

EAU'listic

Evaluation intégrée de l'impact écologique de la saisonnalité des transferts de pesticides vers les cours d'eau dans un contexte de bassin versant agricole drainé

Léo PERSAT, Hocine HENINE, Julien TOURNEBIZE, Arnaud BLANCHOUIN, Fatima JOLY, Cédric CHAUMONT, Virginie ARCHAIMBAULT, Romane NESPOULET, Sophie GUILLON, Jérémie D. LEBRUN

Saisonnalité des transferts de pesticides dans un bassin versant agricole

- ❖ **Agriculture** : utilisation massive de pesticides : **69 500** tonnes vendues en 2021 (BNVD, 2023)
- ❖ **Transfert du sol vers les masses d'eau**
- ❖ **Contaminations diffuses menacent la qualité et la biodiversité des eaux douces** (Schäfer et al., 2012)

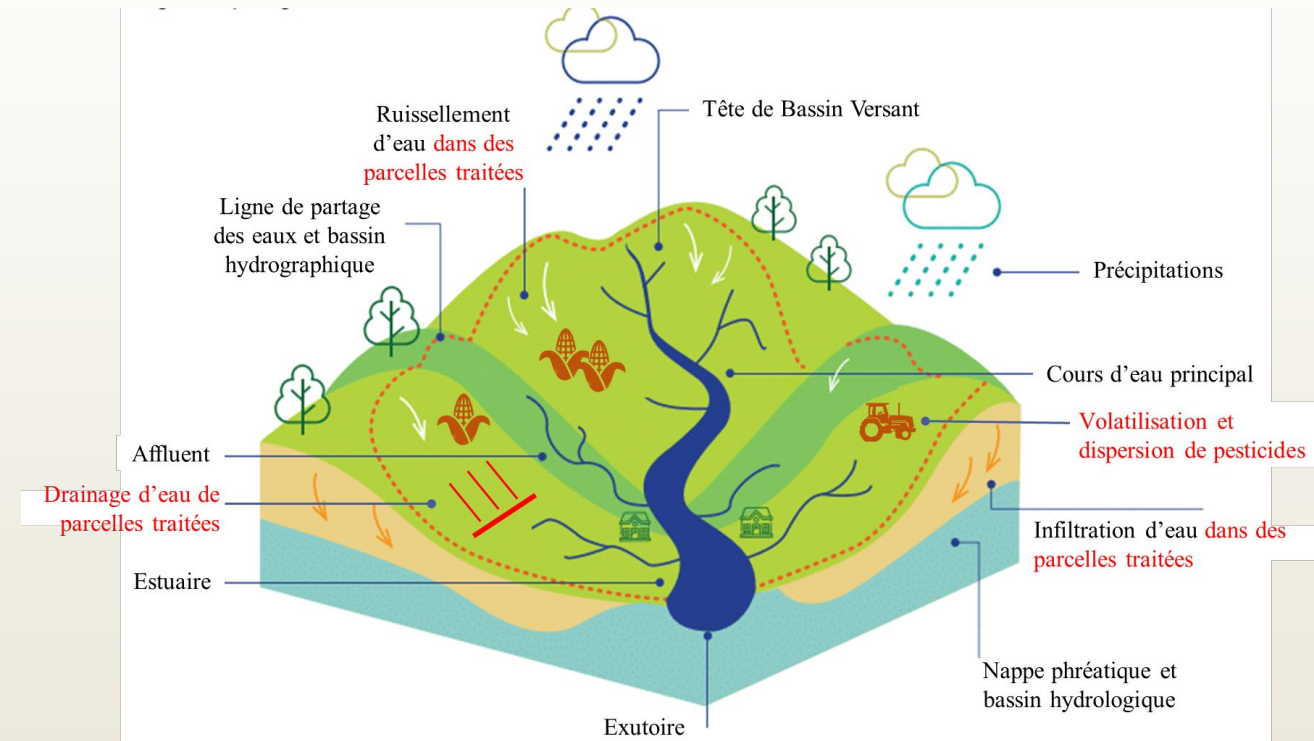


Schéma d'un bassin versant et des modes de transferts des pesticides

Saisonnalité des transferts de pesticides dans un bassin versant agricole

❖ Contamination des masses d'eau rythmé par :

- Hydrologie du bassin
- Fonctionnement du drainage
- Pratiques agricoles

SAISONNALITÉ

Herbicides en automne

Fongicides au printemps

Manque de connaissances entre exposition et impact en conditions réelles (Pesce et al., 2022)

➔ **Besoin de travaux d'approfondissement**

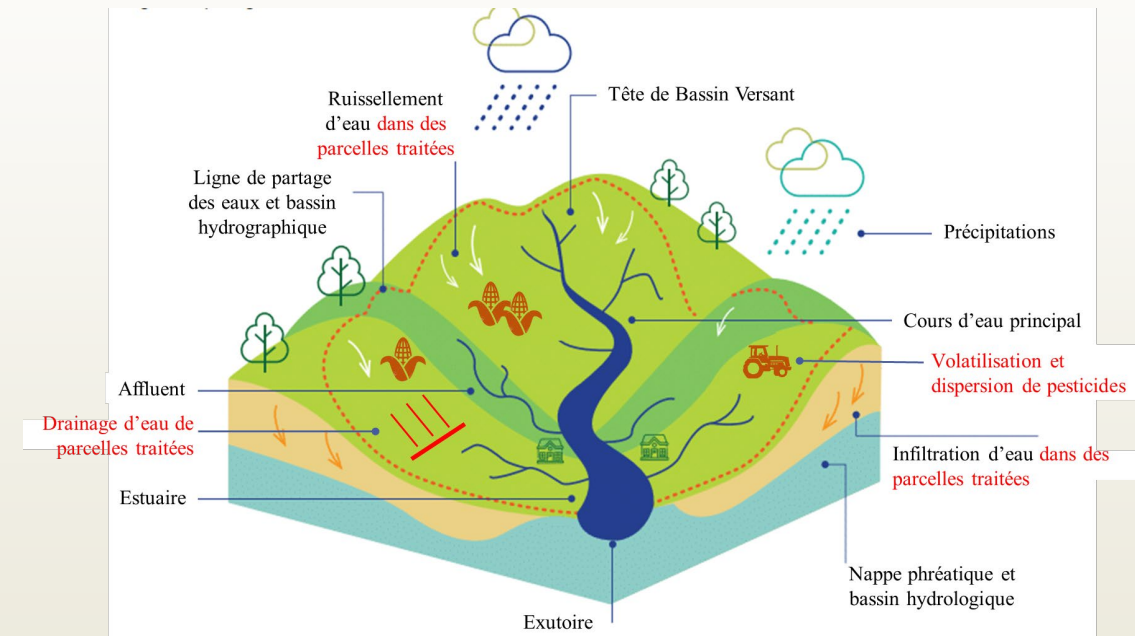
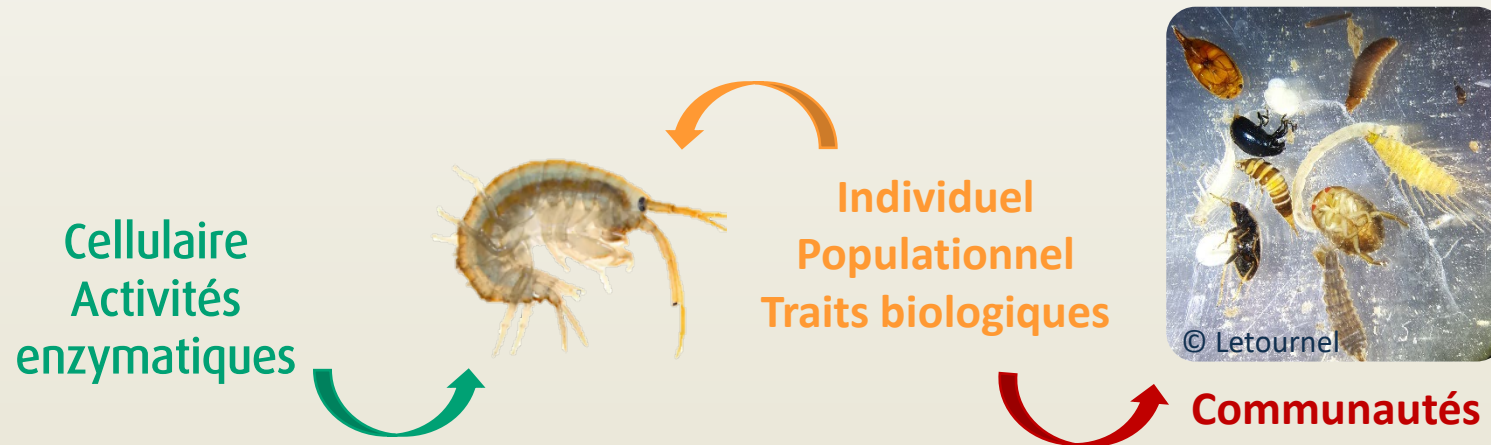


