

PEP'S MATHÉO : les mathématiques de l'eau
Journée de restitution - 14 mai 2025 - campus Gérard Mégie, Paris



DYNAMIQUE DES VIRUS DANS LES EAUX DE LA SEINE

Alisa LANGLAIS, Louis RAMSEYER, Achim QUAISER, Fabrice MAHÉ, Valérie MONBET, Anthony MARCONI, Jérémy MOUGIN, Sabrina GUERIN-RECHDAOUI, **Céline ROOSE-AMSALEG**



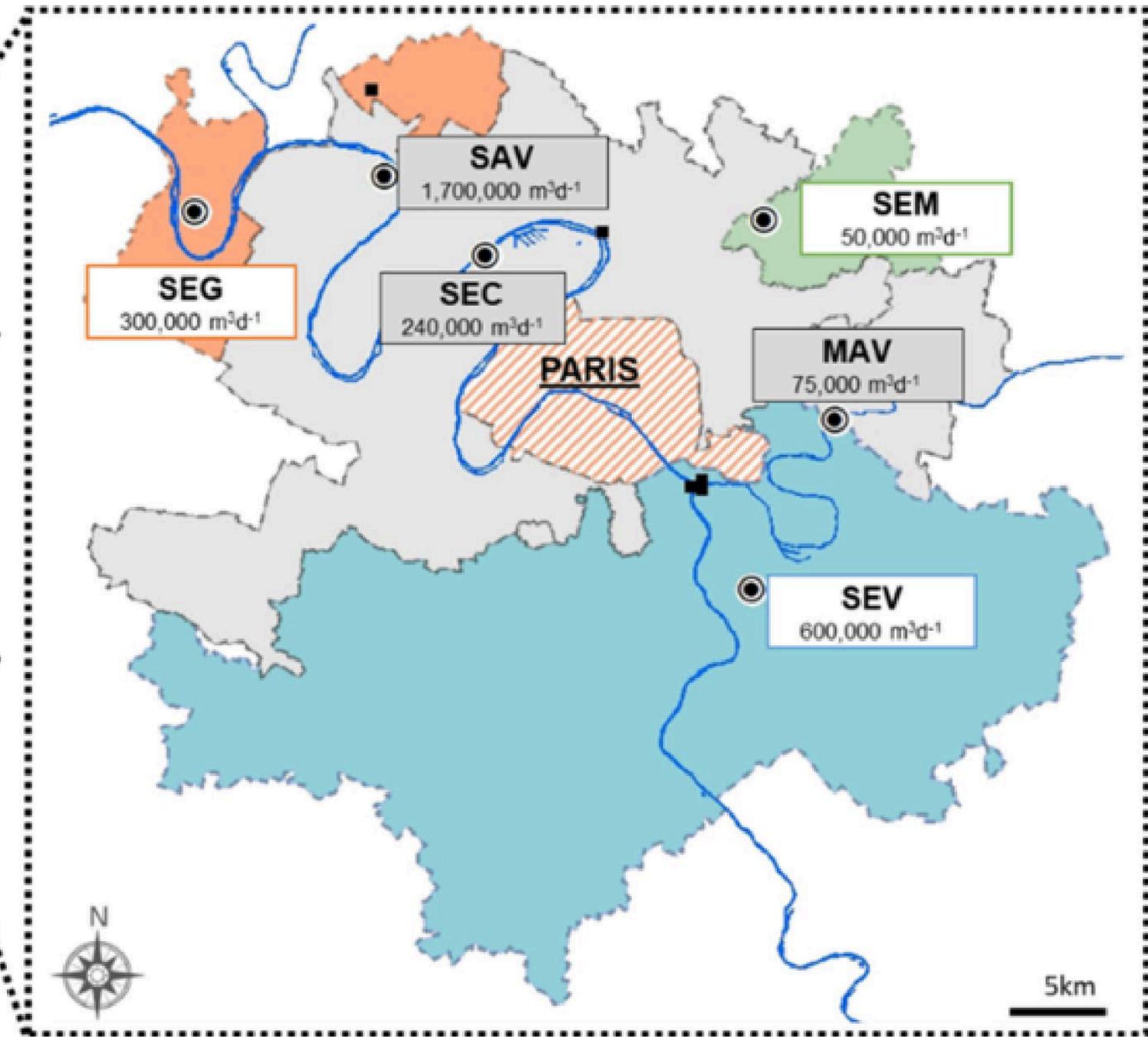
SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL POUR L'ASSAINISSEMENT

