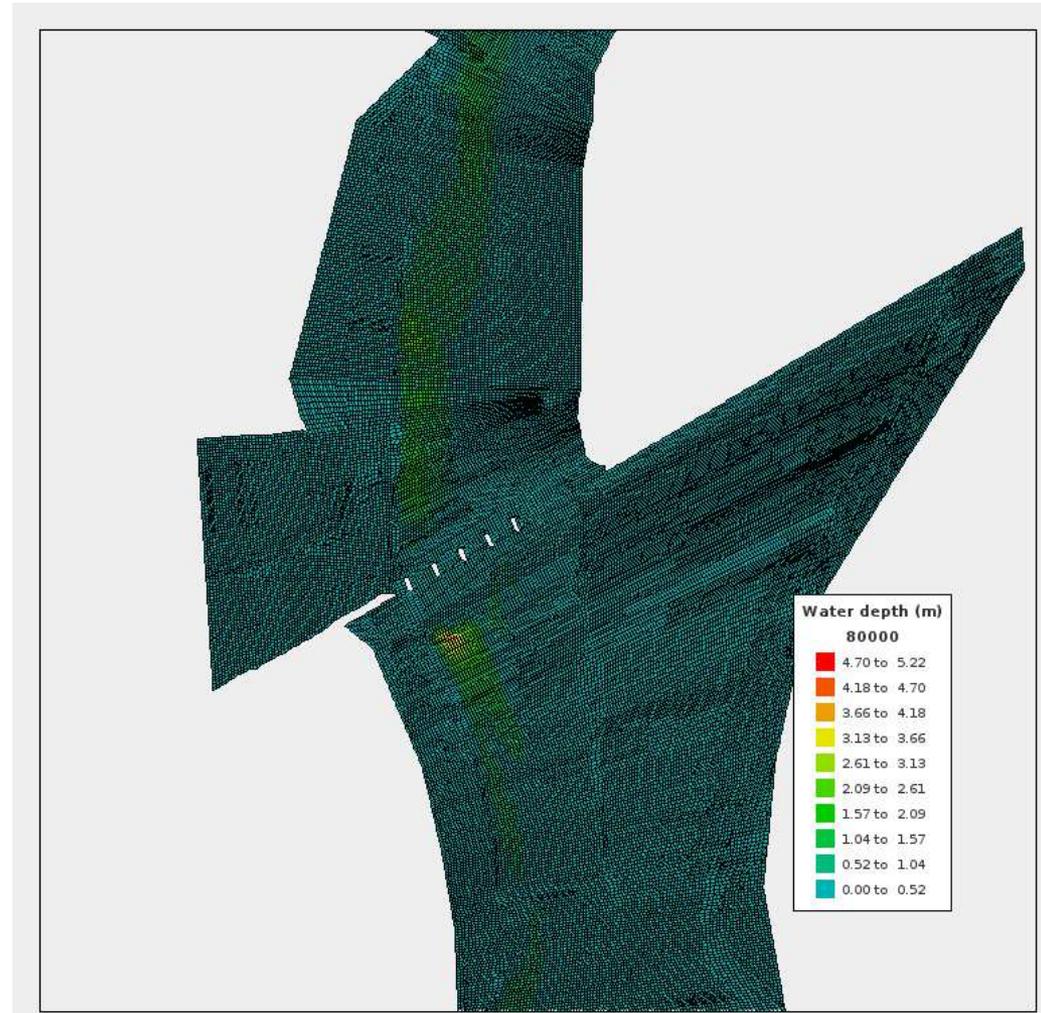
Modèle de l'Ain

- ~2M de mailles
~2m50 de côté
- 38 km
- 47h de calcul sur
28 cœurs



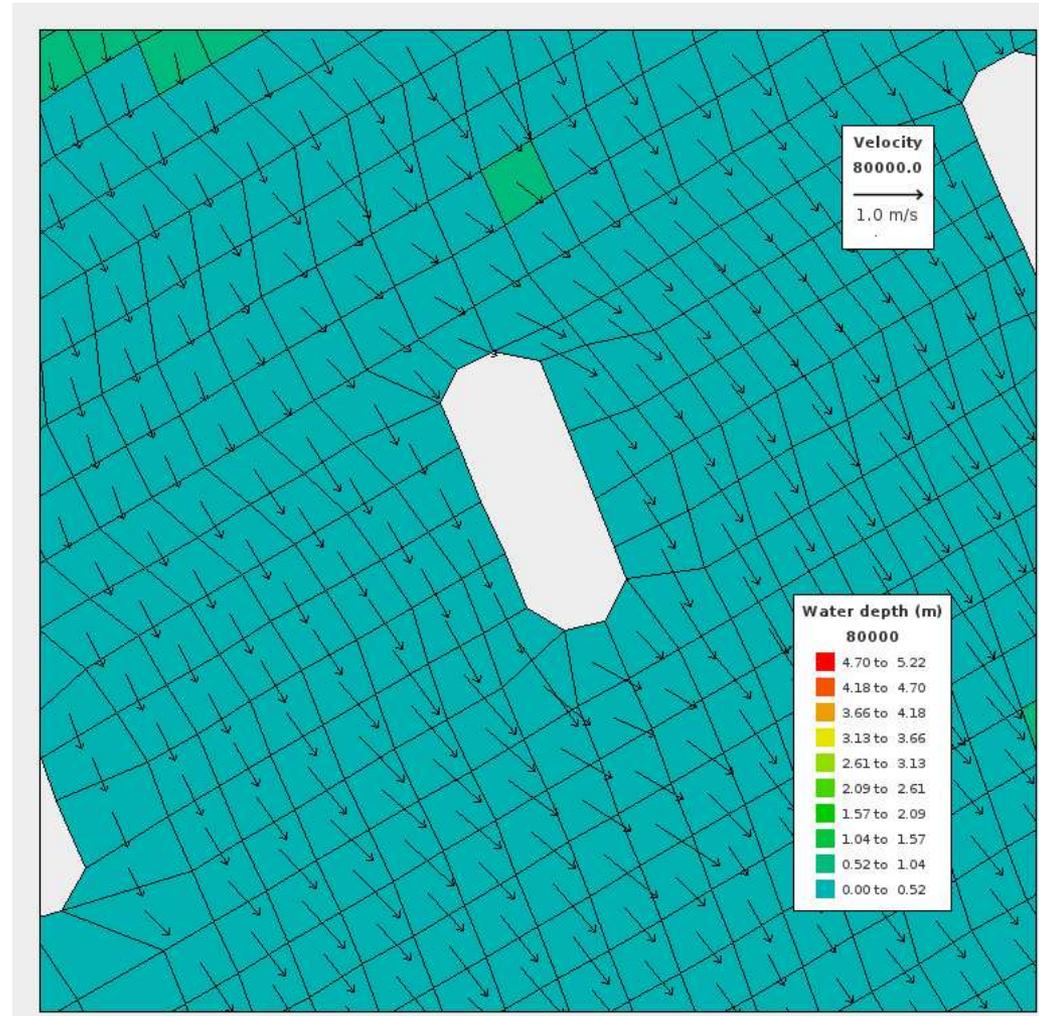
Modèle de l'Ain

- ~2M de mailles
~2m50 de côté
- 38 km
- 47h de calcul sur
28 cœurs

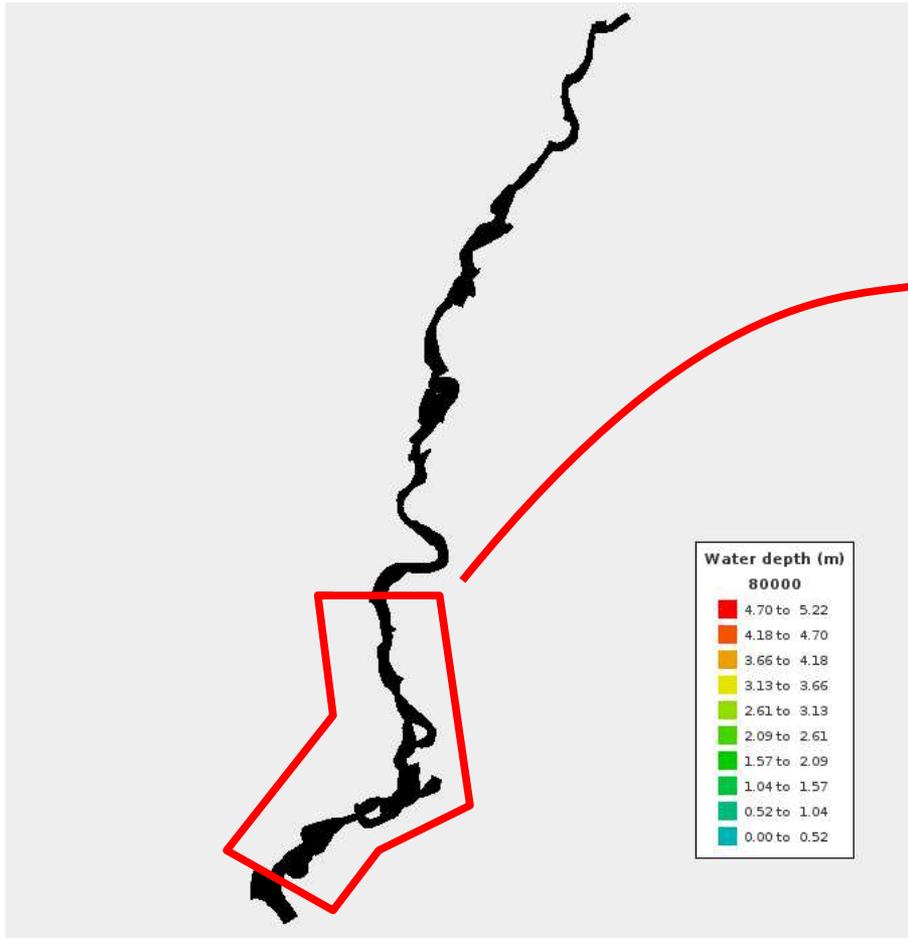


Modèle de l'Ain

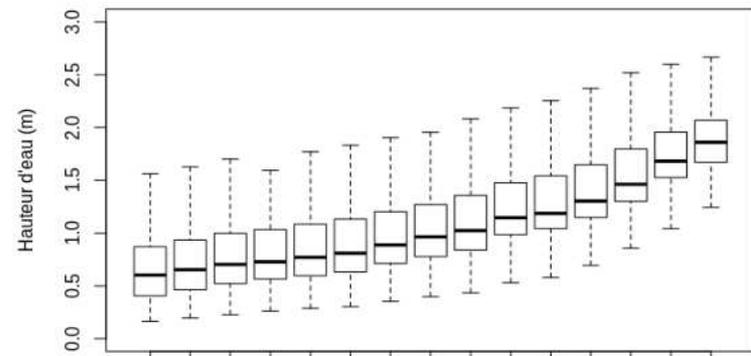
- ~2M de mailles
~2m50 de côté
- 38 km
- 47h de calcul sur
28 cœurs



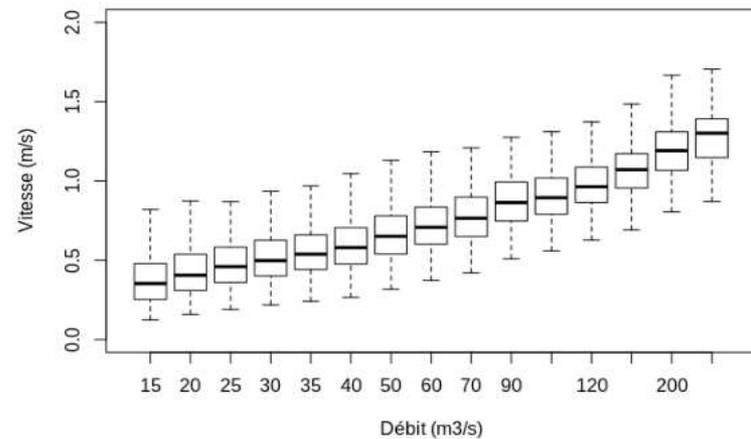
Quantifier la disponibilité d'habitat



Evolution des hauteurs d'eau moyennes par débit - Secteur 4

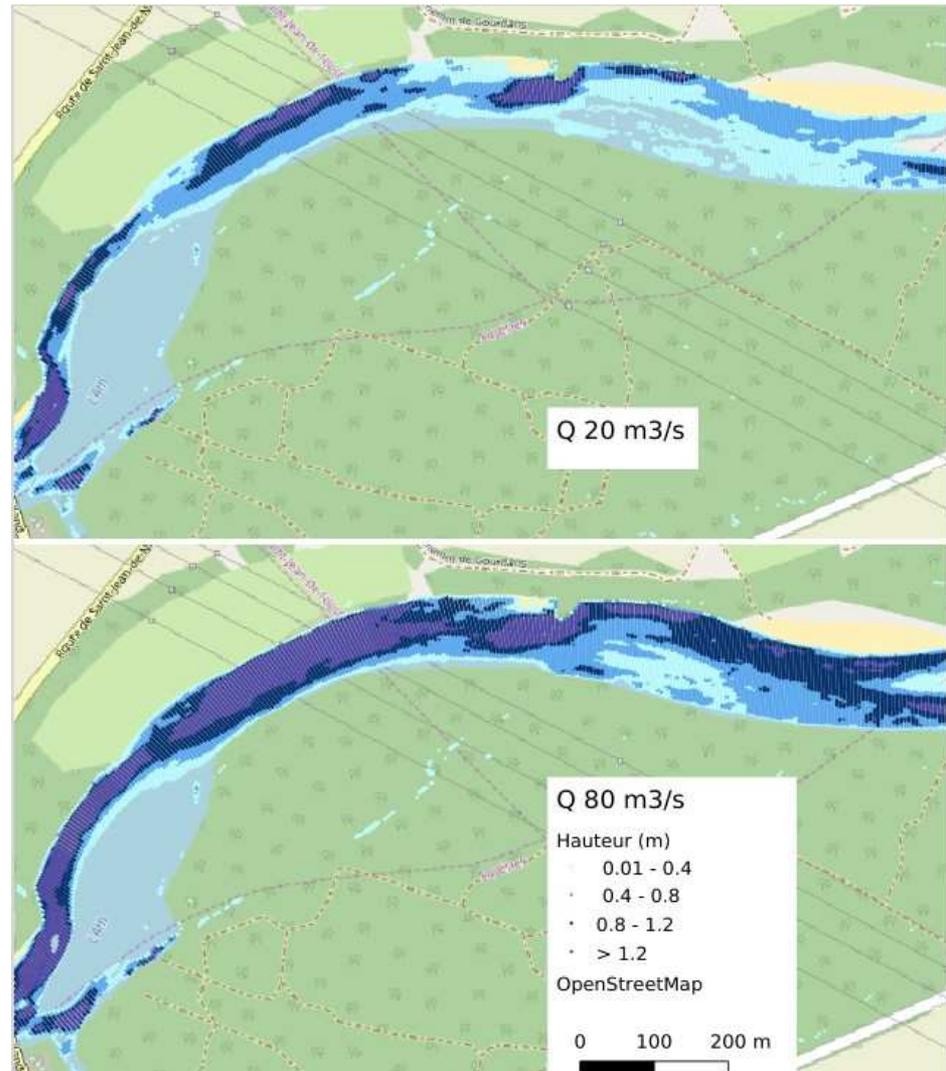
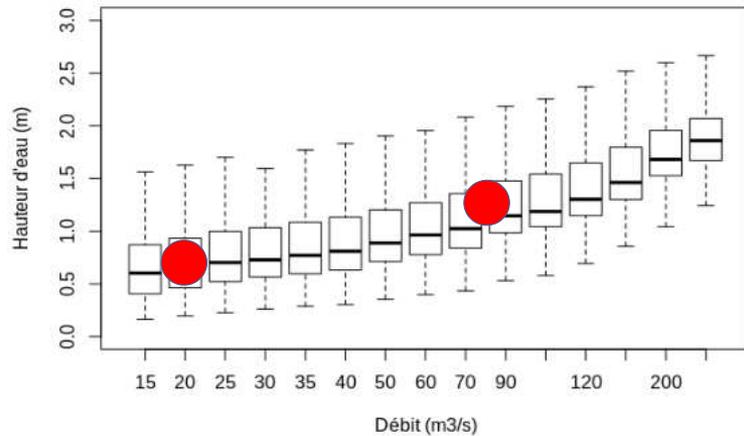


Evolution des vitesses moyennes par débit - Secteur 4

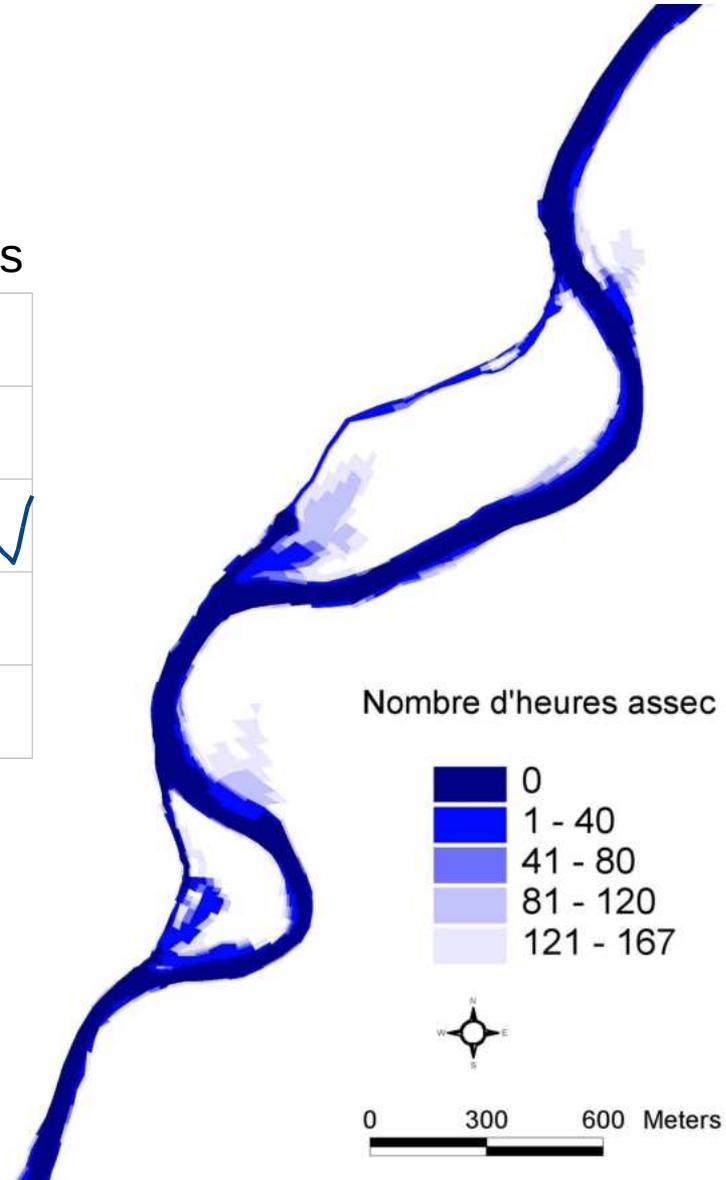
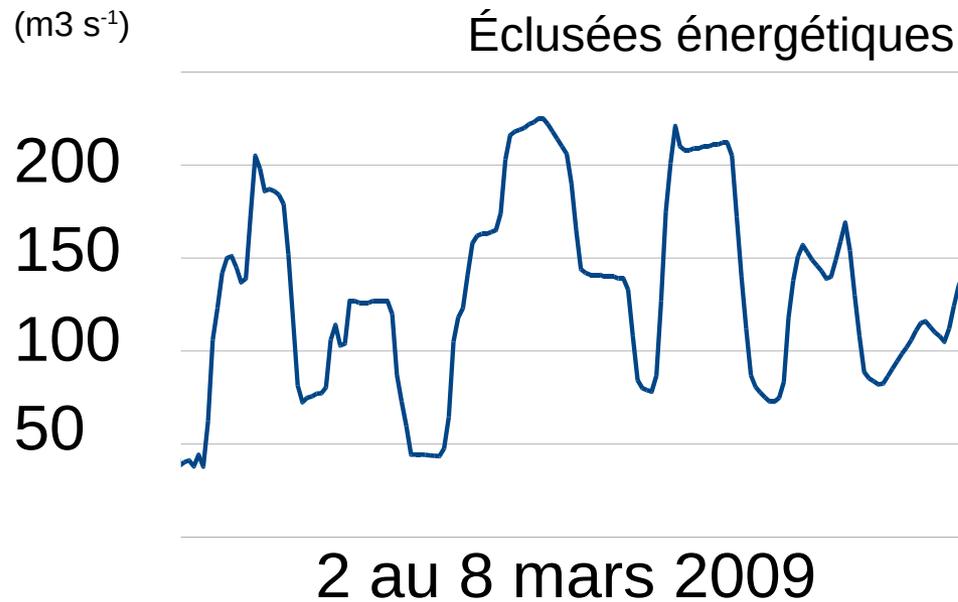