Schéma d'un bassin versant et des modes de transferts des pesticides

Biomarqueurs individuels et populationnels chez les macroinvertébrés benthiques: des outils écotoxicologiques de détection des pesticides

Macroinvertébrés benthiques : Organismes vivants sur ou dans le substrat couvrant une large gamme de niveaux trophiques comme les gammaridés

Biomarqueur multi-niveaux : Descripteurs biologiques quantitatifs qui révèlent l'exposition d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant (adapté de Lagadic et al., 1997)

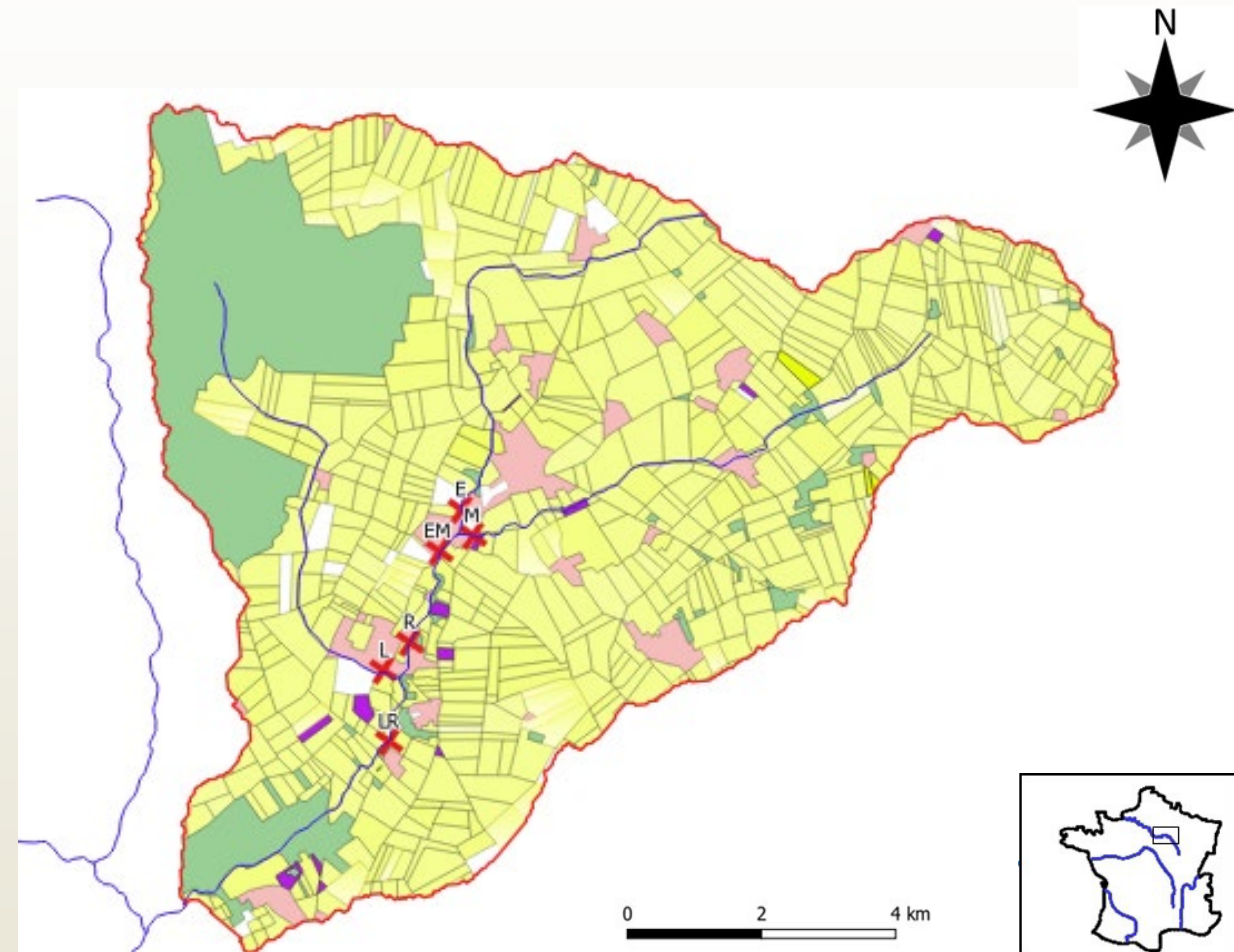


Comment évaluer l'impact de la saisonnalité des transferts de pesticides sur la biodiversité et ses fonctions ?

- 1) Approfondir les connaissances entre dynamique d'exposition et impact des pesticides à différents niveaux d'organisation biologique (de la cellule à l'écosystème)
- 2) Évaluer la réponse biologique et la variabilité inter-espèces pour différentes pressions abiotiques et déterminer la part de l'impact des pesticides dans un contexte in situ
- 3) Identification des périodes critiques d'exposition de la biodiversité : liés à la saisonnalité des transferts

Site d'étude : bassin versant de l'Orgeval

- ❖ 70 km à l'Est de Paris en Seine-et-Marne
- ❖ Infrastructures de recherche (OZCAR, ZA Seine)
- ❖ Suivi hydrologique depuis 1962
- ❖ Suivi de la qualité des eaux depuis 1975
- ❖ Bassin versant drainé à 80%
→ **contamination rapide des cours d'eau**
- ❖ 5 % des quantités de pesticides appliquées sont mesurées à l'exutoire
 - **Représentatif des bassins agricoles drainés** (10% des surfaces agricoles en France sont drainés)



Carte du bassin agricole de l'Orgeval et des 6 sites instrumentés (Seine-et-Marne, 77)

Campagnes de biosurveillance multi-paramètres



Suivis réalisés en continu sur plusieurs années hydrologiques :

Dynamique d'exposition

Hydrologique & Physico-chimique:

- ❖ Instrumentation de l'observatoire ORACLE
- Chimiques : Flux de pesticides et contaminants
- ❖ Échantillon d'eau composite
- ❖ Trappes à sédiments

Evaluations de l'impact

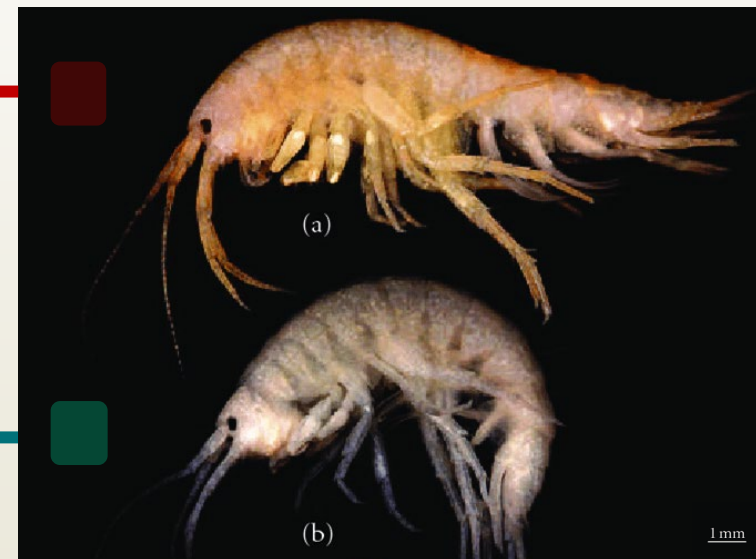
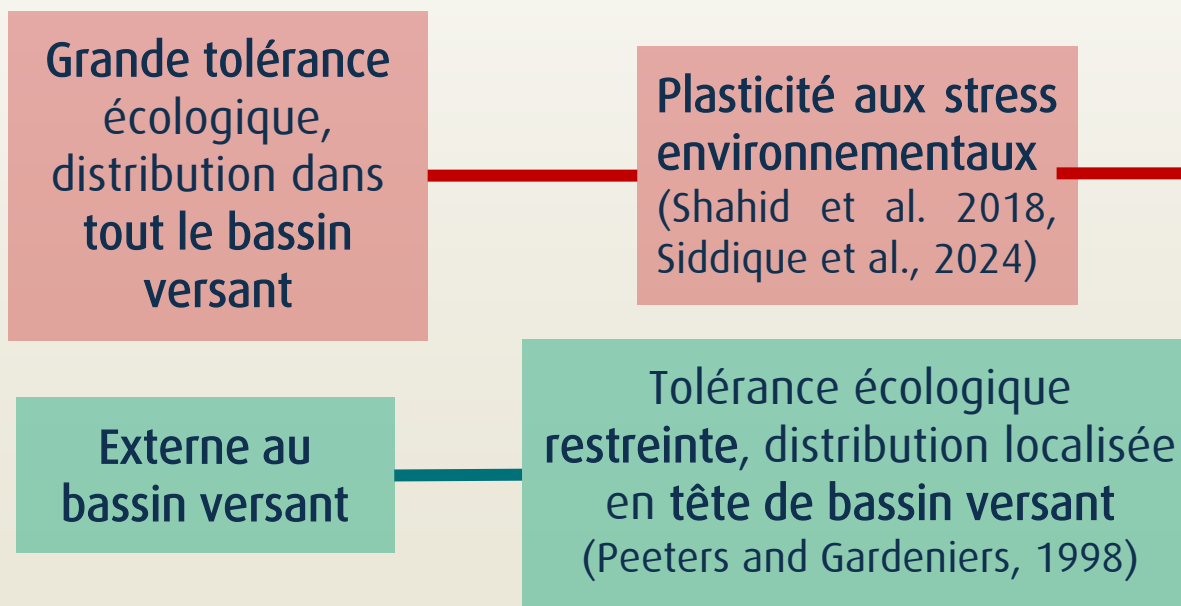
Ecotoxicologiques / Ecologiques :

- ❖ Échelle cellulaire (analyses biochimiques)
- ❖ Échelles individuelle / populationnelle (encagement)
- ❖ Échelle écosystémique (sac à litière / I2M2)



Organismes d'étude : *Gammarus pulex* (GP) et *Gammarus fossarum* (GF)

- Espèces majoritaires du bassin de la Seine
- Espèces ingénieurs
- Indicatrices de la santé des milieux aquatiques
- Ubiquiste des cours d'eau
- Capacité de polyvoltinisme



Photographie de *Gammarus pulex* (a) et *Gammarus fossarum* (b) (Mayer et al. 2012)

Transplantation *in situ* sur les 6 stations :

Détermination des biomarqueurs cellulaires des gammares encagés



(1) Pêche de gammares dans 2 populations de référence (GP et GF) et calibration en taille



(2) Transplantation de 80 individus de chaque espèce en triplicat avec $2.5 \text{ g} \pm 0.02$ de feuilles d'aulnes conditionnées (GF transplanté)



(3) Broyage de 3 mâles de chaque cage et extraction du surnageant

Acétylcholine-
estérase



Quantité
protéique



Phosphatases
alcalines



Chitobiase



β -galactosidase
 β -glucosidase



Peroxydase,
phosphatases acides



(4) Détermination des activités enzymatiques (en U/g) et de la quantité protéique (en mg/g) par méthode colorimétrique en microplaque 96 puits

Transplantation *in situ* sur les 6 stations :

Détermination des biomarqueurs individuels et populationnels des gammares encagés



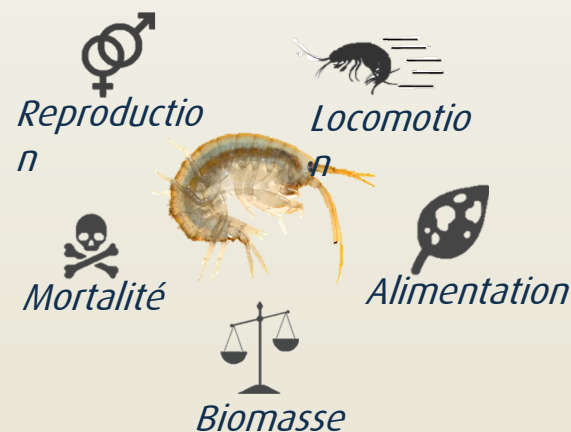
(1) Pêche de gammares dans 2 populations de référence (GP et GF) et calibration en taille



(2) Transplantation de 80 individus de chaque espèce en triplicat avec $2.5 \text{ g} \pm 0.02$ de feuilles d'aulnes conditionnées (GF transplanté)