Quantifier la disponibilité d'habitat

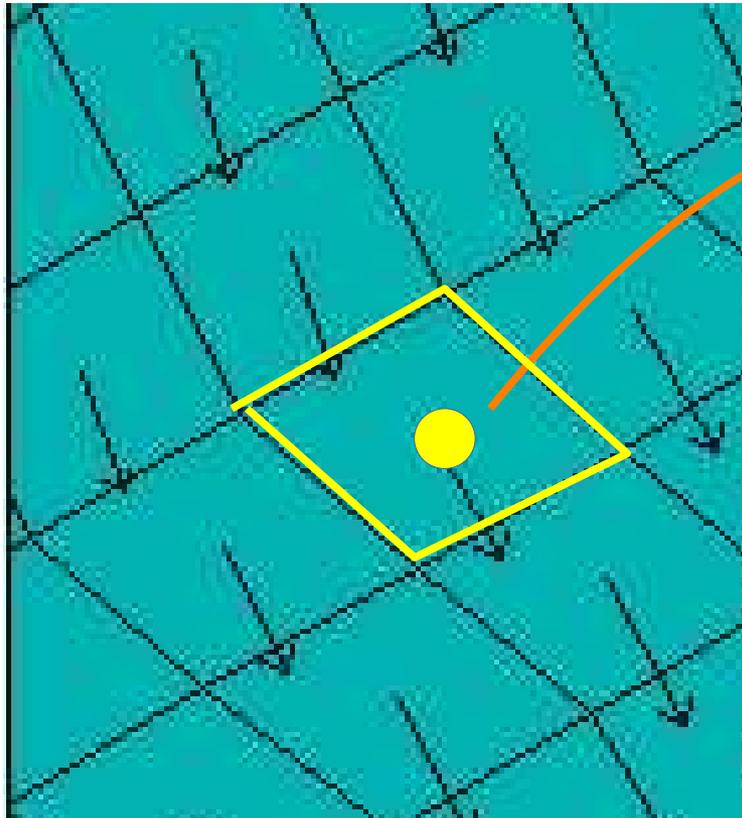
Evolution des hauteurs d'eau moyennes par débit - Secteur 4



Quantifier la disponibilité d'habitat



Hydraulique \Rightarrow Habitat



Modèle hydraulique

[Hauteur, Vitesse]



Modèle de préférence d'habitat
(exigences écologiques)



HABITAT

(note de 0 à 1)

Quantifier la disponibilité d'habitat

Valeur d'habitat
BARBEAU

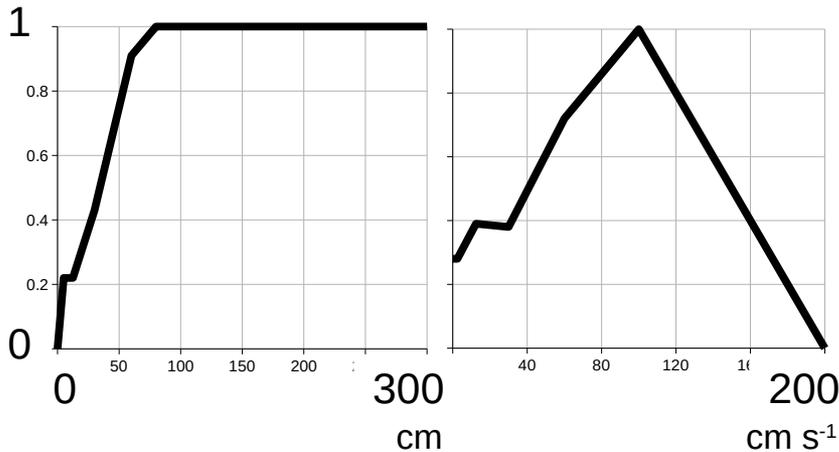


20 m³ s⁻¹

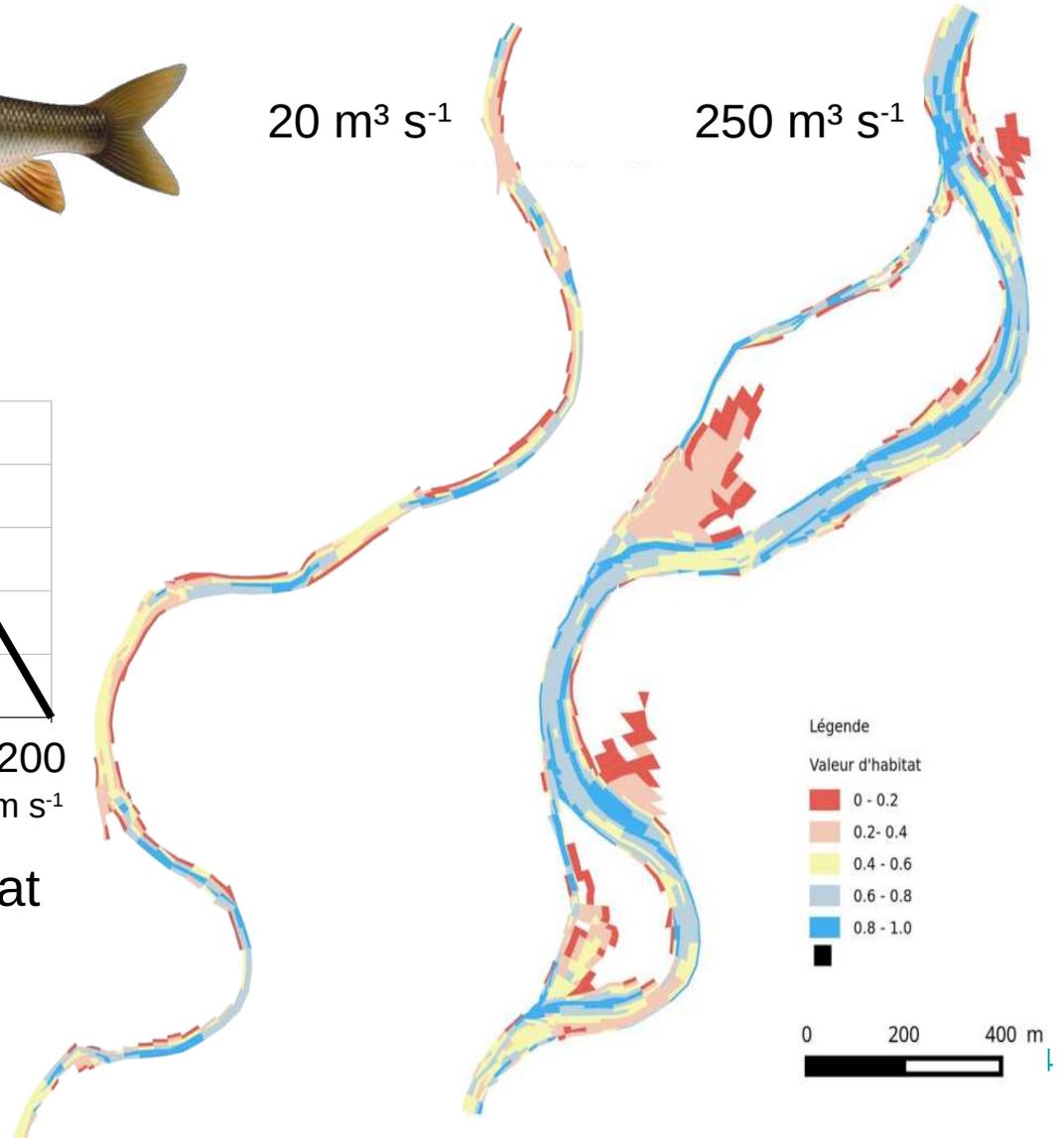
250 m³ s⁻¹

Hauteur

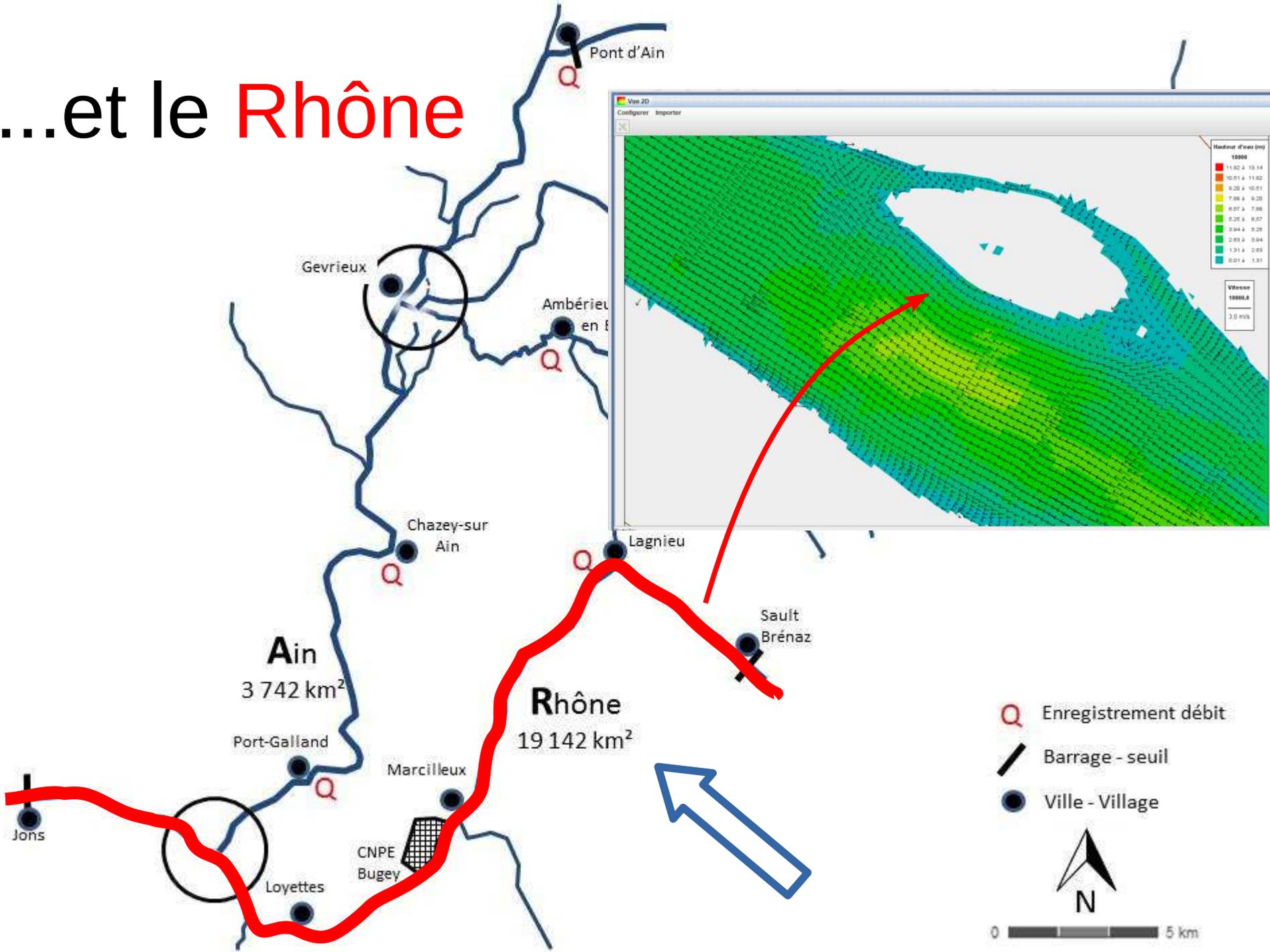
Vitesse



Modèle de préférence d'habitat



...et le Rhône



Merci de votre attention

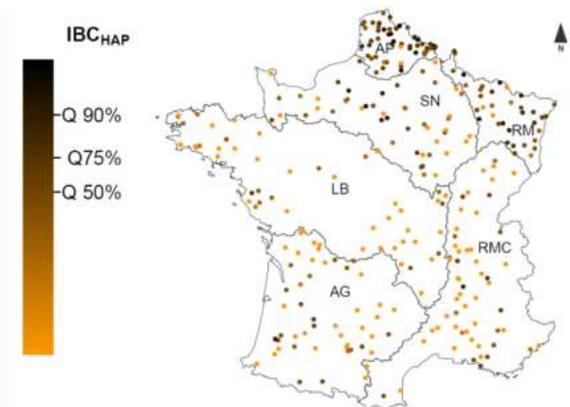
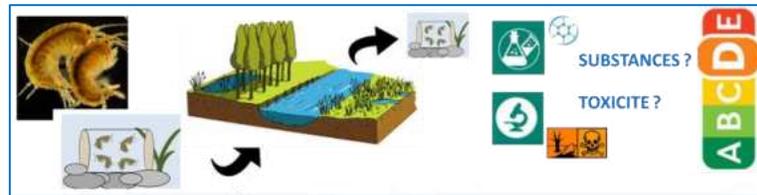


Rhône à Lagnieu – 1670 m³ s⁻¹ – 20231213



➤ Approche pluridisciplinaire pour mieux comprendre la présence et la toxicité des contaminants dans les milieux aquatiques :

Exemple du projet APPRove (2018-2023)



anr[©] agence nationale de la recherche

➤ Contexte : une question qui nous anime

Exposition



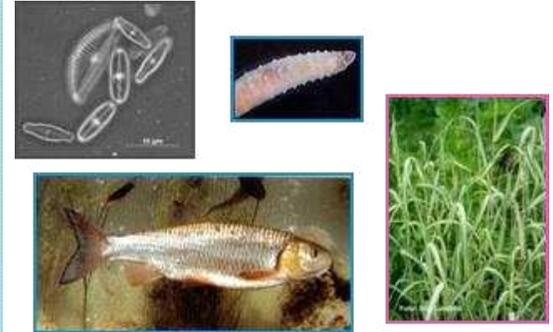
Difficulté d'établir des liens cause - effet



Chimie/habitat/trophique ?

Biodisponibilité ?

Impact



Limitée dans la compréhension de l'impact

Limitée pour identifier l'origine de l'impact

➤ Contexte : une question qui nous anime

Exposition



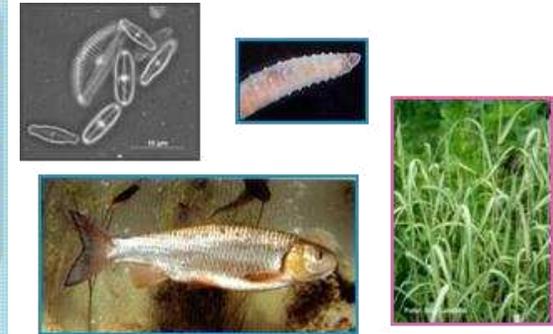
Difficulté d'établir des liens cause - effet



Chimie/habitat/trophique ?

Biodisponibilité ?

Impact



Limitée dans la compréhension de l'impact

Limitée pour identifier l'origine de l'impact

Mieux comprendre / établir ou prédire les liens entre ces échelles, entre la contamination et l'effet



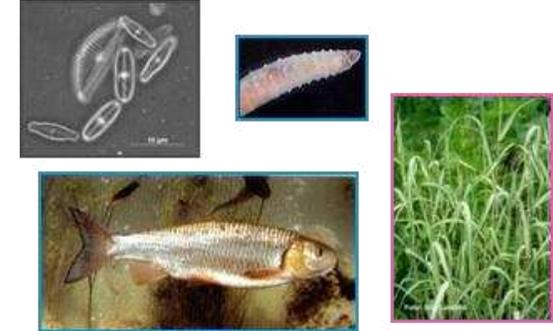
➤ Contexte : pourquoi l'encagement du gammare

Exposition



Expérimentation *in situ*

Impact



➔ Largement répartie et présente en Europe

➔ Biologie et physiologie bien décrites: possibilité de calibrer selon la taille, le sexe et le stade de reproduction

➔ Espèce facile à manipuler et à encager (nourriture)

➔ Connue pour accumuler une large gamme de contaminants organiques et inorganiques

SETAC PRESS

Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 28, No. 10, pp. 2249-2258, 2009
© 2009 SETAC
Printed in the USA
DOI: 10.1080/10920180903208

OVARIAN CYCLE AND EMBRYONIC DEVELOPMENT IN *GAMMARUS FOSSARUM*:
APPLICATION FOR REPRODUCTIVE TOXICITY ASSESSMENT

OLIVIER GEFFARD,^{1,*} BENOIT XUEREB,¹ ARNAUD CHAUMOT,¹ ALAIN GEFFARD,¹ SYLVIE BIAGIANTI,¹ CLAIRE NOEL,¹
KHEDIDJA ARRACI,¹ JEANNE GARRIC,¹ GUY CHARMANTIER,² and MIREILLE CHARMANTIER-DAURES²



Caged *Gammarus fossarum* (Crustacea) as a robust tool for the characterization of bioavailable contamination levels in continental waters: Towards the determination of threshold values

Jean-Philippe Besse^{1,2}, Marina Coquery^{1,2}, Christelle Lopes^{1,2}, Arnaud Chaumot^{1,2},
Hélène Budzinski², Pierre Labadie², Olivier Geffard^{1,2,3}

➤ Contexte : des outils d'aide à la gestion

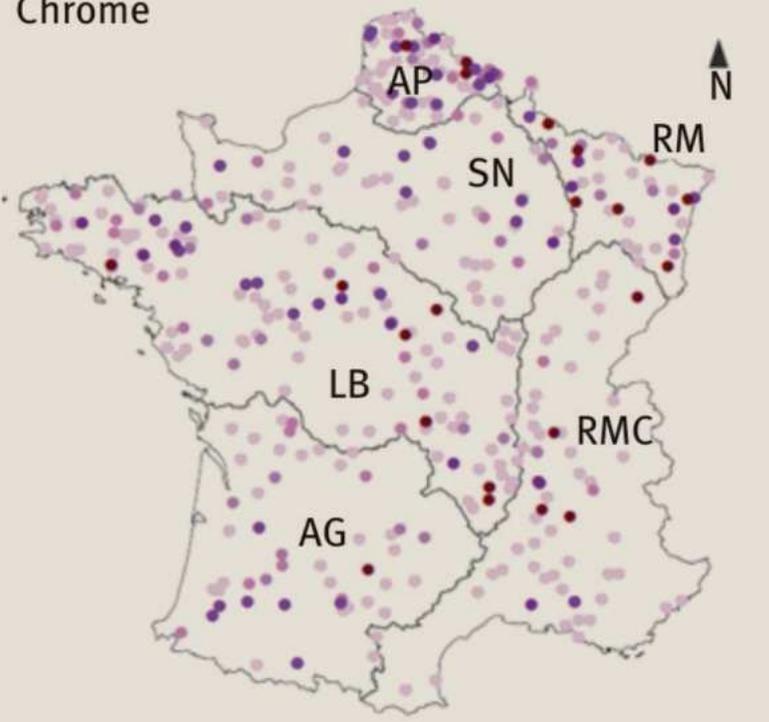
Identifier une contamination "anormale" / niveau de base