(3) Campagne de transplantation pendant 18-19j



(4) Détermination des traits biologiques sur le terrain

Transplantation *in situ* sur les 6 stations :

Détermination des indices à l'échelle des communautés : suivi écologique



(1) Transplantation de sac à litières en triplicat (maille de 0,5 cm) avec $2.5 \text{ g} \pm 0.02$ de feuilles d'aulnes conditionnées



(2) Campagne de transplantation pendant 18-19j

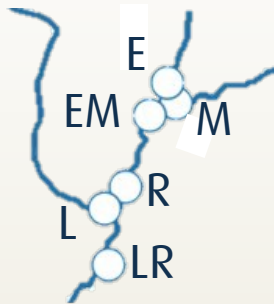
Fixation des organismes à l'éthanol et récupération des feuilles des sacs à litières



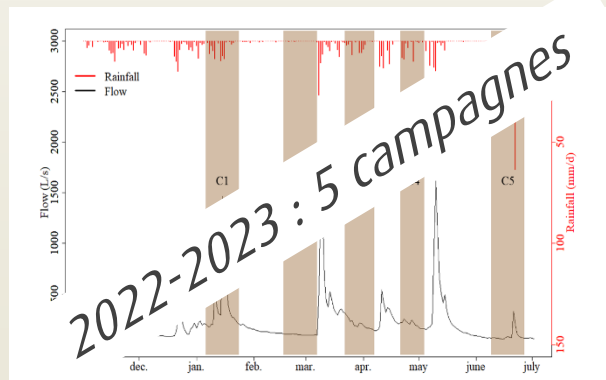
(3) Identification des organismes à la loupe binoculaire et déterminations d'indices

Détermination de la dégradation des feuilles par les communautés de macroinvertébrés détritivores

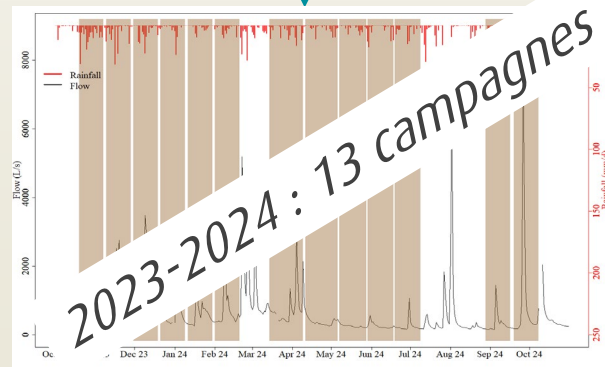
Campagnes de biosurveillance multi-paramètres



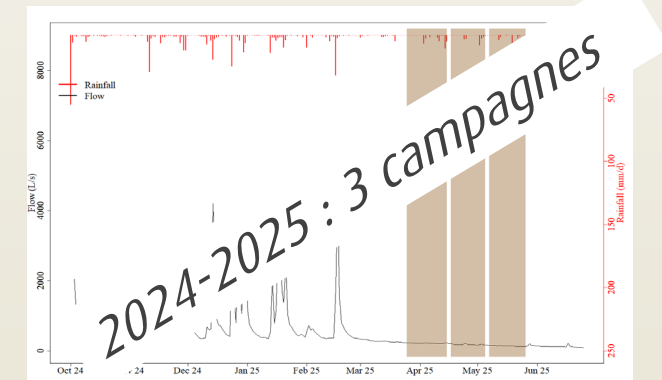
Suivis réalisés en continu sur plusieurs années hydrologiques:



Pluie : 2,3 mm/j
Lame d'eau : 0,40 mm/j

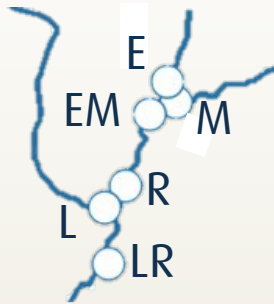


Pluie : 3,5 mm/j
Lame d'eau : 1,13 mm/j

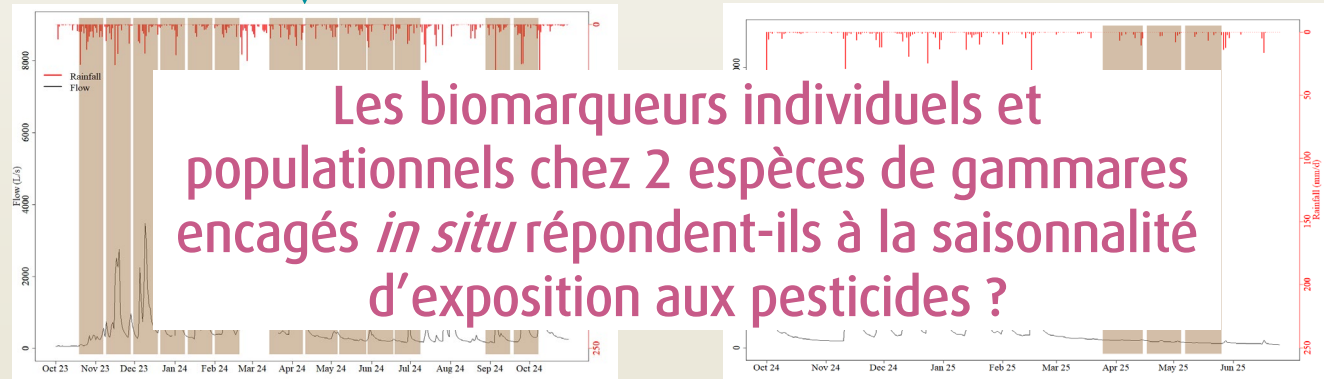
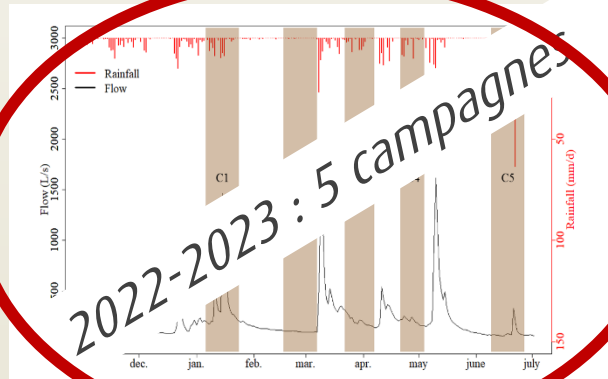


Pluie : 1,1 mm/j
Lame d'eau : 0,37 mm/j

Campagnes de biosurveillance multi-paramètres



Suivis réalisés en continu sur plusieurs années hydrologiques:



Premier résultats : 2022-2023

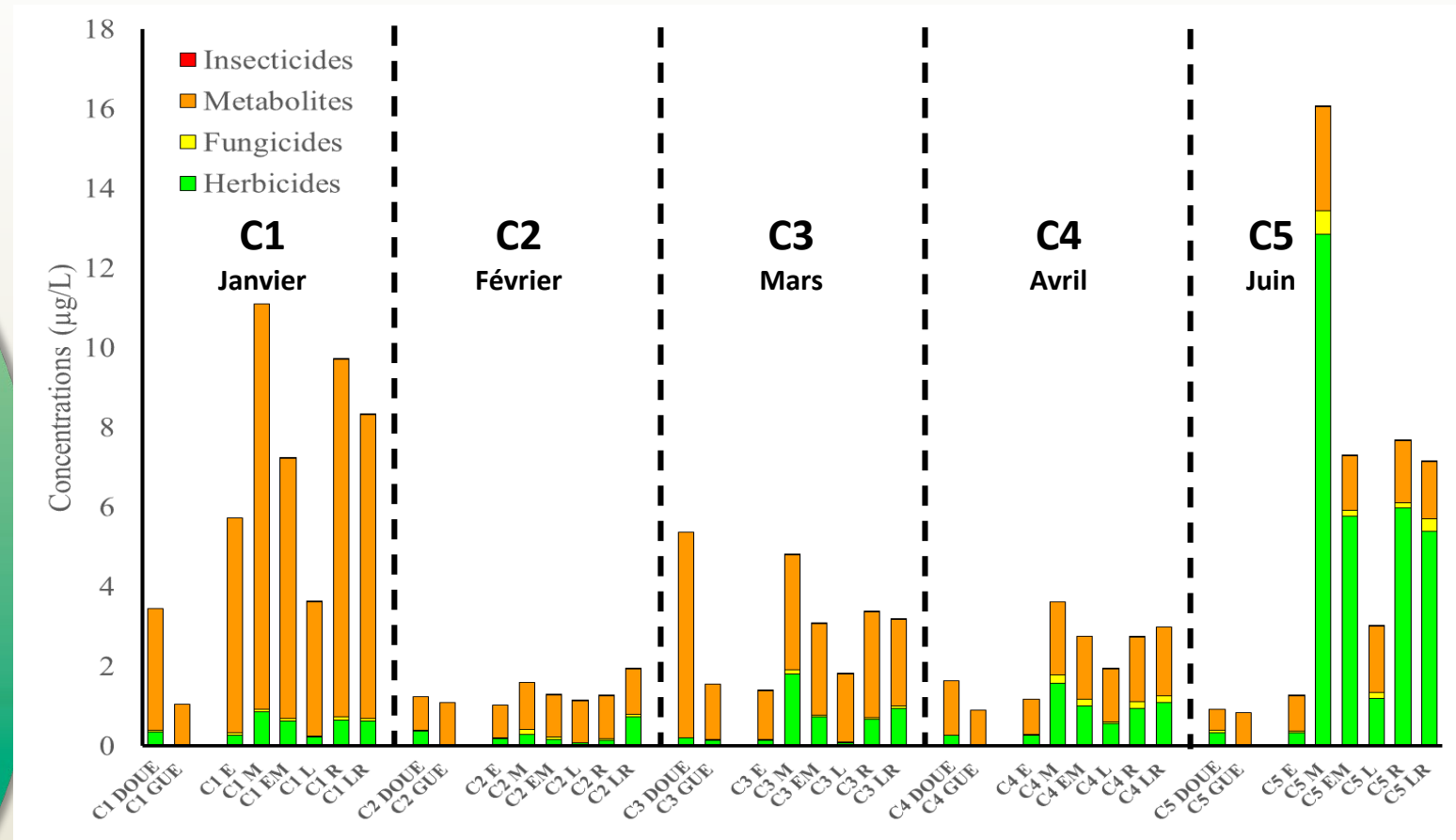
Variabilité spatio-temporelle de la dynamique physico-chimique

Paramètres physico-chimique de l'eau des 6 sites durant les 5 campagnes (min, moy, max et CV)

	Sites					
	E	M	EM	L	R	LR
Temperature (°C)	8,29 ; 11,0 ; 15,0	6,67 ; 10,57 ; 14,23	7,67 ; 10,97 ; 14,10	7,27 ; 10,58 ; 13,86	7,28 ; 10,52 ; 13,72	7,28 ; 10,51 ; 13,61
	CV 20	46	29	33	36	40
Oxygen (%)	Amplitude temporelle entre 57 et 137 % en moyenne					
Conductivity (µS/min)	Amplitude temporelle entre 485 et 660 µS/min en moyenne					
pH	Stable entre 7,3 et 8 en moyenne					
Nitrates (mg/L)	60,73 ; 62,89 ; 67,55	42,78 ; 48,62 ; 60,49	52,68 ; 57,74 ; 64,62	43,32 ; 48,66 ; 57,86	49,96 ; 54,31 ; 61,19	49,88 ; 54,29 ; 61,78
	4	19	9	17	11	11

Premier résultats : 2022-2023

Variabilité spatio-temporelle de la dynamique chimique



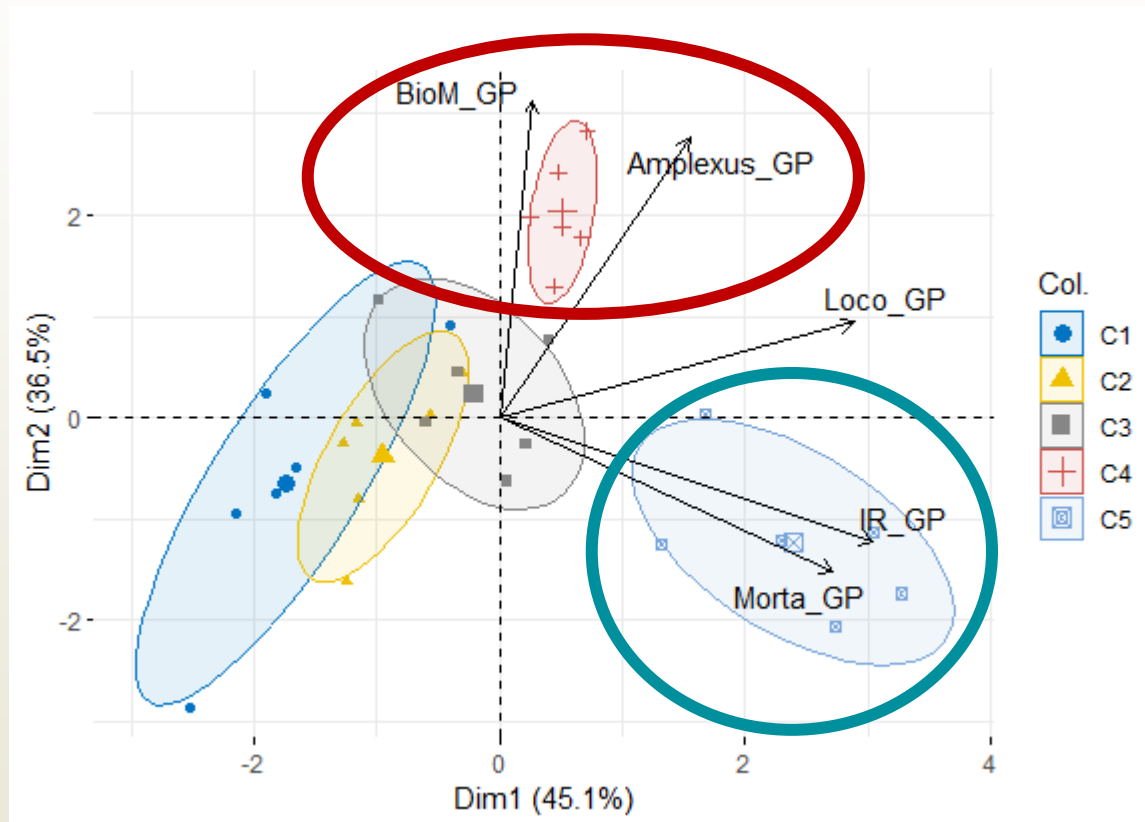
- 575 molécules analysées
- Site E et L moins contaminés
- C1 exposition aux métabolites
- C5 exposition aux herbicides