RiverLy

LAMA



Chrome



afnor
NORMALISATION
NF 90 - 721



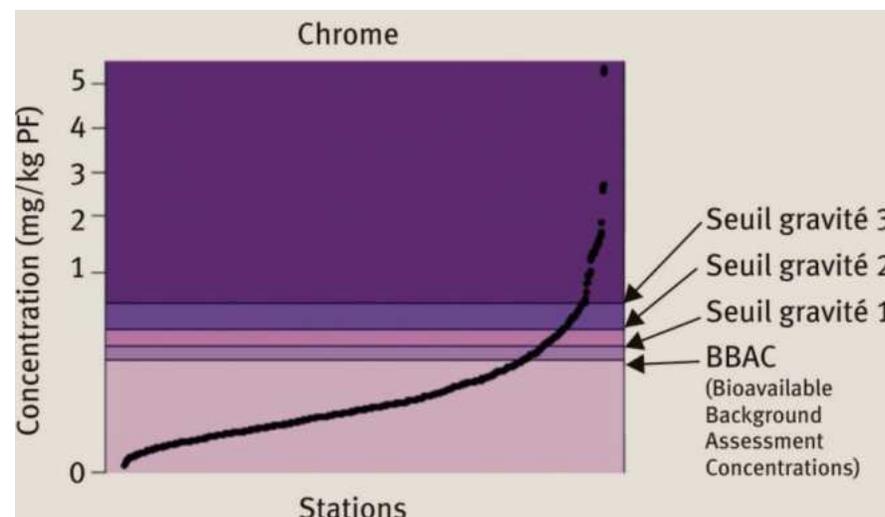
Qualité de l'eau - Encagement *in situ* de gammarès pour la mesure de la bioaccumulation de substances chimiques

ISO/TS 21738 (in prep, 2025) : Water quality — Active biomonitoring method with *in situ* caged benthic amphipods



Définition de seuils de gravité

- 18 éléments métalliques
- > 40 composés organiques



De 2018 - 2023

2 340 encagements en France

540 stations suivies
(1 à 6 campagnes tous les 2 ans)

➤ Contexte : des outils d'aide à la gestion



Identifier une toxicité "anormale"

Encagement de gammarès sur le bassin Adour-Garonne pour évaluer la qualité écotoxicologique des milieux aquatiques

Caging of gammarids in the Adour-Garonne basin to assess the ecotoxicological quality of aquatic environments

normalisation française

XP T 90-722-1
Octobre 2020

Indice de classement : T 90-722-1

ICS : 13.060.70

Qualité de l'eau — Mesures moléculaires, physiologiques et comportementales chez le gammaré (crustacé amphipode) — Partie 1 : Dosage de l'activité enzymatique acétylcholinestérase (AChE)



normalisation française

XP T 90-722-2
Octobre 2020

Indice de classement : T 90-722-2

ICS : 13.060.70

Qualité de l'eau — Mesure moléculaires, physiologiques et comportementales chez le gammaré (crustacé amphipode) — Partie 2 : Mesure de marqueurs de reproduction

normalisation française

XP T 90-722-3
Octobre 2020

Indice de classement : T 90-722-3

ICS : 13.060.70

Qualité de l'eau — Mesures moléculaires, physiologiques et comportementales chez le gammaré (crustacé amphipode) — Partie 3 : Mesure du taux d'alimentation

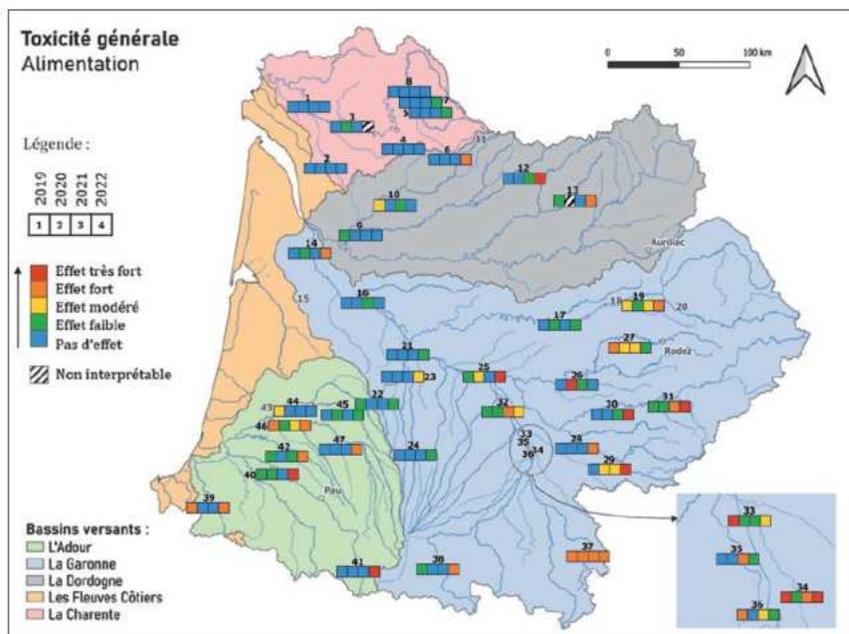


Figure 3. Cartographie des effets sur le taux d'alimentation (moyenne annuelle) mesurés à l'aide de gammarès mâles encagés lors de trois campagnes par an au cours d'un suivi sur 4 ans (de 2019 à 2022)

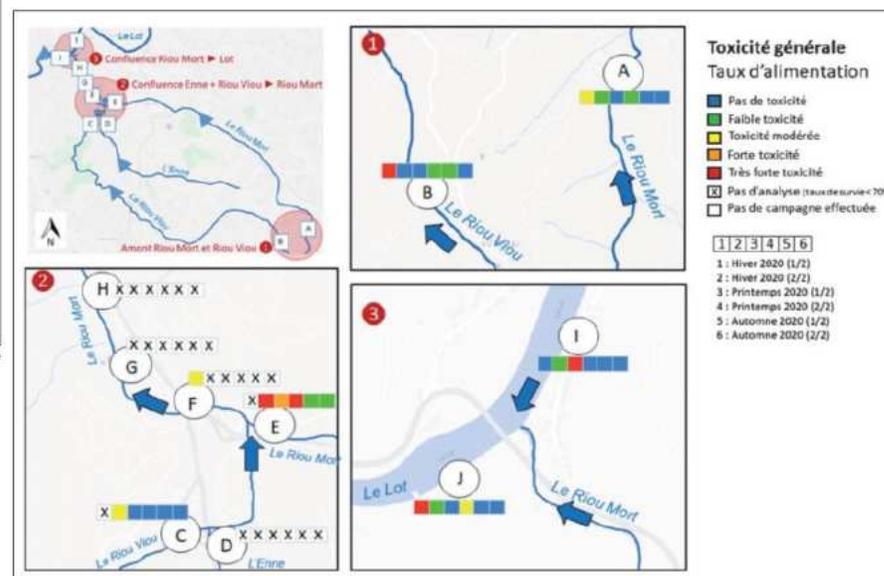


Figure 5. Cartographie des effets sur la survie et l'alimentation mesurés chez les gammarès mâles exposés 7 jours sur les sept stations étudiées et pour les six campagnes réalisées en 2020 sur le bassin versant du Riou Mort



Verrou : décrire et comprendre le devenir des contaminants dans les organismes exposés à des concentrations environnementales

Pourquoi?

- 1 – Organes clés dans l'accumulation / mieux comprendre l'exposition
- 2 – Organes clés dans la gestion des contaminants / marqueurs moléculaires de toxicité



Améliorer la surveillance de la contamination et de la toxicité des milieux aquatiques

Verrou : décrire et comprendre le devenir des contaminants dans les organismes exposés à des concentrations environnementales



- Radioéléments : exposition à des concentrations faibles environnementales

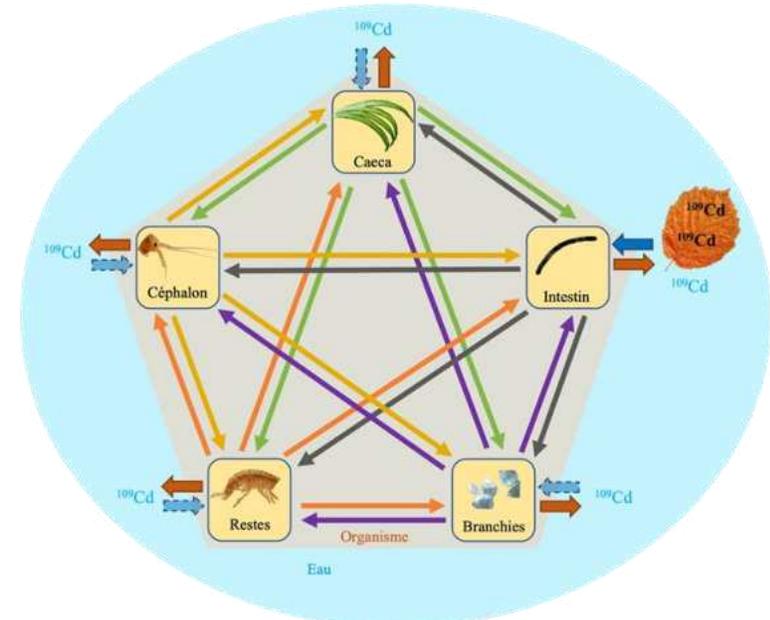


➤ Projet pluridisciplinaire APPROVe pour aller plus loin

Verrou : décrire et comprendre le devenir des contaminants dans les organismes exposés à des concentrations environnementales



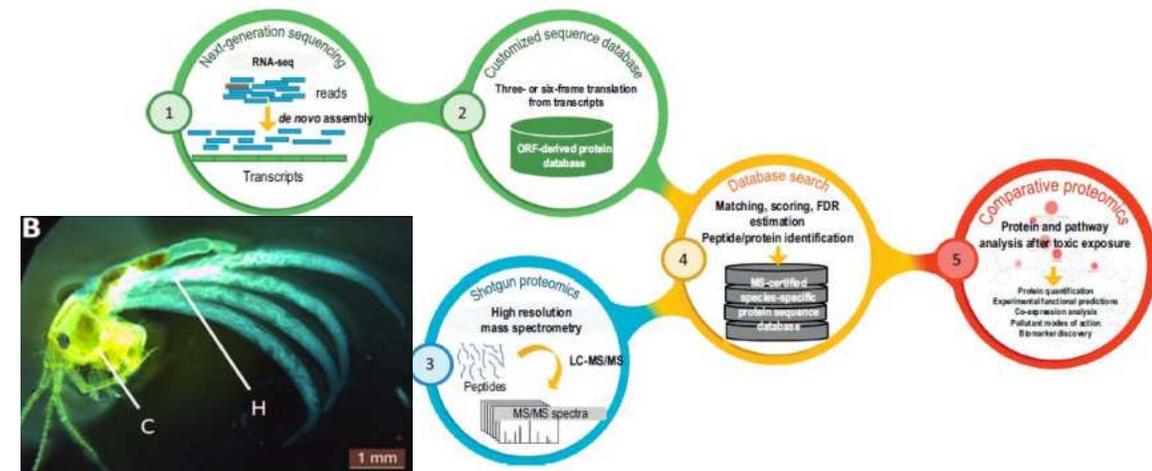
- Radioéléments : exposition à des concentrations faibles environnementales
- Modélisation toxico-cinétique multi-compartiments



Verrou : décrire et comprendre le devenir des contaminants dans les organismes exposés à des concentrations environnementales



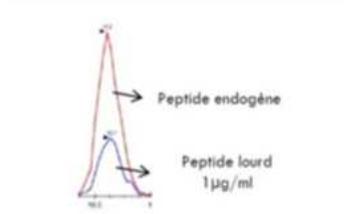
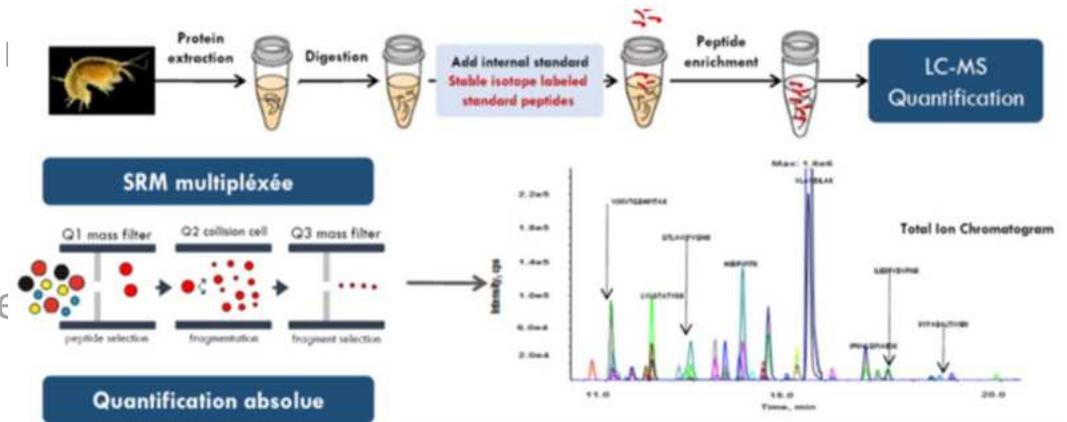
- Radioéléments : exposition à des concentrations faibles environnementales
- Modélisation toxico-cinétique multi-compartiments
- Découverte moléculaire / physiologie moléculaire :
protéomique shotgun



Verrou : décrire et comprendre le devenir des contaminants dans les organismes exposés à des concentrations environnementales



- Radioéléments : exposition à des concentrations faibles environn
- Modélisation toxico-cinétique multi-compartiments
- Découverte moléculaire / physiologie moléculaire : protéomique
- Analyse ciblée et quantitative



Anal. Bioanal. Chem.
DOI 10.1007/s00216-017-0348-0
RESEARCH PAPER

Multiplexed assay for protein quantitation in the invertebrate *Gammarus fossarum* by liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry

Aurine Charnot¹ · Duarte Gouveia² · Jean Armengand³ · Christine Almonia⁴ · Arnaud Chaumont⁵ · Jérôme Lemoine⁵ · Olivier Geffard⁵ · Arnaud Salvador¹

Verrou : décrire et comprendre le devenir des contaminants dans les organismes exposés à des concentrations environnementales

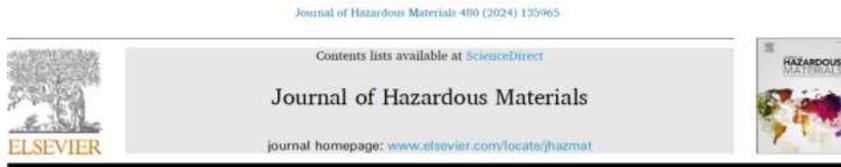


- Radioéléments : exposition à des concentrations faibles environnementales
- Modélisation toxico-cinétique multi-compartiments
- Découverte moléculaire / physiologie moléculaire : protéomique shotgun
- Analyse ciblée et quantitative
- Expertise de terrain, expérimentation large échelle



Organotropisme des métaux chez le gammare

BCF	Branchies	Caeca	Céphalons	Intestins	Restes
Cd	29 000	6 300	670	7 500	250
Zn	2 100	8 800	820	12 000	500



Bioaccumulation, organotropism and fate of cadmium in *Gammarus fossarum* exposed through dietary pathway

Ophélie Gestin^{a,b,c}, Olivier Geffard^c, Nicolas Delorme^c, Laura Garnero^c, Thomas Lacoue-Labarthe^{b,1}, Christelle Lopes^{a,1,*}

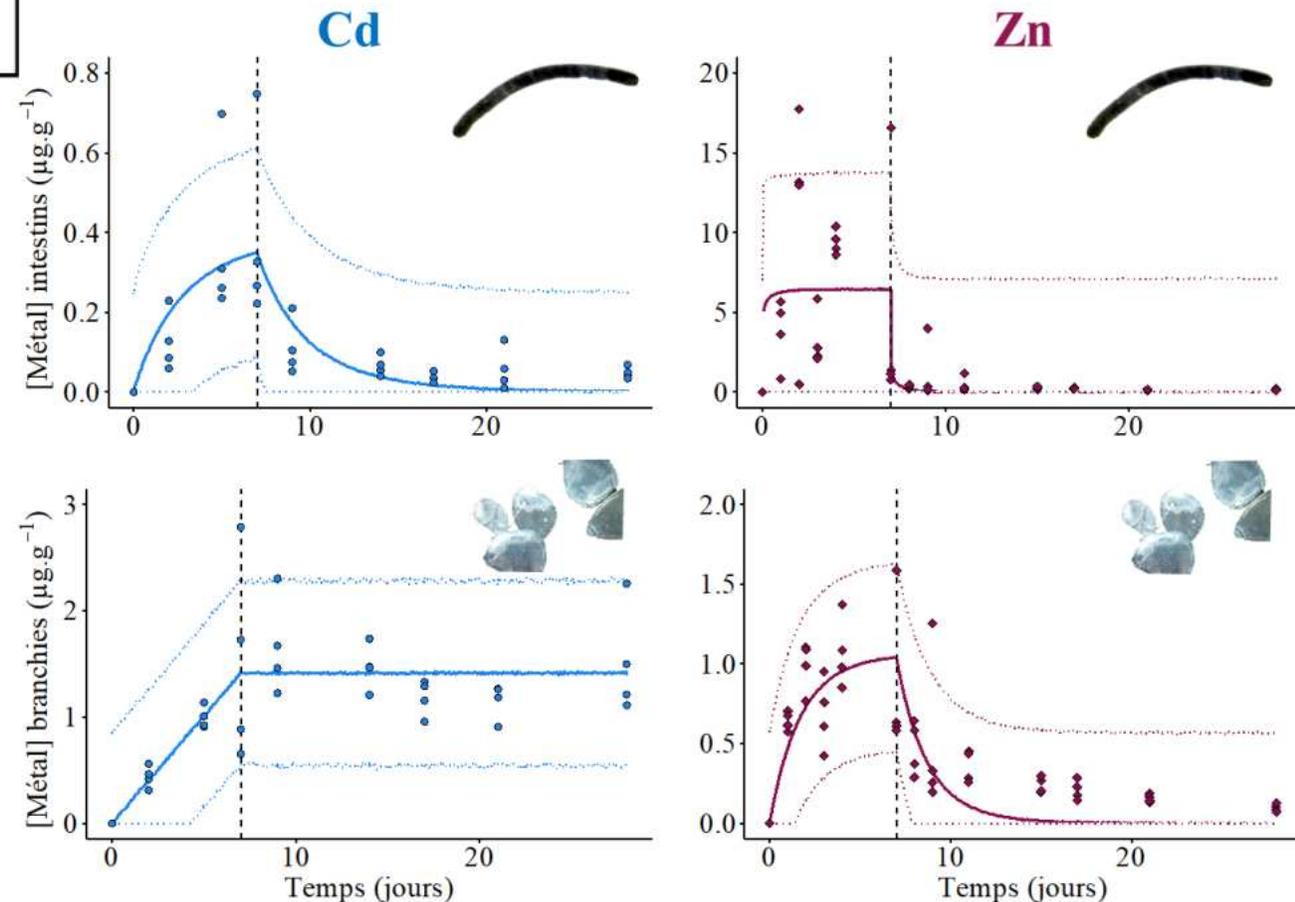
- Les branchies accumulent très fortement et stockent le Cd, pas le Zn.

- L'intestin est une voie d'accumulation importante (BCF), mais le régule / élimine fortement également



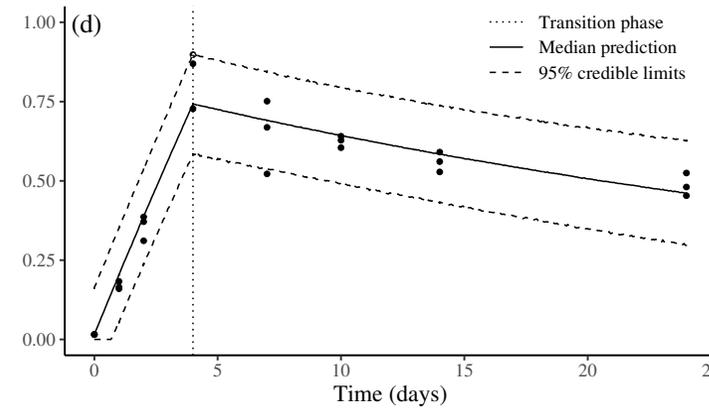
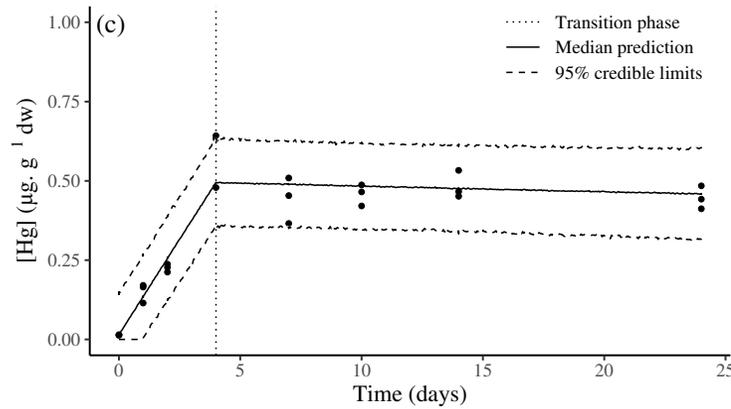
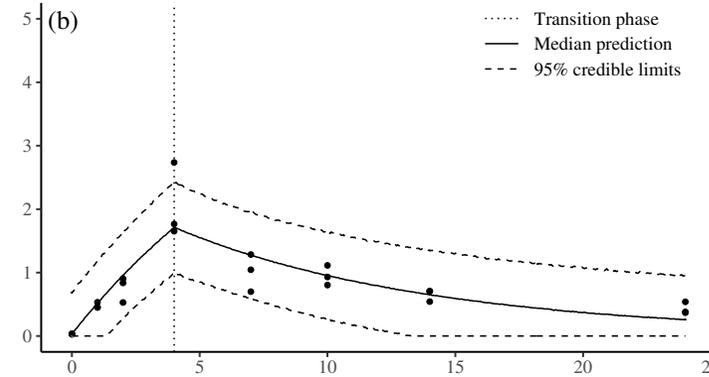
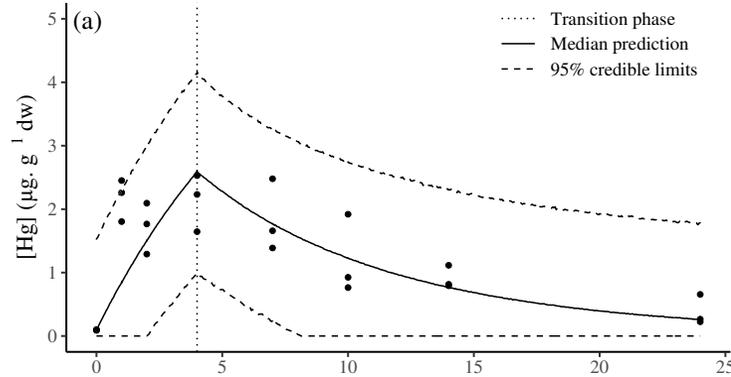
Organ-specific accumulation of cadmium and zinc in *Gammarus fossarum* exposed to environmentally relevant metal concentrations*

Ophélie Gestin^{a,b,c}, Christelle Lopes^a, Nicolas Delorme^c, Laura Garnero^c, Olivier Geffard^c, Thomas Lacoue-Labarthe^{b,*}





Le cas du mercure (Hg)



- Stockage dans le cephalon

- Questions sur méthyl-mercure: neuro- et cardio- toxique chez le vertébré (mammifère, poisson)



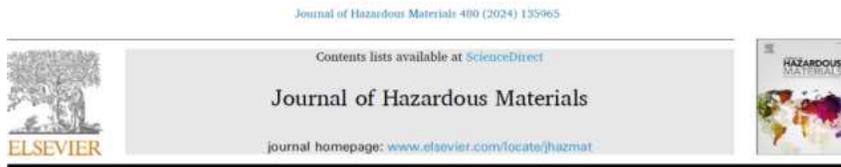
Organotropisme des métaux chez le gammare

BCF	Branchies	Caeca	Céphalons	Intestins	Restes
Cd	29 000	6 300	670	7 500	250
Zn	2 100	8 800	820	12 000	500



Organ-specific accumulation of cadmium and zinc in *Gammarus fossarum* exposed to environmentally relevant metal concentrations*

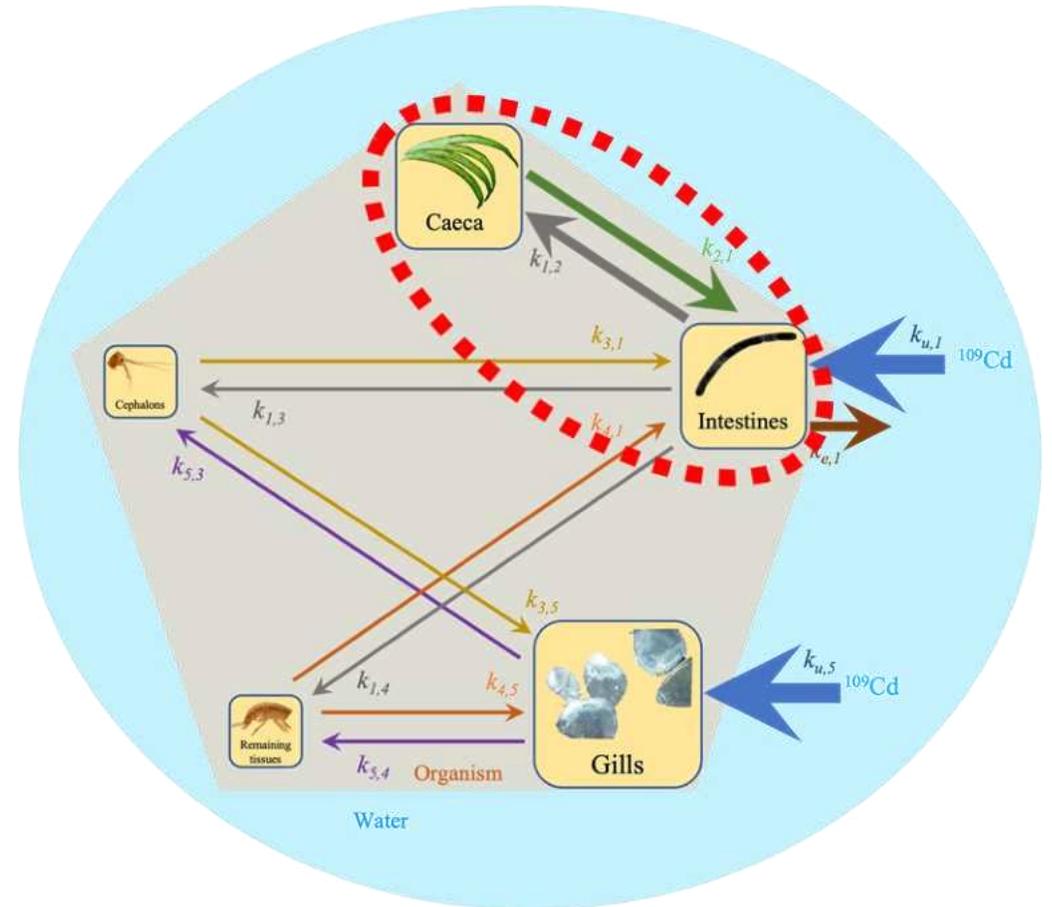
Ophélie Gestin^{a,b,c}, Christelle Lopes^a, Nicolas Delorme^c, Laura Garnero^c, Olivier Geffard^c, Thomas Lacoue-Labarthe^{b,*}



Bioaccumulation, organotropism and fate of cadmium in *Gammarus fossarum* exposed through dietary pathway

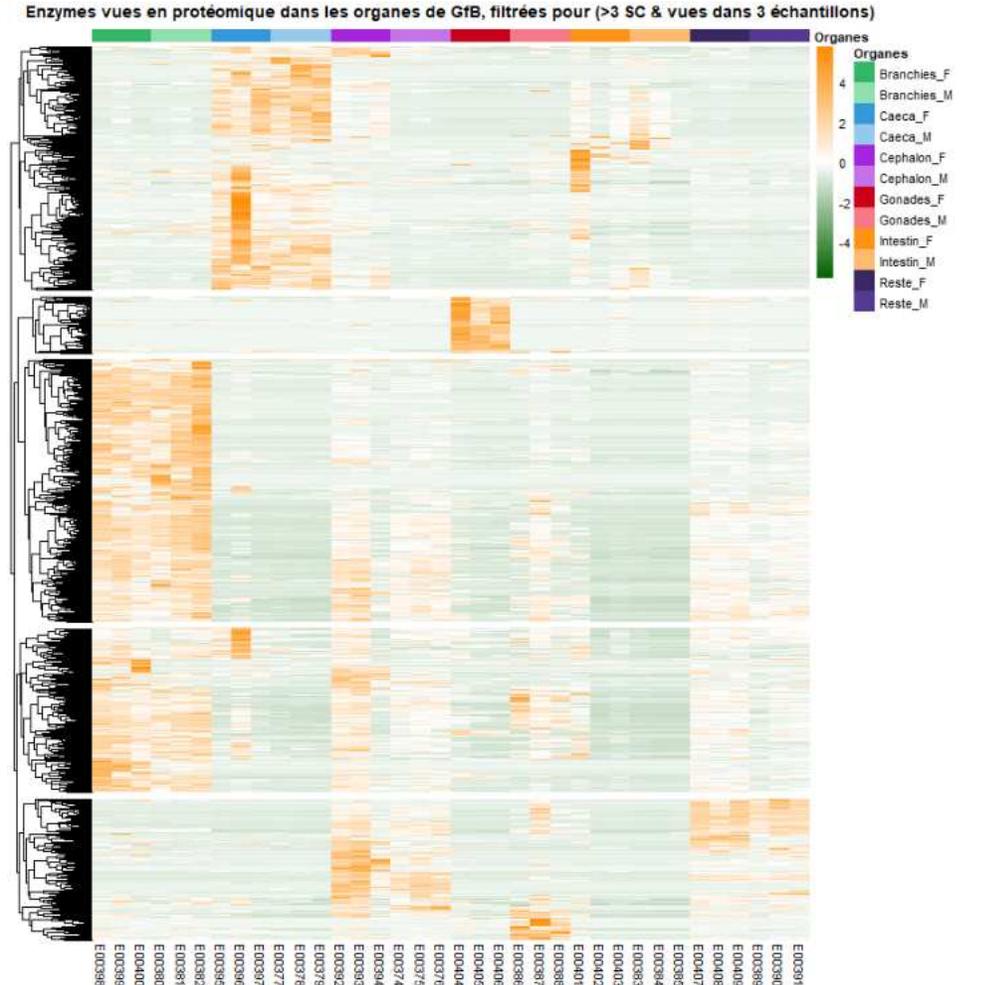
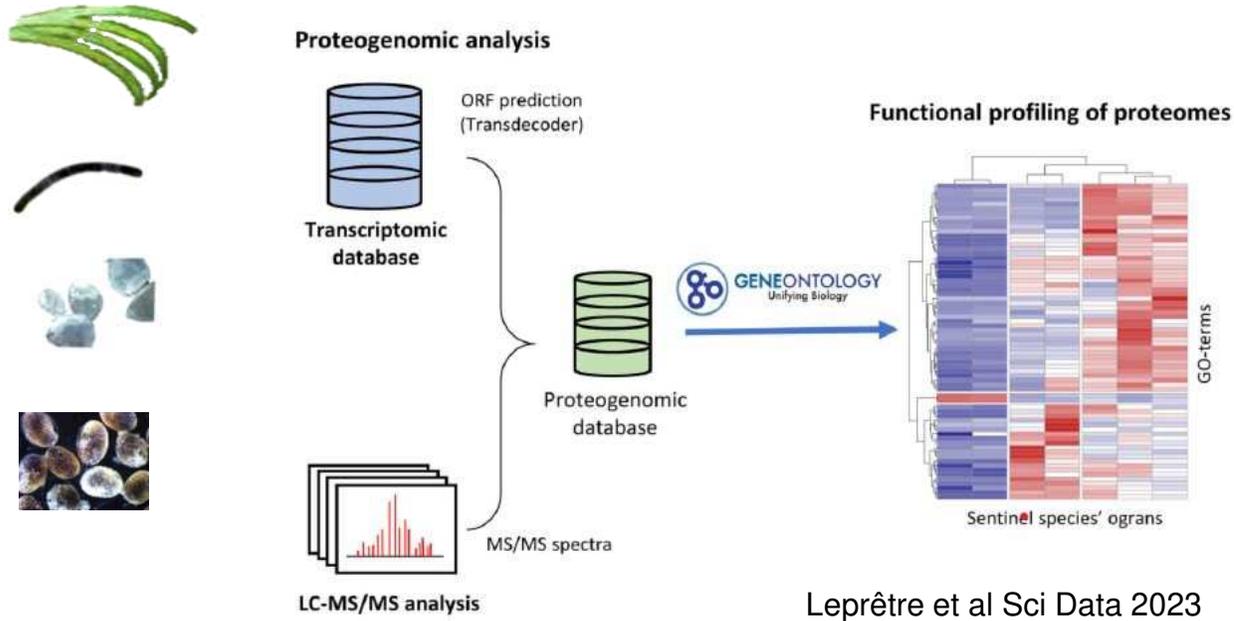
Ophélie Gestin^{a,b,c}, Olivier Geffard^c, Nicolas Delorme^c, Laura Garnero^c, Thomas Lacoue-Labarthe^{b,1}, Christelle Lopes^{a,1,*}

- La modélisation TK multi-compartiments a permis de mettre en évidence l'importance de l'axe caecum – intestin dans la régulation et l'élimination des métaux



➔ - Caecum = organe clé pour le développement de biomarqueurs protéomiques

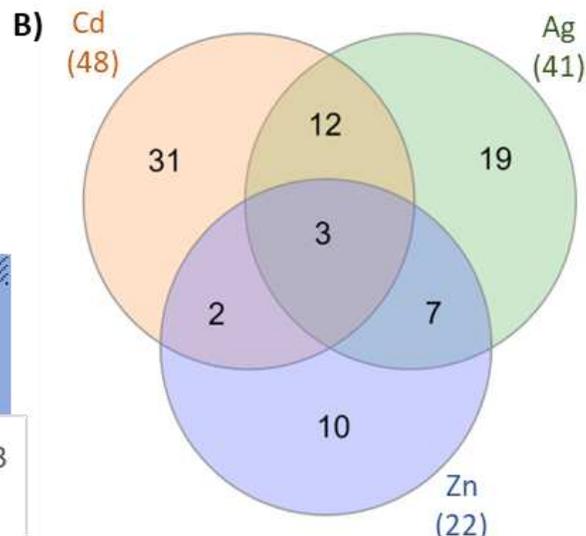
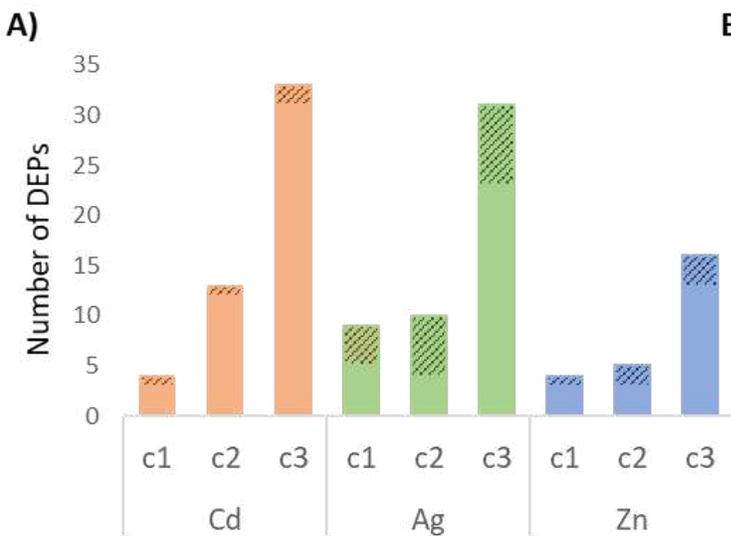
Découverte moléculaire, caractérisation du protéome de *Gammarus fossarum* / la protéogénomique