→ Dynamique spatio-temporelle de l'exposition aux pesticides

Concentrations des familles de pesticides par site (sites contrôles et 6 sites étudiés) et par campagne

Premier résultats : 2022-2023

Variabilité temporelle des biomarqueurs chez *G. pulex*

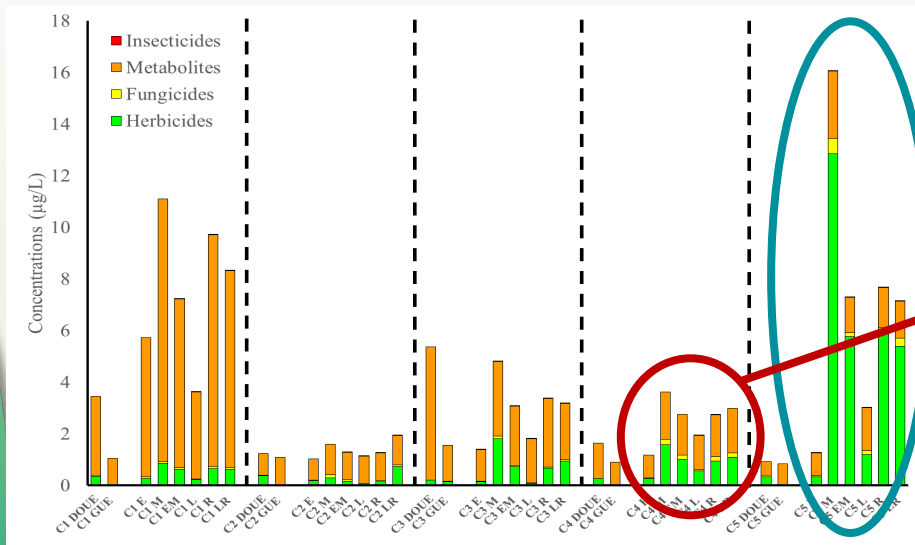


Analyse de la variabilité temporelle des traits biologiques chez *Gammarus pulex*, par ACP

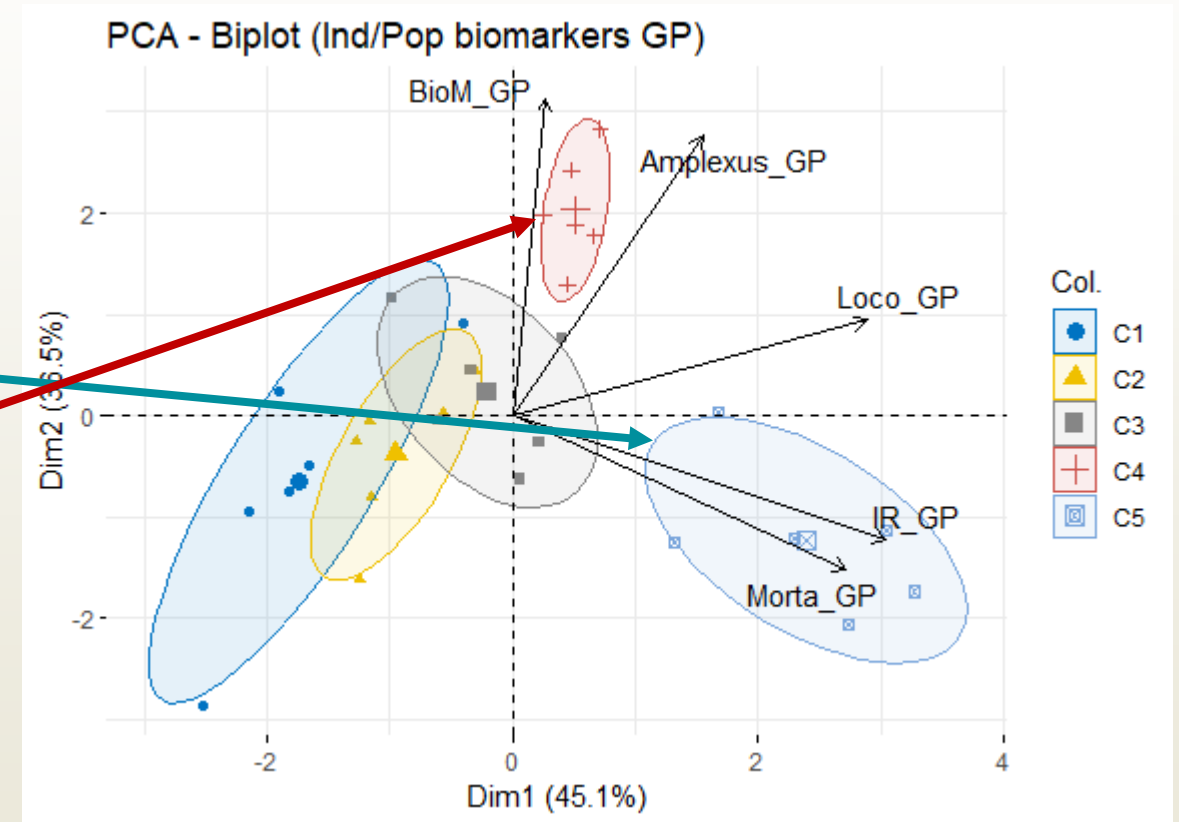
- ❖ Discrimination des campagnes C4 et C5
- ❖ Liés aux diverses pressions abiotiques
 - ❖ Part de l'impact des pesticides ?
- ❖ Signal temporel plus marqué que le signal spatial

Premier résultats : 2022-2023

Variabilité temporelle des biomarqueurs chez *G. pulex*



Concentrations des familles de pesticides par site (sites contrôles et 6 sites étudiés) et par campagne



Analyse de la variabilité temporelle des traits biologiques chez *Gammarus pulex*, par ACP

Premier résultats : 2022-2023

Résultats : Mise en relation des biomarqueurs avec la contamination chimique

:

Résultats de la régression des moindres carrés partiels (PLS) entre les biomarqueurs individuels et populationnels et les variables abiotiques explicatives