Profils protéomiques organo-spécifique

Caractérisation moléculaire des voies métaboliques

Effet de contaminants / profils protéiques



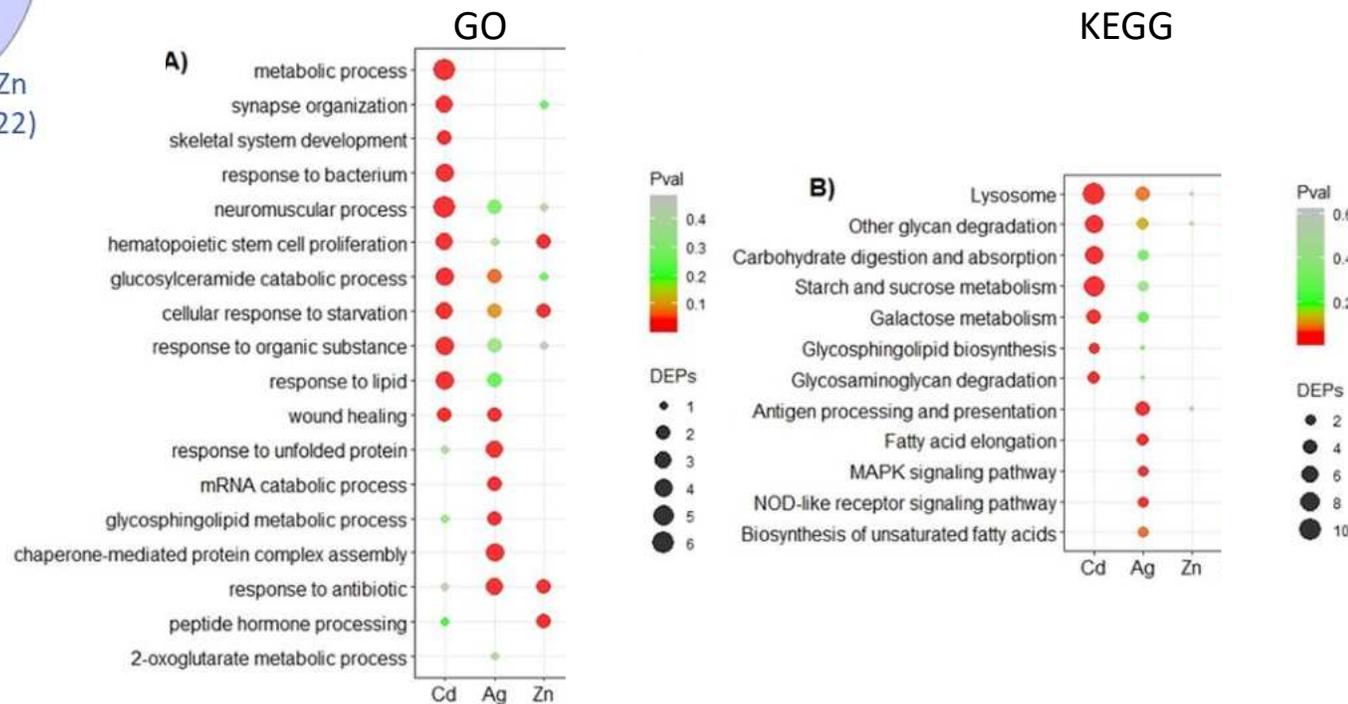
765 peptides rapporteurs de 470 protéines chez les caecum

Des fonctions / protéines spécifiques des métaux testés

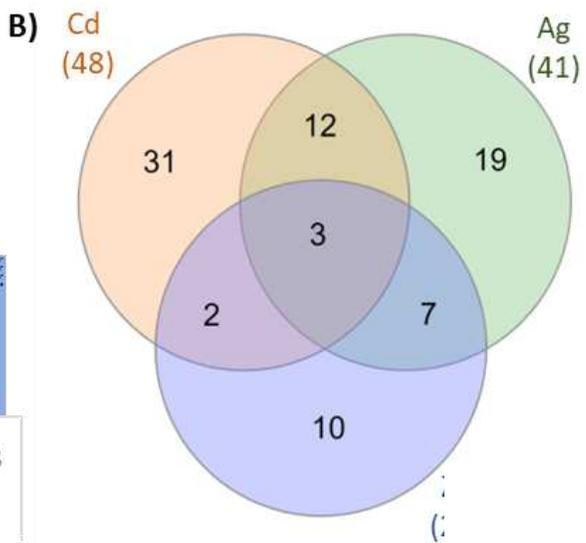
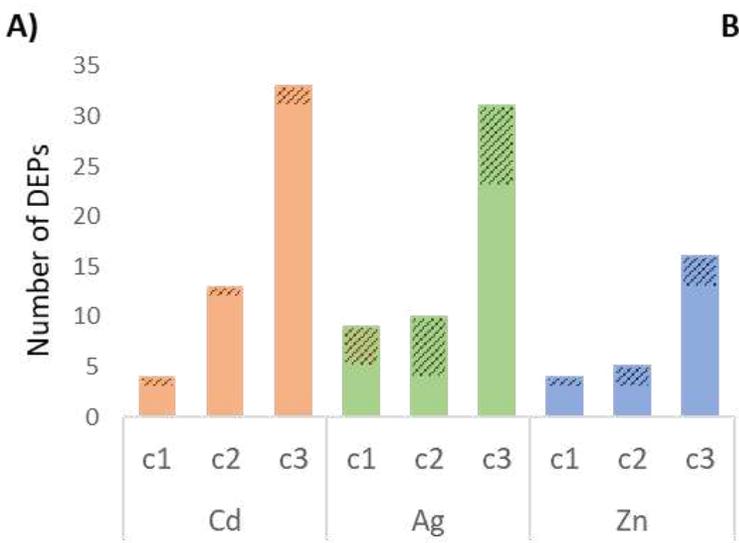


Dynamic Multiple Reaction Monitoring of amphipod *Gammarus fossarum* caeca expands molecular information for understanding the impact of contaminants

Maxime Leprêtre^{a,*}, Arnaud Chaumot^a, Rayan Aboud^a, Nicolas Delorme^a, Anabelle Espeyte^a, Arnaud Salvador^b, Sophie Ayciriex^b, Jean Armengaud^c, Marina Coquery^a, Olivier Geffard^a, Davide Degli-Esposti^{a,*}



Effet de contaminants / problématique des mélanges



765 peptides rapporteurs de 470 protéines chez les caecum

- Profils qui évoluent avec le mélange (biodisponibilité ou réponses moléculaires)
- Difficile de proposer des biomarqueurs spécifiques
- Biomarqueurs des fonctions physiologiques / ou sans *a priori* intégrant la complexité des milieux

Science of the Total Environment 893 (2023) 164875



Contents lists available at ScienceDirect

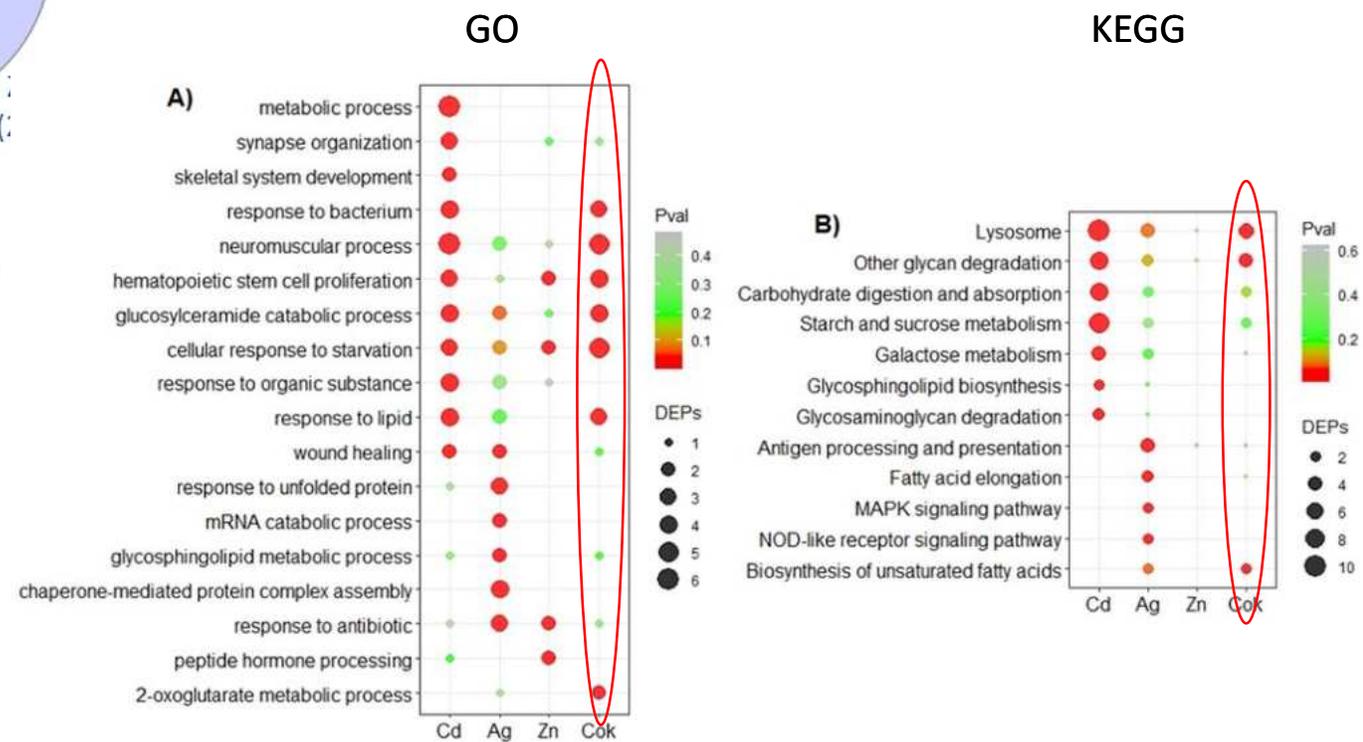
Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



Dynamic Multiple Reaction Monitoring of amphipod *Gammarus fossarum* caeca expands molecular information for understanding the impact of contaminants

Maxime Leprêtre^{a,*}, Arnaud Chaumot^a, Rayan Aboud^a, Nicolas Delorme^a, Anabelle Espeyte^a, Arnaud Salvador^b, Sophie Aycirix^b, Jean Armengaud^c, Marina Coquery^a, Olivier Geffard^a, Davide Degli-Esposti^{a,*}

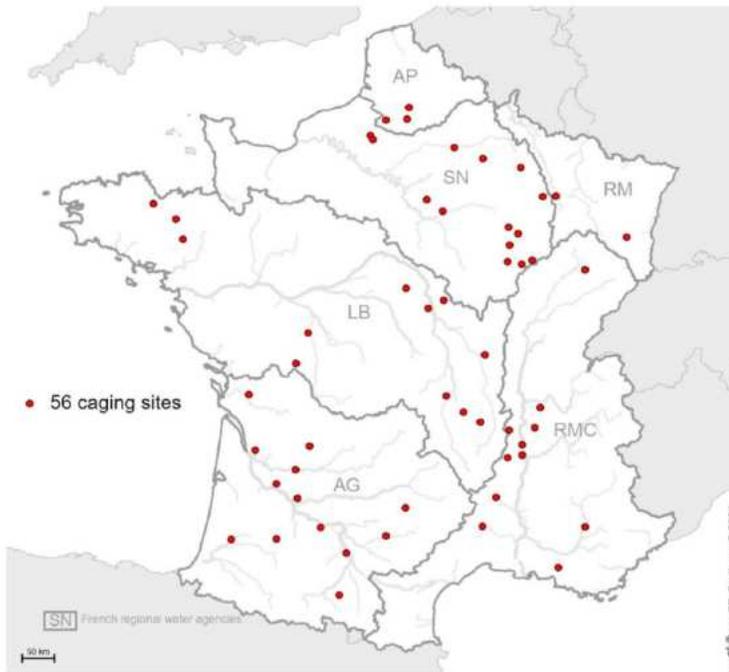


Intégrer la complexité des milieux naturels dans la découverte des biomarqueurs, preuve de concept chez des gammares calibrés engagés



Multiple reaction monitoring mass spectrometry for the discovery of environmentally modulated proteins in an aquatic invertebrate sentinel species, *Gammarus fossarum*[®]

Maxime Leprêtre^{*,} Olivier Geffard^{*,} Anabelle Espeyte^{*,} Julien Faugere^{*,} Sophie Ayciriex^{*,} Arnaud Salvador^{*,} Nicolas Delorme^{*,} Arnaud Chaumot^{*,} Davide Degli-Esposti^{*,}



Quantification : Identification et proposition de peptides de ménage permettant de normaliser et de comparer l'ensemble des peptides mesurés

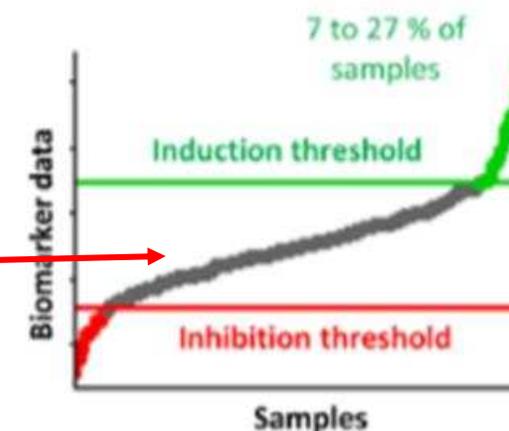
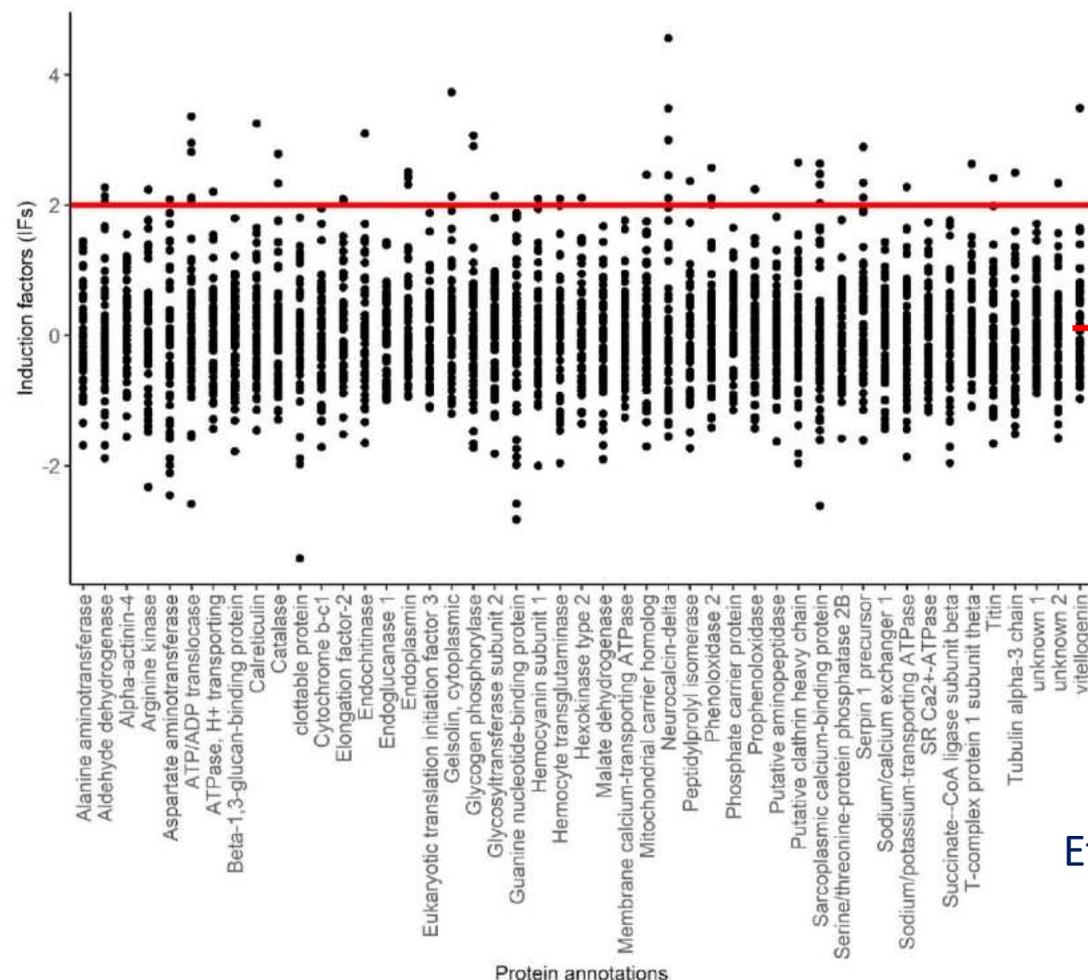
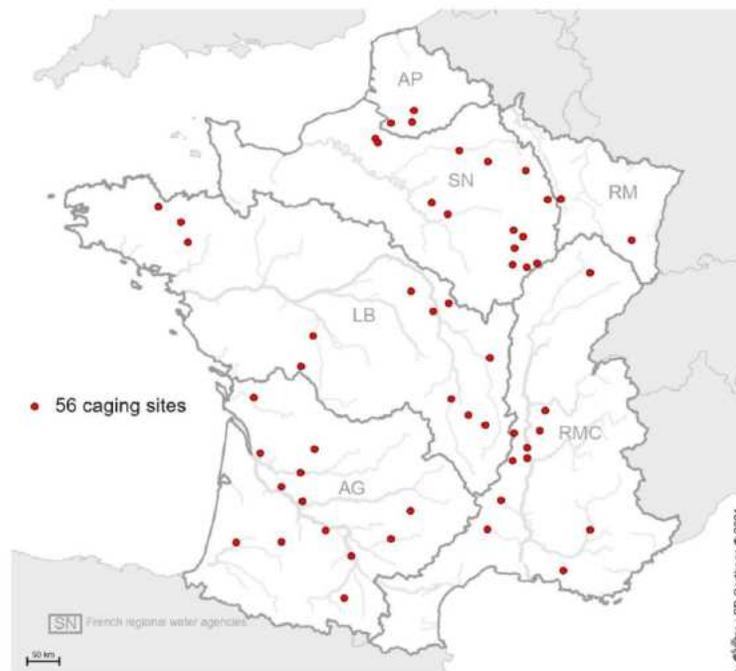
Candidate HKPs	Blast annotations	Global Rank	Normalized datasets					
			Median ISTDs		Median		Quantile	
			M-value	Rank	M-value	Rank	M-value	Rank
AVIDSGEGLIR	Alpha-actinin-4	1	0.316	1	0.336	1	0.342	2
LPTVAIIYR	Citrate synthase, mitochondrial	2	0.317	2	0.338	2	0.346	3
LGFLTFCPTNLGTTIR	Arginine kinase	3	0.321	4	0.339	3	0.353	5
LFEVGGPPSCTK	protein phosphatase 2B	4	0.318	3	0.343	4	0.361	11
IQVDPAK	Phosphate carrier protein, mitochondrial	5	0.334	10	0.344	5	0.352	4
IINEGAALLR	protein phosphatase 2B	6	0.328	7	0.351	9	0.354	6
FGFYEVFK	Phosphate carrier protein, mitochondrial	7	0.322	5	0.348	8	0.365	10

Intégrer la complexité des milieux naturels dans la découverte des biomarqueurs, preuve de concept chez des gammars calibrés engagés



Multiple reaction monitoring mass spectrometry for the discovery of environmentally modulated proteins in an aquatic invertebrate sentinel species, *Gammarus fossarum**

Maxime Leprêtre^a, Olivier Geffard^a, Anabelle Espeyte^a, Julien Faugere^b, Sophie Ayciriex^b, Arnaud Salvador^b, Nicolas Delorme^a, Arnaud Chaumot^a, Davide Degli-Esposti^c



Etablir profils / stress - pression
→ ANR

Thèses en cours Ecotox-LAMA:

Victor (spéciation Hg et bioaccumulation)

et Juliette (métaux en mélange et toxicité et bioaccumulation)

Projet PACS: **protéomique terrain** (profils protéomique associé au sites reprotoxique)

Construction d'un profil de poste CR à l'interface chimie-écotox

Jeu sérieux CAUSERIE : favoriser les actions collectives visant à concilier agriculture et qualité de l'eau dans les têtes de bassins versants



© L. Liqer, INRAE



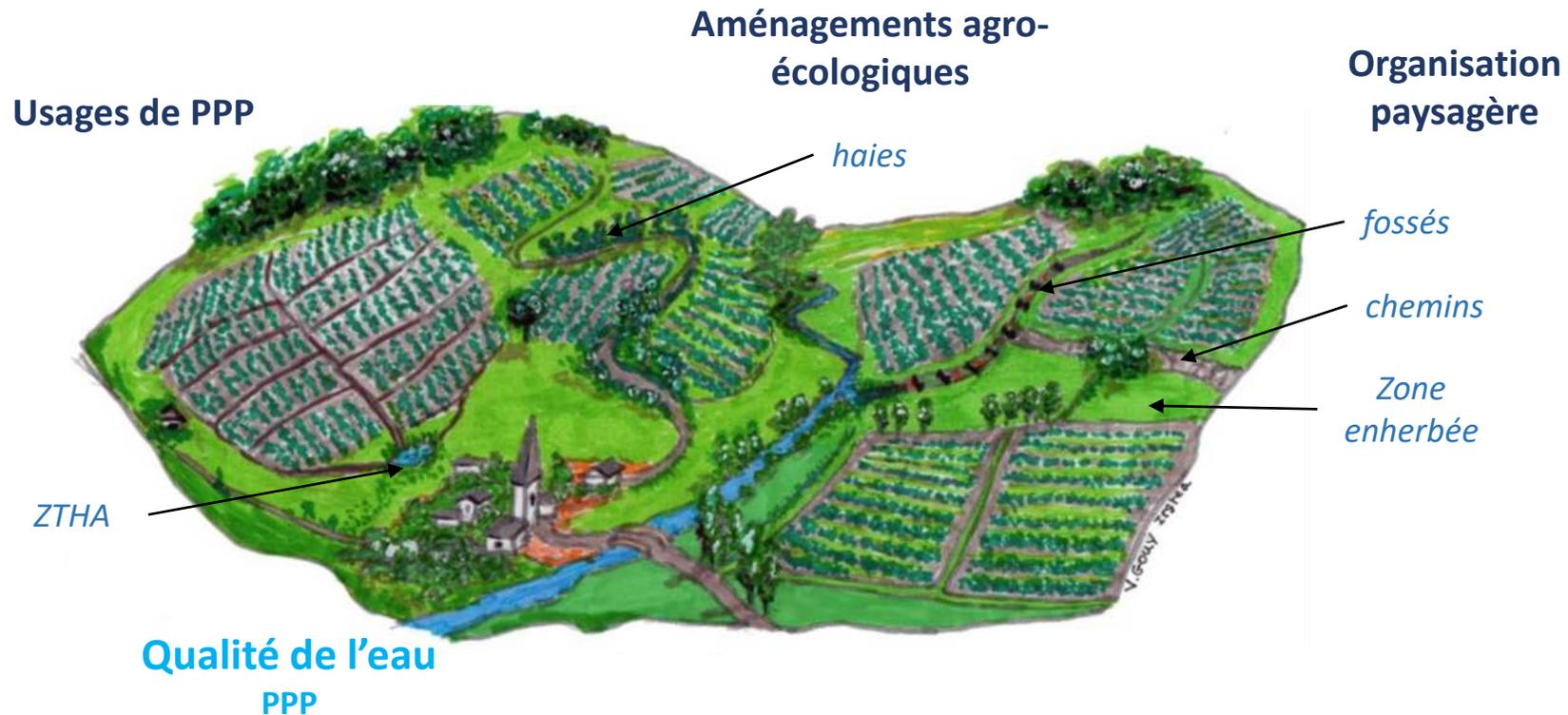
© G. Abrami, INRAE



RÉDUIRE ET AMÉLIORER
L'UTILISATION DES PHYTOS



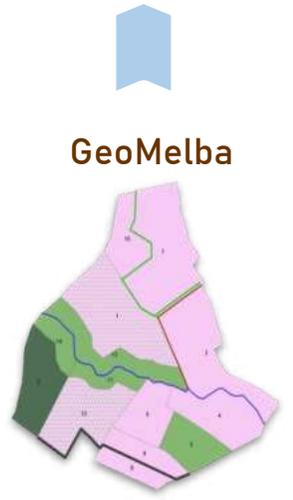
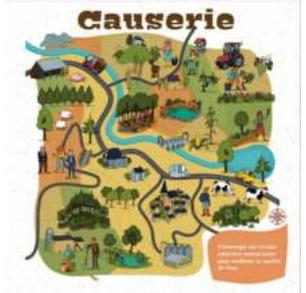
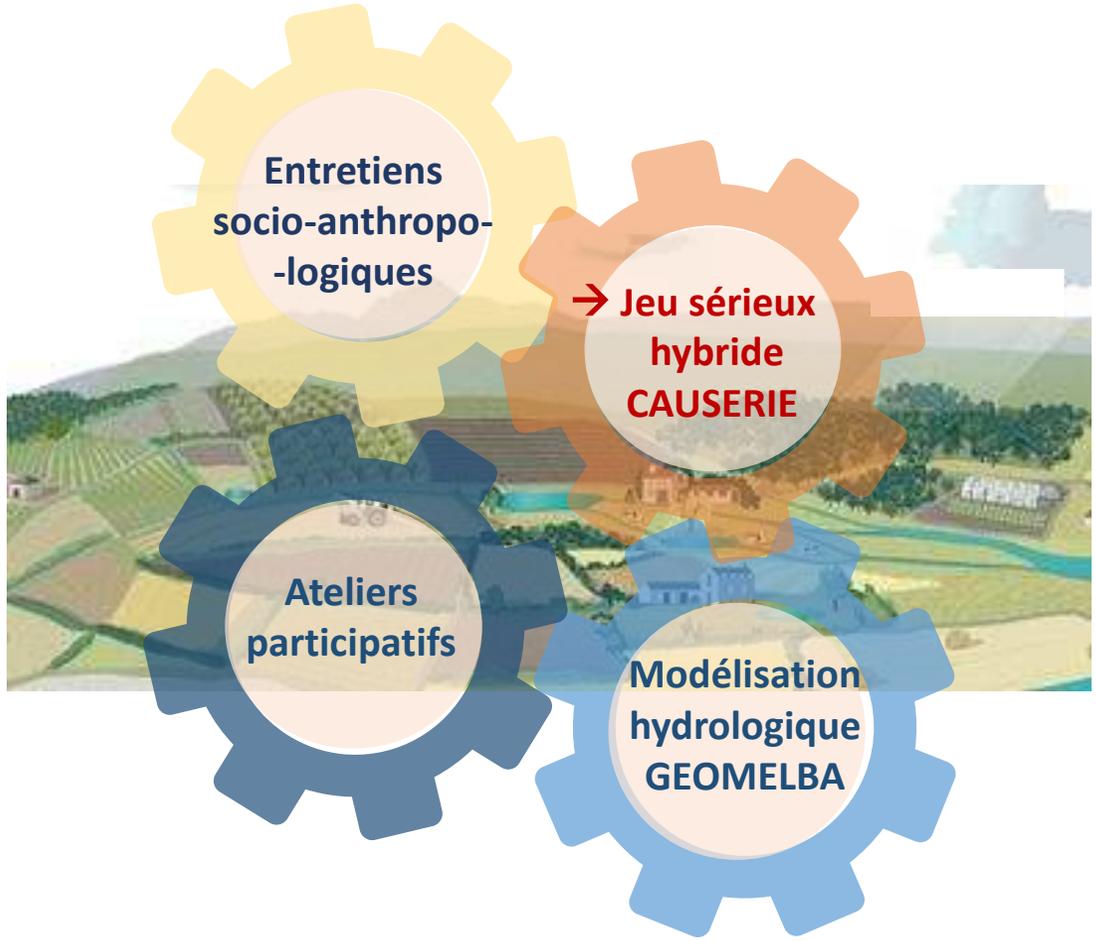
De l'exploitation agricole au bassin versant



Objectifs des projets SPIRIT et DIALECTIC:

- Dépasser les seules actions individuelles et interactions bilatérales entre agriculteurs et autorités publiques
- Explorer les actions collectives au niveau du paysage et la concertation entre les acteurs territoriaux

Méthodologie



Mises en situation des acteurs du territoire via le jeu Causerie

Questionner les actions collectives et les leviers de leur mise en œuvre

Mise en débat de scénarios d'évolution contrastés

- ➡ Viticulture (type Beaujolais)
- ➡ Polyculture-élevage (type Monts du Lyonnais)

Illustration de résultats



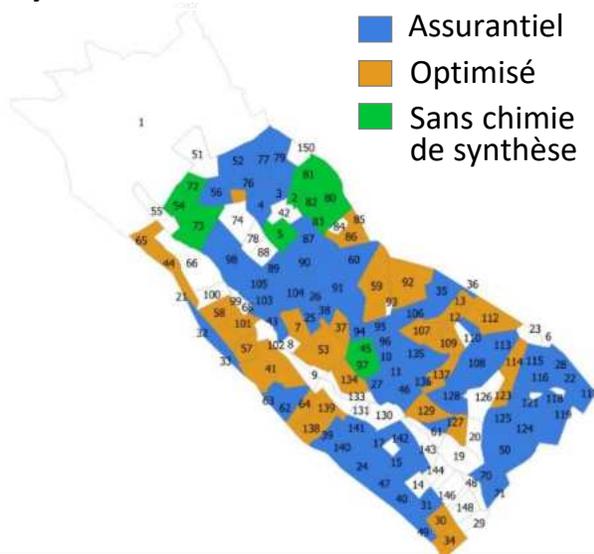
GEOMELBA SPIRIT 1-1

1

Systèmes de culture :



Elements paysagers
— haie
— fossé nu ou bétonn
— chemin nu
— route
— bande enherbée
— cours d'eau



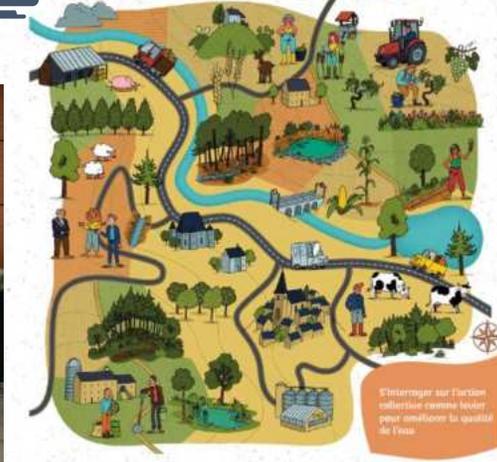
■ Assurantiel
■ Optimisé
■ Sans chimie de synthèse

Mises en situation :
Exploration de scénarios

2



Causerie



- Participants :
 - ✓ avec des professionnels (agriculteurs, conseil, syndicat de bassin, collectivités locales, instituts techniques, associations environnementales, etc.)
 - ✓ avec des étudiants en formation agricole, en IUT ou master 2 H20
- Principaux enseignements :
 - ✓ Le jeu a été jugé réaliste par les professionnels
 - ✓ Le modèle facilite les échanges sur les dynamiques physiques et sociotechniques
 - ✓ Sa capacité à générer des actions collectives dépend des joueurs
 - ✓ Le jeu a été jugé intéressant pour faciliter la concertation dans des situations de « blocage »

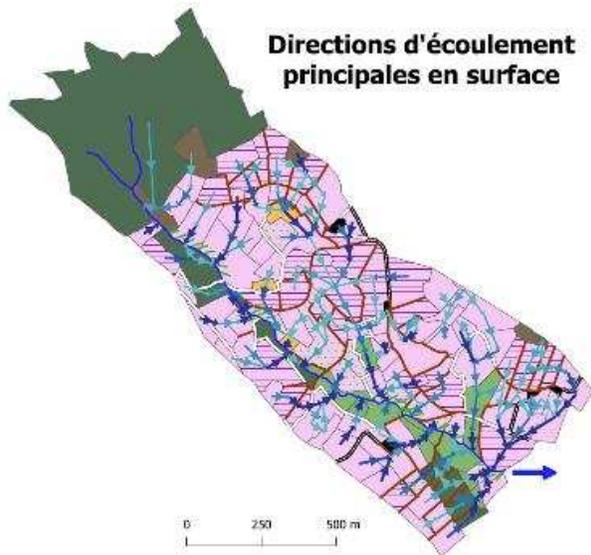
Illustration de résultats



GEOMELBA SPIRIT 1-1

1

- vigne
 - verger
 - prairie
 - bois
 - friche
 - habitation
 - présence de rases
 - enherbement
- Elements paysagers**
- haie
 - fossé nu ou bétonné
 - chemin nu
 - route
 - bande enherbée
 - cours d'eau



Mise en débat de scénarios d'évolution contrastés :

3

	Scénario « initial »	Scénario « dans la continuité »	Scénario « agroécologie avancée »
	Assurantiel dominant et très faible restructuration	Evolution modérée des SC en lien avec un faible taux de restructuration (+ 0,3 % /an en moyenne)	Forte évolution des SC en lien avec un fort taux de restructuration (+ 1,2 % /an en moyenne)
Systèmes de culture (SC)			
Couverture du sol	0,2% restructuration Enherbement 24%	15 % restructuration Enherbement 60%	60 % restructuration Enherbement 60%
Restructuration			
Eléments paysagers	Peu d'éléments paysagers	Idem scénario initial	haïes : + 0,7 km / km ²

Indicateurs au bassin versant :

4

note de contamination à l'exutoire (GeoMelba), bilan carbone (ACV, IFV), risque d'érosion

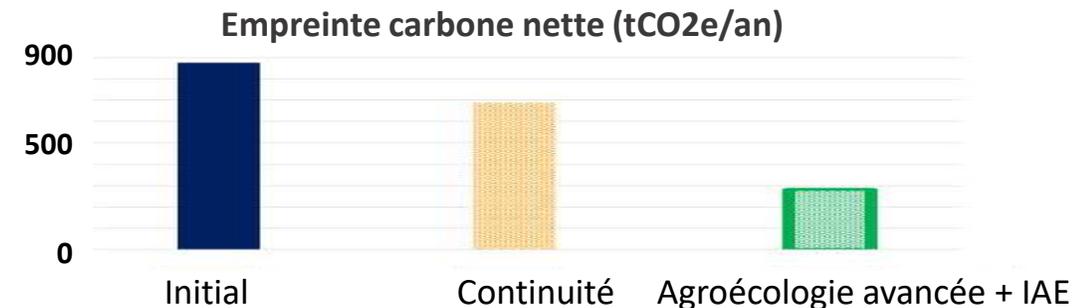


Illustration de résultats



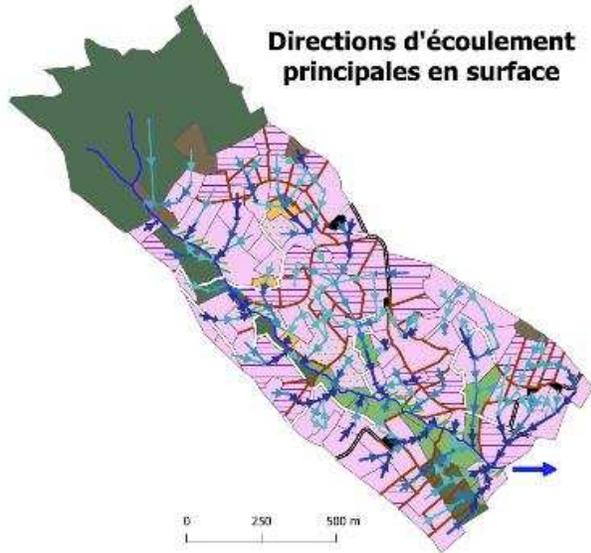
GEOMELBA SPIRIT 1-1

1

- vigne
- verger
- prairie
- bois
- friche
- habitation
- présence de rases
- enherbement

Elements paysagers

- haie
- fossé nu ou bétonné
- chemin nu
- route
- bande enherbée
- cours d'eau



Mise en débat de scénarios d'évolution contrastés :

3



Restitution Beaujolais, 6 décembre 2023

Echanges propices à l'émergence de freins et leviers aux évolutions collectives :

- Evaluer les coûts/bénéfices et définir des trajectoires de transition
- Privilégier des enjeux au cœur du métier d'agriculteur *avec effet indirect sur les usages de PPP* (fertilité des sols, besoins en eau, stratégie énergétique)

Diffusion et perspectives



Jeu CAUSERIE actuel disponible en ligne :

<https://polldiff.lyon-grenoble.hub.inrae.fr/recherche/gestion-integree-du-bassin-versant/jeu-serieux-causerie>



Offre de formation d'animateurs par LISODE ou **d'animation** à destination des gestionnaires de l'eau, collectivités locales, collectifs constitués (coopérative agricole, groupes d'agriculteurs)

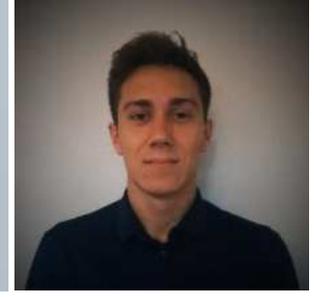


Transfert du jeu actuel auprès d'Eau de Paris



Les auteurs du jeu et des scénarios :

INRAE
RiverLy



INRAE
G-Eau



LISODE



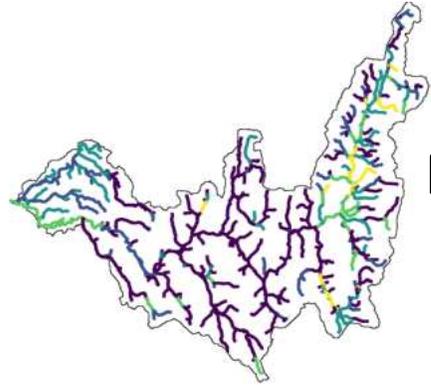
Institut Français de la Vigne et du Vin

Lycée agricole Belleville

Syndicat des rivières
du Beaujolais

Chambre d'agriculture
du Rhône

Louise Mimeau, Nicolas Lamouroux, Florentina Moatar, Michael Rabotin ...
ET beaucoup de AL.

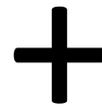


Modèle hydrologique

de prévision des débits

(ex : effets du cc.,

Scénarios de prélèvements)



Traduction écologique

- Modèles d'habitat hydraulique (préférences)
- Modèles de distributions d'espèces... f(Q, T ...)
- Modèles de fonctionnement ... (stat)



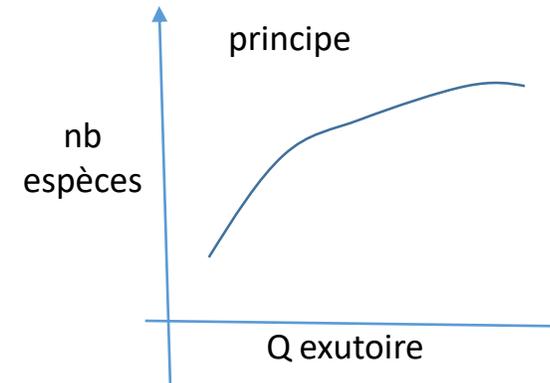
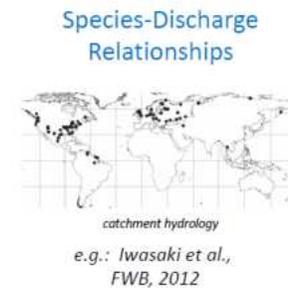
Rhône
70 territoires du sdage



Loire Bretagne
42 études en cours
Près de 85 % de la
superficie du bassin

Exemples d'applications de nos résultats = études « volumes prélevables » ou études « HMUC »

...ou ... « comment améliorer des projections globales hasardeuses »



FAIRE MIEUX!
Exemples ...



Avec de l'eau (Nicolas)



Sans eau (Louise)

Prédicteurs : débits ET
descripteurs « d'habitats » ...