Variables	Species	Physicochemistry			Hydrology		Physiography	Chemistry						R ² Y	
		F1	F2	F3	F1	F2	F1	Nitrates	Pesticides F1	Pesticides F2	Metabolites F1	Metabolites F2	Metals F1		Metals F2
Mortality	<i>G. pulex</i>	Variables explicatives : chimiques et paramètres abiotiques simplifiés par ACP													
	<i>G. fossarum</i>														
Amplexus	<i>G. pulex</i>	Variables explicatives : chimiques et paramètres abiotiques simplifiés par ACP													
	<i>G. fossarum</i>														
Locomotion	<i>G. pulex</i>	Variables explicatives : chimiques et paramètres abiotiques simplifiés par ACP													
	<i>G. fossarum</i>														
Ingestion Rate	<i>G. pulex</i>	Variables explicatives : chimiques et paramètres abiotiques simplifiés par ACP													
	<i>G. fossarum</i>														
Biomass	<i>G. pulex</i>	Variables explicatives : chimiques et paramètres abiotiques simplifiés par ACP													
	<i>G. fossarum</i>														

Variables à expliquer :
traits biologiques

Premier résultats : 2022-2023





Résultats : Mise en relation des biomarqueurs avec la contamination chimique



:


Résultats de la régression des moindres carrés partiels (PLS) entre les biomarqueurs individuels et populationnels et les variables abiotiques explicatives

Variables	Species	Physicochemistry			Hydrology		Physiography		Chemistry						R ² Y	
		F1	F2	F3	F1	F2	F1	Nitrates	Pesticides F1	Pesticides F2	Metabolites F1	Metabolites F2	Metals F1	Metals F2		
Mortality	<i>G. pulex</i>	7.3	3.7	-0.6												47.0
	<i>G. fossarum</i>	11.1	4.8	-6.6												67.4
Amplexus	<i>G. pulex</i>	6.6	-2.3	-2.2												51.2
	<i>G. fossarum</i>	-2.7	-10.0	2.8												54.2
Locomotion	<i>G. pulex</i>	9.2	-4.3	8.1												76.1
	<i>G. fossarum</i>	7.7	-3.3	0.0												61.6
Ingestion Rate	<i>G. pulex</i>	14.0	4.0	-1.7												76.9
	<i>G. fossarum</i>	13.2	2.4	-2.9												72.3
Biomass	<i>G. pulex</i>	3.2	0.3	-2.2												48.2
	<i>G. fossarum</i>	-5.5	-4.6	0.3												36.8

❖ Sensibilité à la physico-chimie :

GP et **GF** à la température, O₂ et pH    

GF à la conductivité, carbone et Na⁺/PO₄³⁻  

GP aux Na⁺/PO₄³⁻ 

Premier résultats : 2022-2023



Résultats : Mise en relation des biomarqueurs avec la contamination chimique

:

Résultats de la régression des moindres carrés partiels (PLS) entre les biomarqueurs individuels et populationnels et les variables abiotiques explicatives

Variables	Species	Physicochemistry			Hydrology		Physiography		Chemistry						R ² Y	
		F1	F2	F3	F1	F2	F1	Nitrates	Pesticides F1	Pesticides F2	Metabolites F1	Metabolites F2	Metals F1	Metals F2		
Mortality	<i>G. pulex</i>	7.3	3.7	-0.6	6.1	-1.6										47.0
	<i>G. fossarum</i>	11.1	4.8	-6.6	11.2	4.8										67.4
Amplexus	<i>G. pulex</i>	6.6	-2.3	-2.2	4.1	11.5										51.2
	<i>G. fossarum</i>	-2.7	-10.0	2.8	-6.2	-1.2										54.2
Locomotion	<i>G. pulex</i>	9.2	-4.3	8.1	1.0	6.2										76.1
	<i>G. fossarum</i>	7.7	-3.3	0.0	3.6	13.8										61.6
Ingestion Rate	<i>G. pulex</i>	14.0	4.0	-1.7	10.8	0.8										76.9
	<i>G. fossarum</i>	13.2	2.4	-2.9	10.1	7.7										72.3
Biomass	<i>G. pulex</i>	3.2	0.3	-2.2	2.9	14.4										48.2
	<i>G. fossarum</i>	-5.5	-4.6	0.3	-5.1	-2.1										36.8

❖ Sensibilité à l'hydrologie :

GP et GF à la turbidité/MES  

GF à la hauteur d'eau 

GP à la hauteur d'eau  

Premier résultats : 2022-2023



Résultats : Mise en relation des biomarqueurs avec la contamination chimique



:

Résultats de la régression des moindres carrés partiels (PLS) entre les biomarqueurs individuels et populationnels et les variables abiotiques explicatives

Variables	Species	Physicochemistry			Hydrology		Physiography	Chemistry				Metals		R ² Y	
		F1	F2	F3	F1	F2	F1	Nitrates	Pesticides F1	Pesticides F2	Metabolites F1	Metabolites F2	Metals F1		Metals F2
Mortality	<i>G. pulex</i>	7.3	3.7	-0.6	6.1	-1.6	1.1						6.9	1.8	47.0
	<i>G. fossarum</i>	11.1	4.8	-6.6	11.2	4.8	1.7						7.3	0.0	67.4
Amplexus	<i>G. pulex</i>	6.6	-2.3	-2.2	4.1	11.5	-2.0						-1.8	-4.9	51.2
	<i>G. fossarum</i>	-2.7	-10.0	2.8	-6.2	-1.2	1.3						-3.3	-7.1	54.2
Locomotion	<i>G. pulex</i>	9.2	-4.3	8.1	1.0	6.2	-3.8						0.7	-4.1	76.1
	<i>G. fossarum</i>	7.7	-3.3	0.0	3.6	13.8	-3.5						-2.9	-5.7	61.6
Ingestion Rate	<i>G. pulex</i>	14.0	4.0	-1.7	10.8	0.8	1.6						10.6	0.3	76.9
	<i>G. fossarum</i>	13.2	2.4	-2.9	10.1	7.7	-0.3						6.0	-1.9	72.3
Biomass	<i>G. pulex</i>	3.2	0.3	-2.2	2.9	14.4	-4.3						-5.5	-2.4	48.2
	<i>G. fossarum</i>	-5.5	-4.6	0.3	-5.1	-2.1	1.0						-3.5	-2.5	36.8

❖ Sensibilité aux ETM :

GP et **GF** stimulation par : Cu, As, Cd, V  

GP et **GF** inhibition par : Co, Ni, Zn, Ti  

Premier résultats : 2022-2023

Résultats : Mise en relation des biomarqueurs avec la contamination chimique

:


Résultats de la régression des moindres carrés partiels (PLS) entre les biomarqueurs individuels et populationnels et les variables abiotiques explicatives