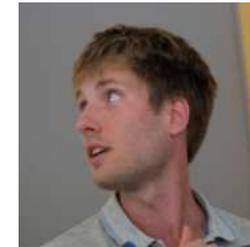
Hydraulique (\vec{V} , H , τ)
Température de l'eau
nutriments



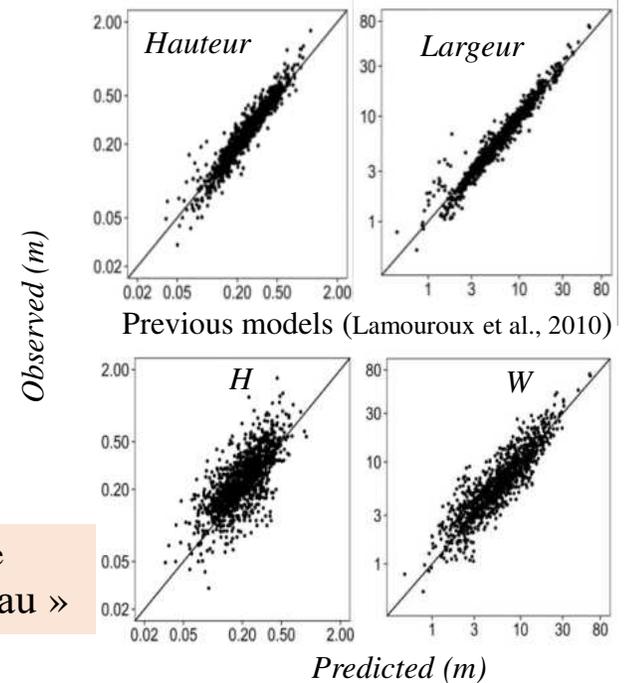
Avec de l'eau

... et on en dispose ...

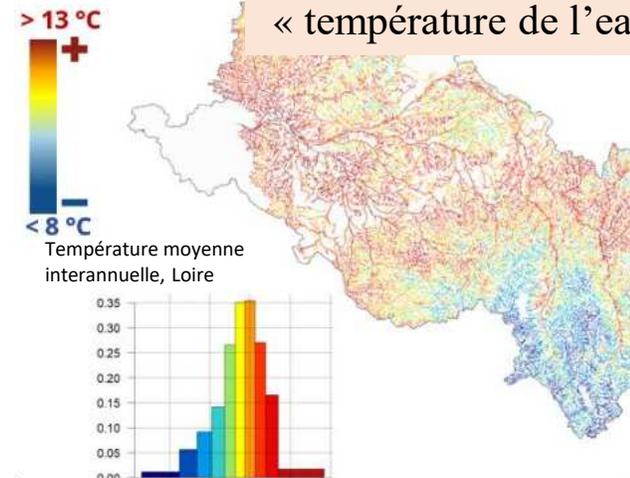
Nouveaux modèles de « géométrie hydraulique »



(Morel et al., 2020)



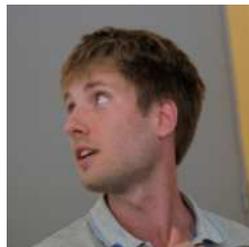
Nouveaux modèles de
« température de l'eau »



(Seyedhashemi et al., 2023)

Nutriments ...
MES

Exemple 1 (Rhône)

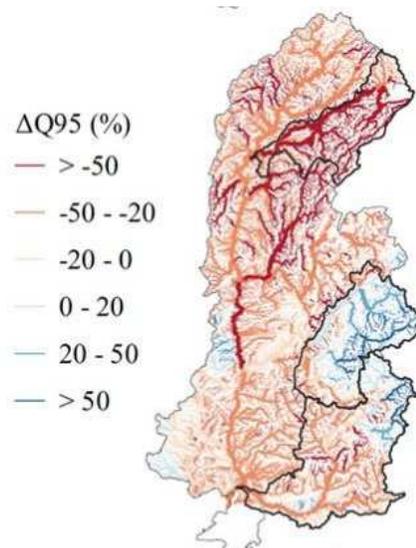


(Morel et al., 2023)

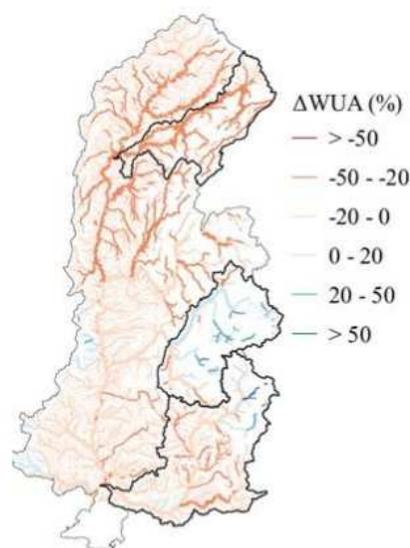
J2000 (mono modele)
Scenarios RCPs



Modèle d'habitat hydraulique
(préférences locales)
Avec hydraulique

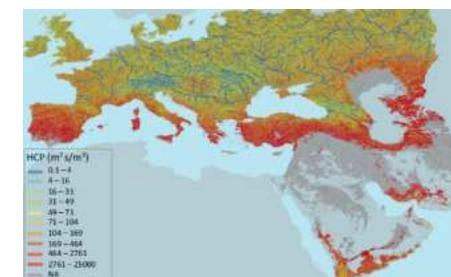


**(a) Débits d'étiage
(quantile Q95)**



**(b) Habitats favorables
(ici surface favorable au Barbeau adulte)**

À plus large échelle



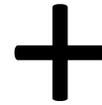
Damiani et al. (2023)
Impact sur l'habitat d'un prélèvement fixe ...

Exemple 2 (Loire)

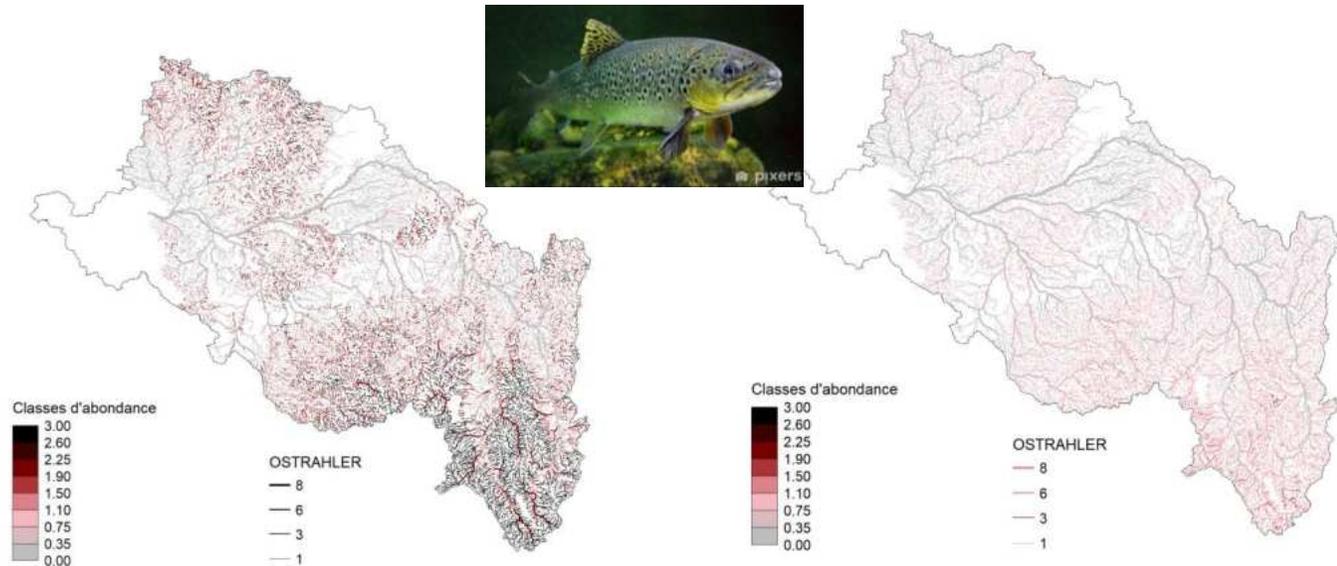
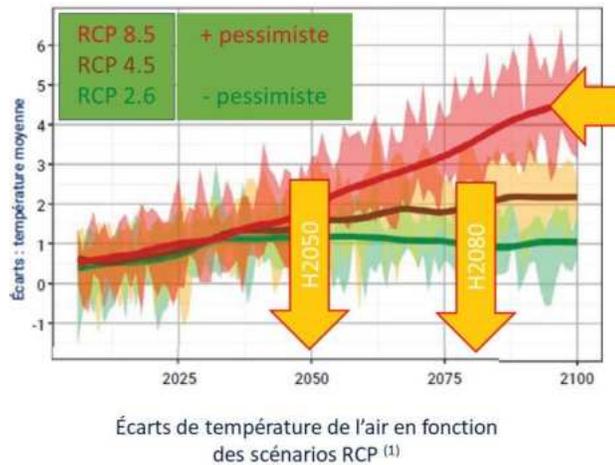


(Picard et al., 2024)

EROS + Tnet
Scenarios RCPs



Modèles d'abondance d'espèces
Avec hydraulique, T_{eau}



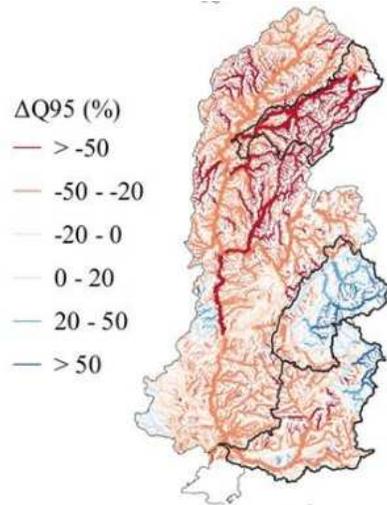
présent

2080, RCP 8.5

re - Exemple 1 !
(Rhône)



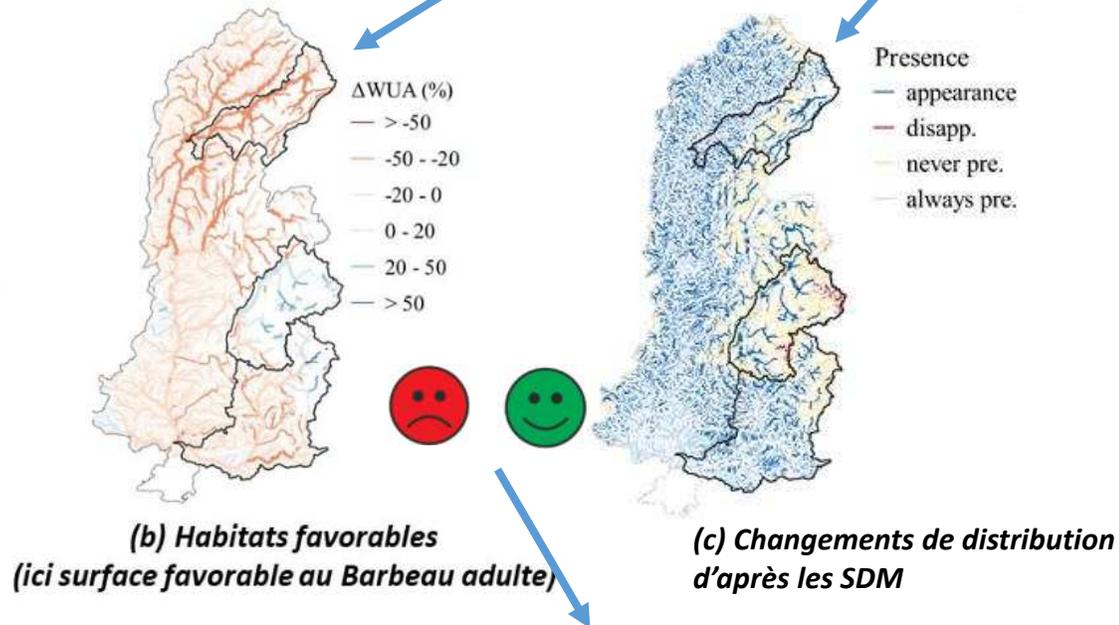
(Morel et al., 2023)



(a) Débits d'étiage
(quantile Q95)

J2000 (mono modele) + Modèle d'habitat hydraulique (préférences locales) Avec hydraulique

Et modèle de distribution d'espèces f(Q, T_{air} ...)

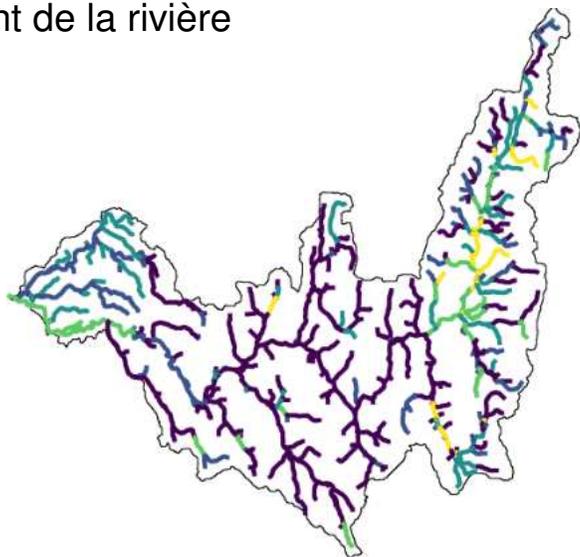


Attention à l'analyse détaillée du modèle
(analyse de sensibilité aux prédicteurs, cross validations)

Couplages modèles hydrologie-écologie : impacts de l'intermittence sur l'écologie des cours d'eau

Nombre moyen annuel de jours avec assèchement de la rivière

- 0 - 5
- 5 - 30
- 30 - 60
- 60 - 120
- 120 - 365



Modélisation hydrologique de l'intermittence dans 6 réseaux de rivières européens (climat présent + projections futures)

[Mimeau et al. 2024a; Mimeau et al., 2024b]

Fonctions écosystémiques

- Émissions de CO₂ et CH₄ [Lopez-Rojo et al., 2024a]
- Métabolisme des rivières [Lopez-Rojo et al., 2024b en révision]
- Décomposition de la litière de feuilles [Del Campo et al., 2024 in prep]

Pollution

- Fragmentation des microplastiques [Barthélémy et al., 2024]

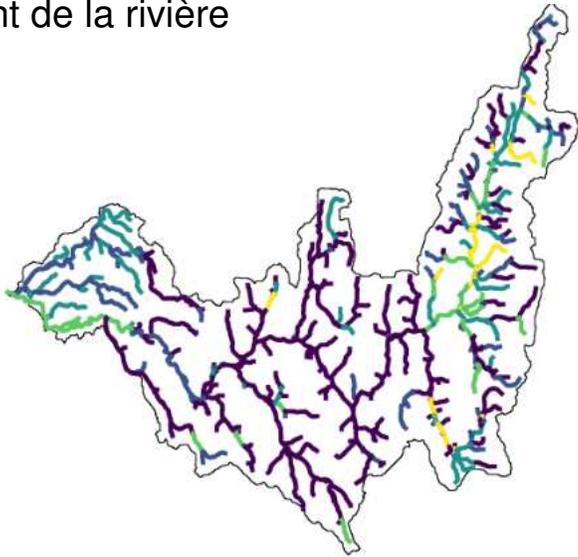
Biodiversité

- Structures spatiales et temporelles des métacommunautés [Journiac et al., 2024 in prep]

Couplages modèles hydrologie-écologie : impacts de l'intermittence sur l'écologie des cours d'eau

Nombre moyen annuel de jours avec assèchement de la rivière

- 0 - 5
- 5 - 30
- 30 - 60
- 60 - 120
- 120 - 365

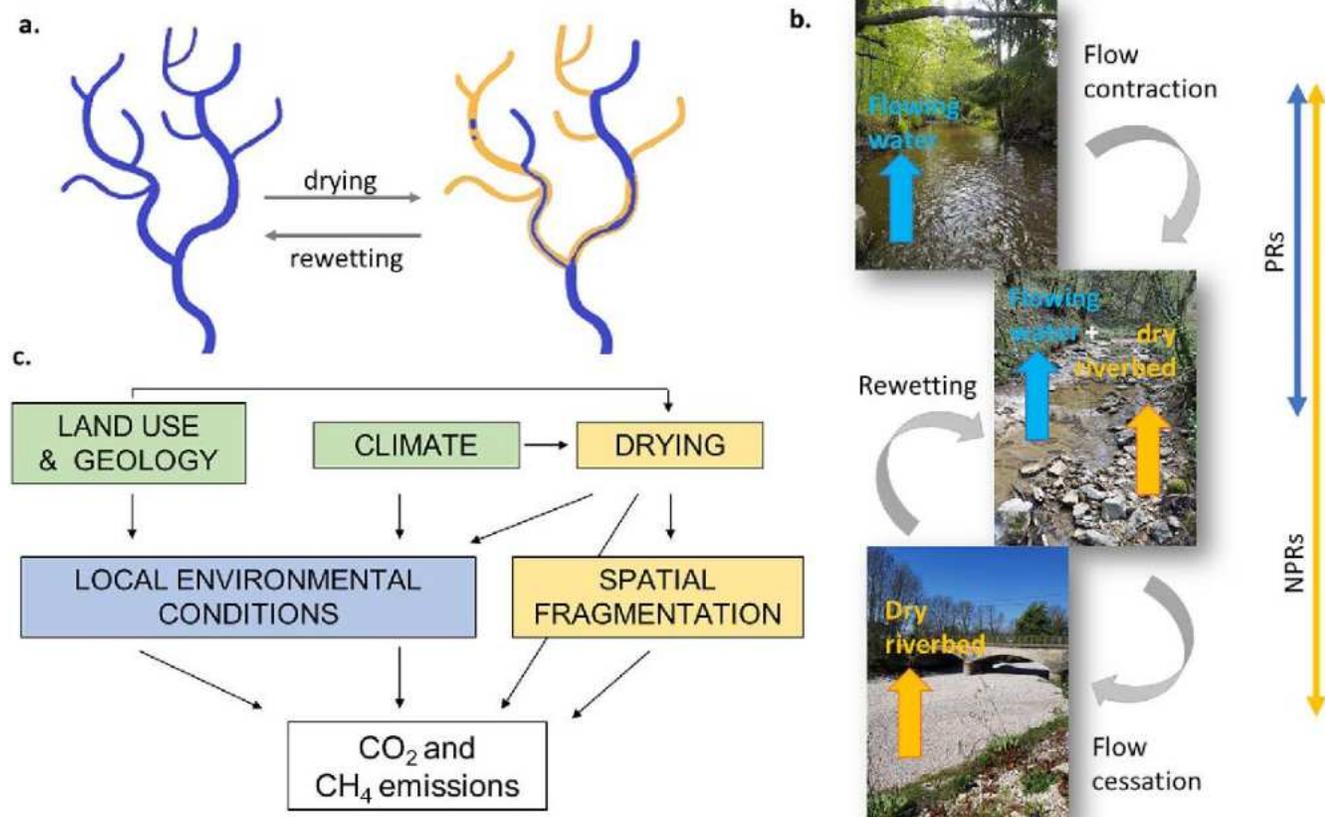


Modélisation hydrologique de l'intermittence dans 6 réseaux de rivières européens (climat présent + projections futures)

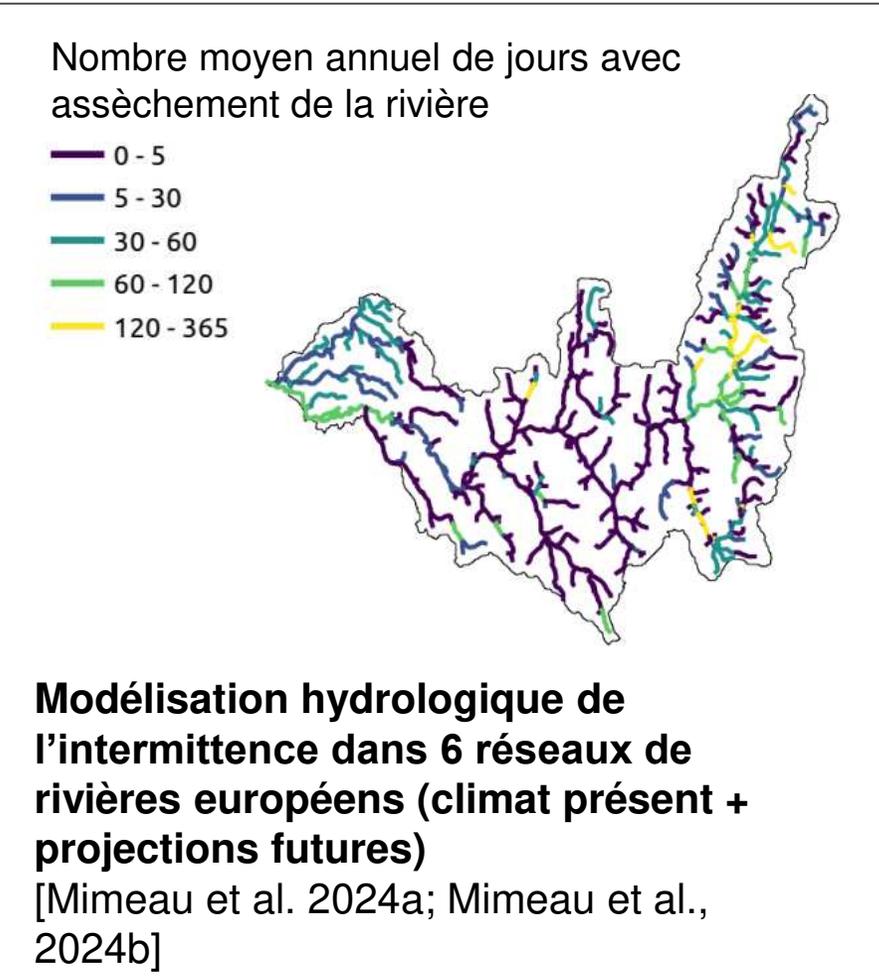
[Mimeau et al. 2024a; Mimeau et al., 2024b]



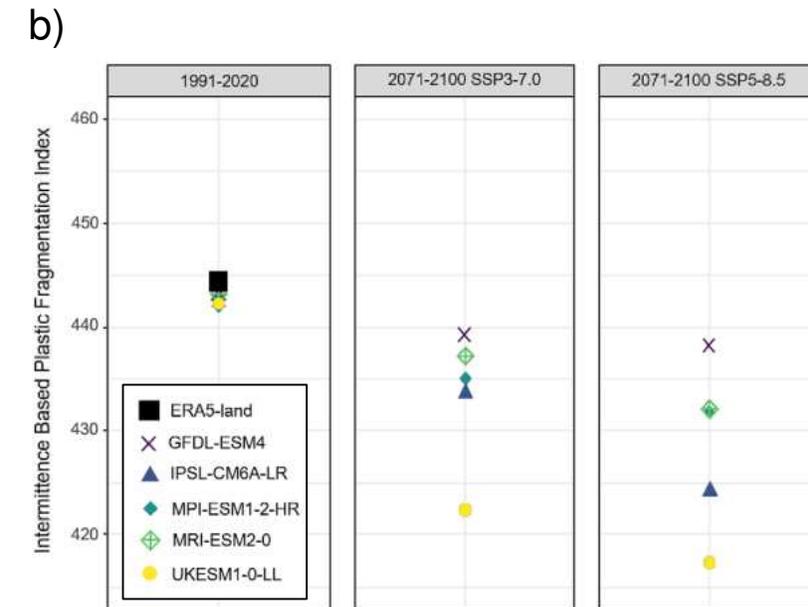
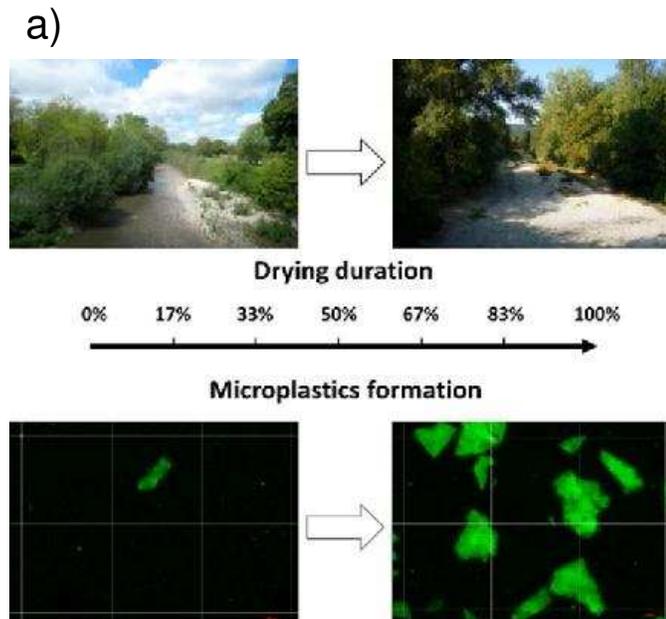
Modèle d'émissions de GES dans les réseaux de rivières intermittents [Lopez-Rojo et al., 2024a]



Couplages modèles hydrologie-écologie : impacts de l'intermittence sur l'écologie des cours d'eau

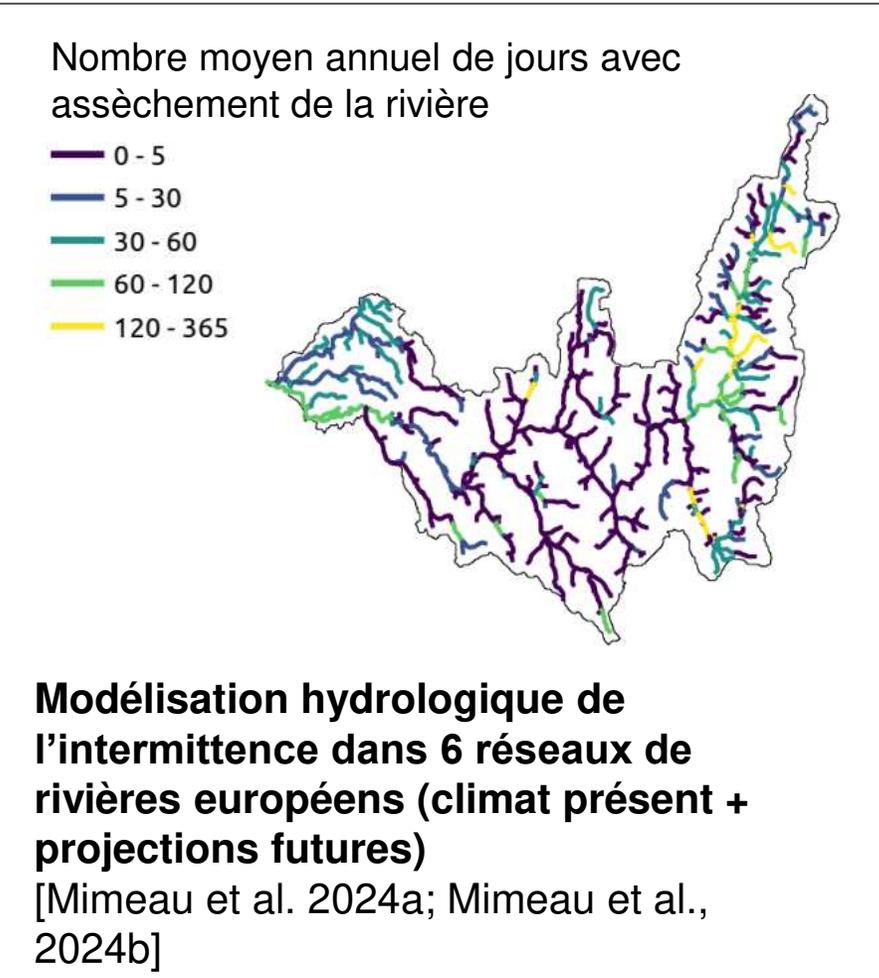


Fragmentation des microplastiques [Barthélémy et al., 2024]

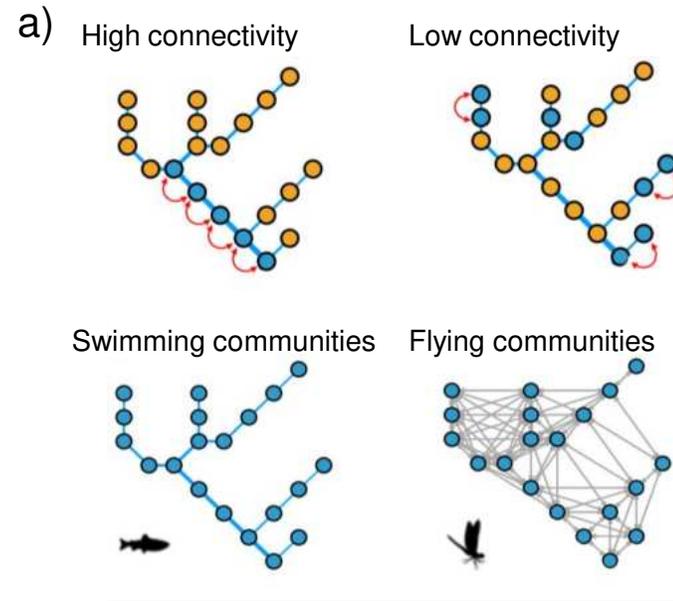


a) Conception d'un indicateur de fragmentation des micro-plastiques dans les réseaux de rivières intermittents. b) Projections de l'indicateur de fragmentation dans le bassin de l'Albarine sous des scénarios de changement climatique.

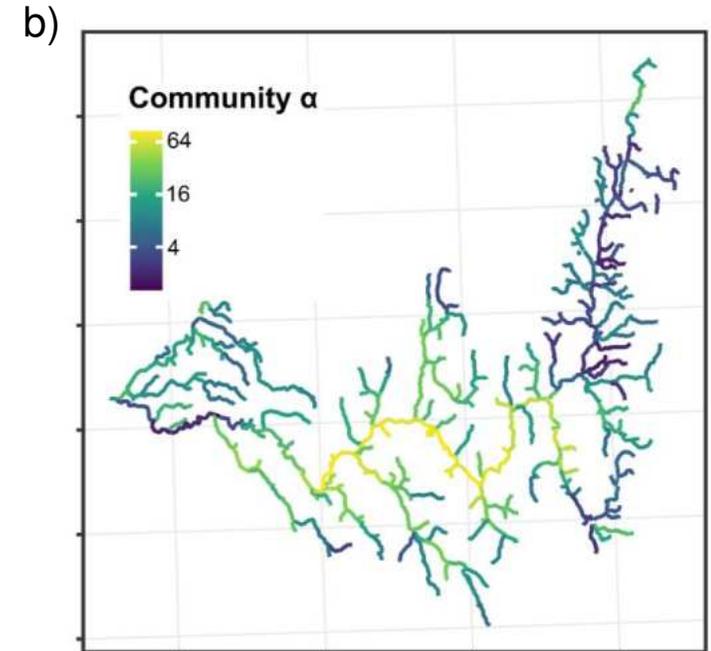
Couplages modèles hydrologie-écologie : impacts de l'intermittence sur l'écologie des cours d'eau



➔ **Structures spatiales et temporelles des métacommunautés**



[Jacquet et al., 2024]



[Journiac et al., 2024 in prep]

Couplage avec un modèle de méta-communauté (a) pour étudier les structures spatiales et temporelles des espèces dans les réseaux de rivières intermittents (b).

Plus globalement ... Coupler, chaîner ...

Forçages climatiques
scénarios

Usages
Hydroélec, agriculture
nucléaire
économie...

Jeux acteurs
perception, valeurs

drivers

Hydraulique des
tronçons

GR J2000
*Modèles hydro(géo)logiques
bassins*
Topmodel SWAT

Flux polluants

Mécanismes
biophysiques

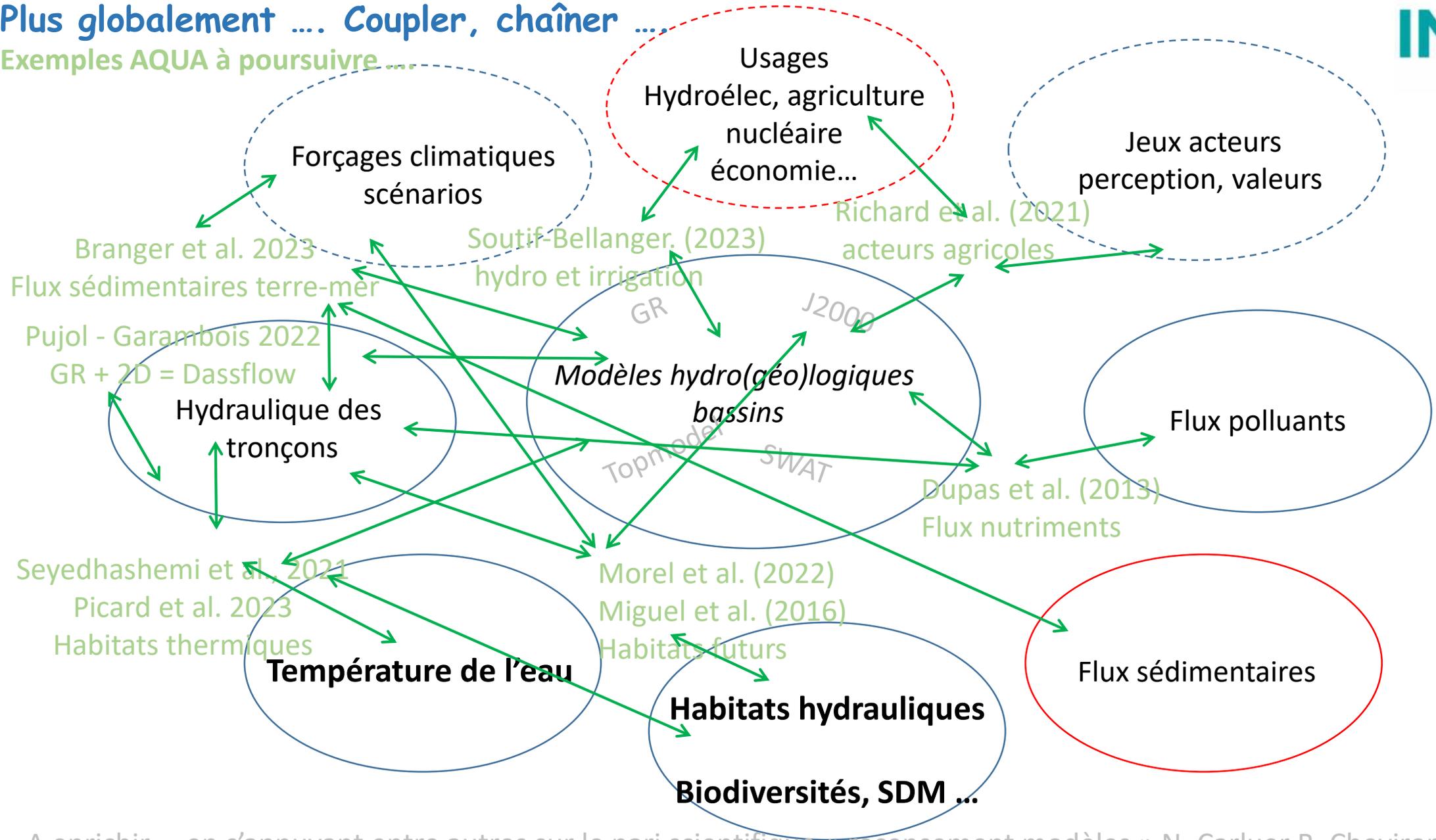
Température de l'eau

Habitats hydrauliques
Biodiversités, SDM ...

Flux sédimentaires

Plus globalement ... Coupler, chaîner ...

Exemples AQUA à poursuivre ...



A enrichir ... en s'appuyant entre autres sur le pari scientifique « recensement modèles » N. Carluer B. Cheviron

Pour aller plus loin :



Barthelemy, N., Mermillod-Blondin, F., Krause, S., Simon, L., Mimeau, L., Devers, A., Vidal, J. P. & Datry, T. (2024). The Duration of Dry Events Promotes PVC Film Fragmentation in Intermittent Rivers. *Environmental Science & Technology* <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00528>

Jacquet, C., Munoz, F., Bonada, N., Datry, T., Heino, J., & Jabot, F. (2022). Disturbance-driven alteration of patch connectivity determines local biodiversity recovery within metacommunities. *Ecography* <https://doi.org/10.1111/ecog.06199>

Journiac, L., Jabot, F., Jacquet, C., Künne, A., Messenger, M., Mimeau, L., Datry, T., Bonada, N., Munoz, F. & Chalmandrier, L. (in prep). How local disturbances and connectivity jointly shape the spatial and temporal structure of river network metacommunities.

López-Rojo, N., Datry, T., Peñas, F. J., Singer, G., Lamouroux, N., Barquín, J., Rodeles, A., Silverthorn, T., Sarremejane, R., del Campo, R., Esteves, E., Mimeau, L., Boyer, F., Künne, A., Dalvai Ragnoli, M. & Foulquier, A. (2024). Carbon emissions from inland waters may be underestimated: Evidence from European river networks fragmented by drying. *Limnology and Oceanography Letters*. <https://doi.org/10.1002/lol2.10408>

López-Rojo, N., Sarremejane, R., Foulquier, A., Singer, G., Diamond, J., Rioux, D., Miquel, C., Mulero, S., Lionnet, C., Penas, J., Rodeles, A. & Datry, T. (2024b). Alternating drying and flowing phases control stream metabolism through short- and long-term effects: insights from a river network. *Enrèvision dans JGR Biogeoscience*. <https://doi.org/10.22541/essoar.172191662.28300881/v1>

Mimeau, L., Künne, A., Branger, F., Kralisch, S., Devers, A., & Vidal, J. P. (2024a). Flow intermittence prediction using a hybrid hydrological modelling approach: influence of observed intermittence data on the training of a random forest model. *Hydrology and Earth System Sciences* <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1322>

Mimeau, L., Künne, A., Devers, A., Branger, F., Kralisch, S., Lauvernet, C., Vidal, J. P., Bonada, N., Csabai, Z., Mykrä, H., Pařil, P., Polović, L. & Datry, T. (2024b). Projections of streamflow intermittence under climate change in European drying river networks. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* <https://doi.org/10.5194/hess-2024-272>



Damiani M., Roux P., Loiseau E., Lamouroux N., Pella H., Morel M., Rosenbaum R.K. (2021) A high-resolution life cycle impact assessment model for continental freshwater habitat change due to water consumption. *Science of The Total Environment*, 782, 146664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146664>

Morel M., Pella H., Branger F., Sauquet E., Grenouillet G., Côte J., Braud I., Lamouroux N. (2023) Catchment-scale applications of hydraulic habitat models: climate change effects on fish. *Ecohydrology*, 16, e2513. <https://doi.org/10.1002/eco.2513>

Morel M., Booker D.J., Gob F., Lamouroux N. (2020) Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics. *Journal of Hydrology*, 582, 124292. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124292>

Seyedhashemi, H., Moatar, F., Vidal, J.-P., & Thiéry, D. (2023). Past and future discharge and stream temperature at high spatial resolution in a large European basin (Loire basin, France). *Earth System Science Data*, 15, 2827–2839. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2827-2023>