Variables	Species	Physicochemistry			Hydrology		Physiography	Chemistry					R ² Y		
		F1	F2	F3	F1	F2	F1	Nitrates	Pesticides F1	Pesticides F2	Metabolites F1	Metabolites F2	Metals F1	Metals F2	
Mortality	<i>G. pulex</i>	7.3	3.7	-0.6	6.1	-1.6	1.1	0.0	6.8	4.0	-1.5	5.3	6.9	1.8	47.0
	<i>G. fossarum</i>	11.1	4.8	-6.6	11.2	4.8	1.7	2.2	4.5	6.9	-2.7	3.6	7.3	0.0	67.4
Amplexus	<i>G. pulex</i>	6.6	-2.3	-2.2	4.1	11.5	-2.0	-3.3	-1.8	2.1	-7.8	0.8	-1.8	-4.9	51.2
	<i>G. fossarum</i>	-2.7	-10.0	2.8	-6.2	-1.2	1.3	-2.8	-4.8	1.3	-6.4	-4.2	-3.3	-7.1	54.2
Locomotion	<i>G. pulex</i>	9.2	-4.3	8.1	1.0	6.2	-3.8	-10.6	5.9	0.8	-13.0	8.3	0.7	-4.1	76.1
	<i>G. fossarum</i>	7.7	-3.3	0.0	3.6	13.8	-3.5	-6.0	-1.3	1.2	-10.4	2.3	-2.9	-5.7	61.6
Ingestion Rate	<i>G. pulex</i>	14.0	4.0	-1.7	10.8	0.8	1.6	-1.3	9.9	7.8	-6.0	8.2	10.6	0.3	76.9
	<i>G. fossarum</i>	13.2	2.4	-2.9	10.1	7.7	-0.3	-2.3	5.6	6.1	-7.6	6.1	6.0	-1.9	72.3
Biomass	<i>G. pulex</i>	3.2	0.3	-2.2	2.9	14.4	-4.3	-2.9	-3.7	-2.1	-4.1	0.1	-5.5	-2.4	48.2
	<i>G. fossarum</i>	-5.5	-4.6	0.3	-5.1	-2.1	1.0	0.8	-4.9	-1.0	0.6	-4.9	-3.5	-2.5	36.8

❖ Sensibilité aux pesticides :

GP et **GF** stimulation par les molécules mères  






GP et **GF** inhibition par les métabolites   

NO₃ peu voir pas d'effets 

Premier résultats : 2022-2023

Résultats : Synthèse de la relation des biomarqueurs avec les paramètres abiotiques et chimiques :

Synthèse des résultats de la régression des moindres carrés partiels (PLS)

Variables	Species	Paramètres	
		environnementaux	Chimie
 Mortality	<i>G. pulex</i>	20.6	26.4
	<i>G. fossarum</i>	40.2	27.2
 Amplexus	<i>G. pulex</i>	28.6	22.5
	<i>G. fossarum</i>	24.2	30.0
 Locomotion	<i>G. pulex</i>	32.6	43.5
	<i>G. fossarum</i>	31.9	29.6
 Ingestion Rate	<i>G. pulex</i>	32.8	44.1
	<i>G. fossarum</i>	36.7	35.7
 Biomass	<i>G. pulex</i>	27.2	21.0
	<i>G. fossarum</i>	18.7	18.2

- ❖ Pour **GP** : 3/5 biomarqueurs semblent sensibles à la pression chimique
- ❖ Pour **GF** : 1/5 biomarqueurs semblent sensibles à la pression chimique...
 - ↳ **GP** plus approprié pour évaluer une pression chimique ?
 - GP** est une espèce issue du bassin versant de l'Orgeval contrairement à **GF** qui est une espèce transplantée

Conclusion et perspectives :



Conclusion :

- ❖ Les biomarqueurs (en fonction de l'espèce) répondent aux fluctuations des paramètres confondants (physico-chimie, hydrologie...)
- ❖ Les biomarqueurs répondent à des contaminations pesticides *in situ* : **QUID DES METABOLITES ?**
- ❖ Différence de réponses des biomarqueurs entre les 2 espèces en fonction des différents paramètres
 - ❖ *G. pulex* semble plus approprié pour évaluer la contamination des pesticides que *G. fossarum*



Perspectives :

- ❖ Réalisation d'un suivi continu de **2022 à 2025 (21 campagnes à exploiter)** pour intégrer toutes les dynamiques saisonnières (pas seulement un pic de pesticides)
- ❖ Mise en relation avec les échelles organisationnelles (cellulaire et communauté)

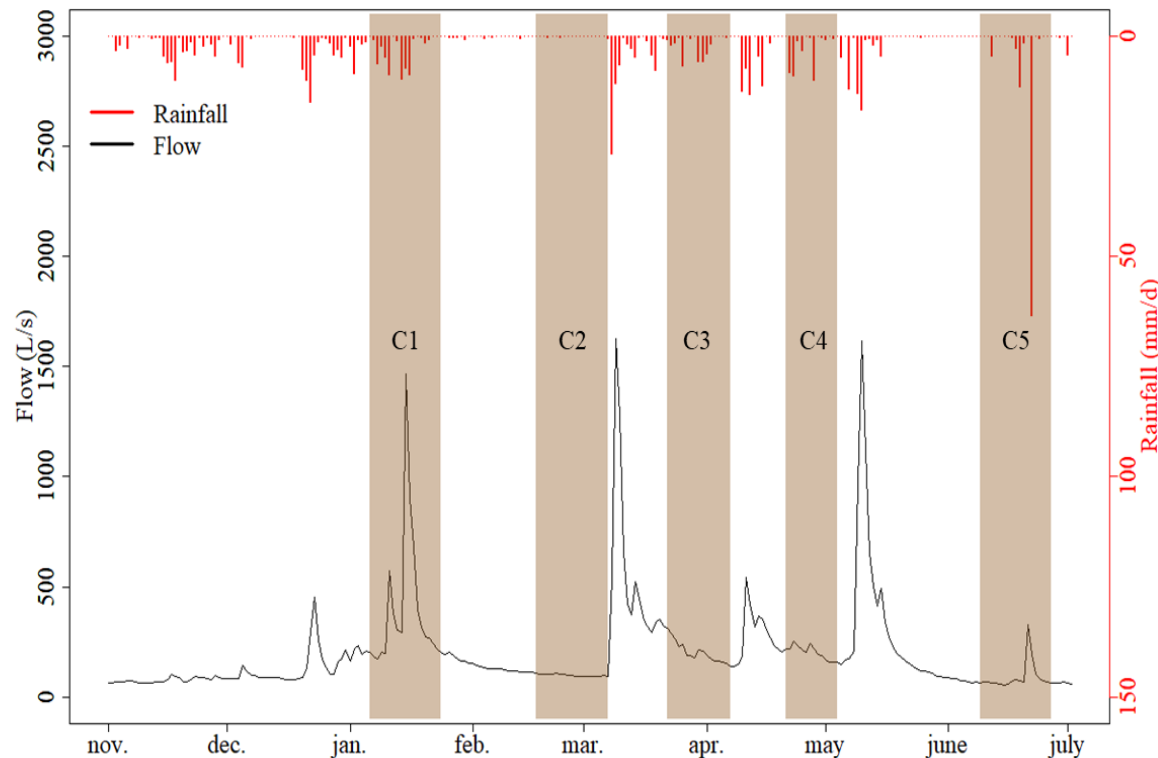


Merci pour votre attention



Premier résultats : 2022-2023

Variabilité temporelle de la dynamique hydrologique



- ❖ Année 2022-2023 : Saison hydro plutôt sèche
- ❖ Variations temporelles du régime hydrologique en fonction des campagnes
- ❖ Divers schémas de campagnes :
 - ❖ Présence de forts débits
 - ❖ Présence de fortes précipitations
 - ❖ Présence de périodes d'étiages

Débits et précipitations à l'exutoire du bassin versant de l'Orgeval, pendant les périodes de transplantation