SIAAP

DE L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE


ECOBIO
Rennes


MeSeine
Innovation



SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL POUR L'ASSAINISSEMENT

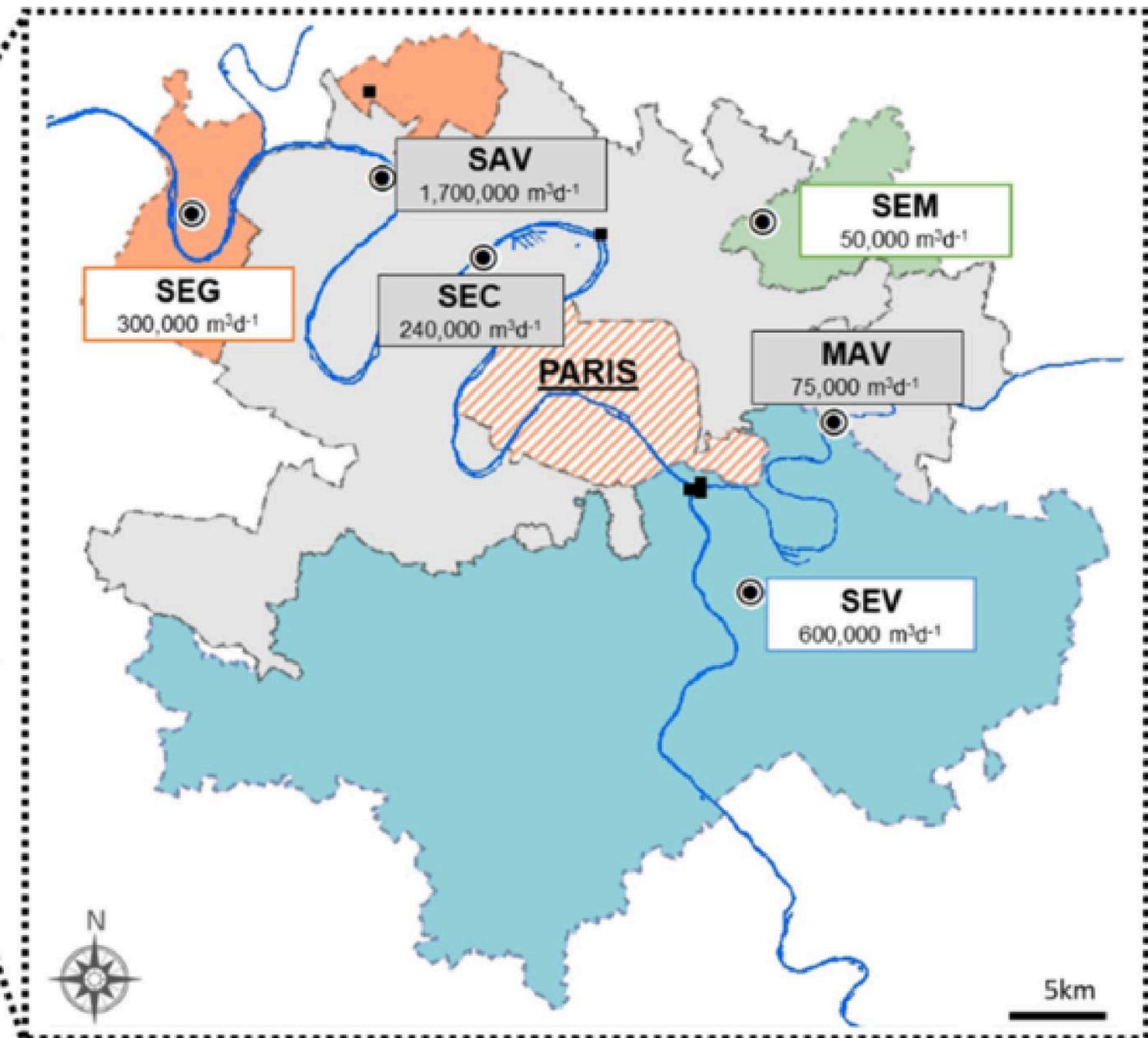
SIAAP

DE L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE



(1) Observatoire de la rivière depuis 1990

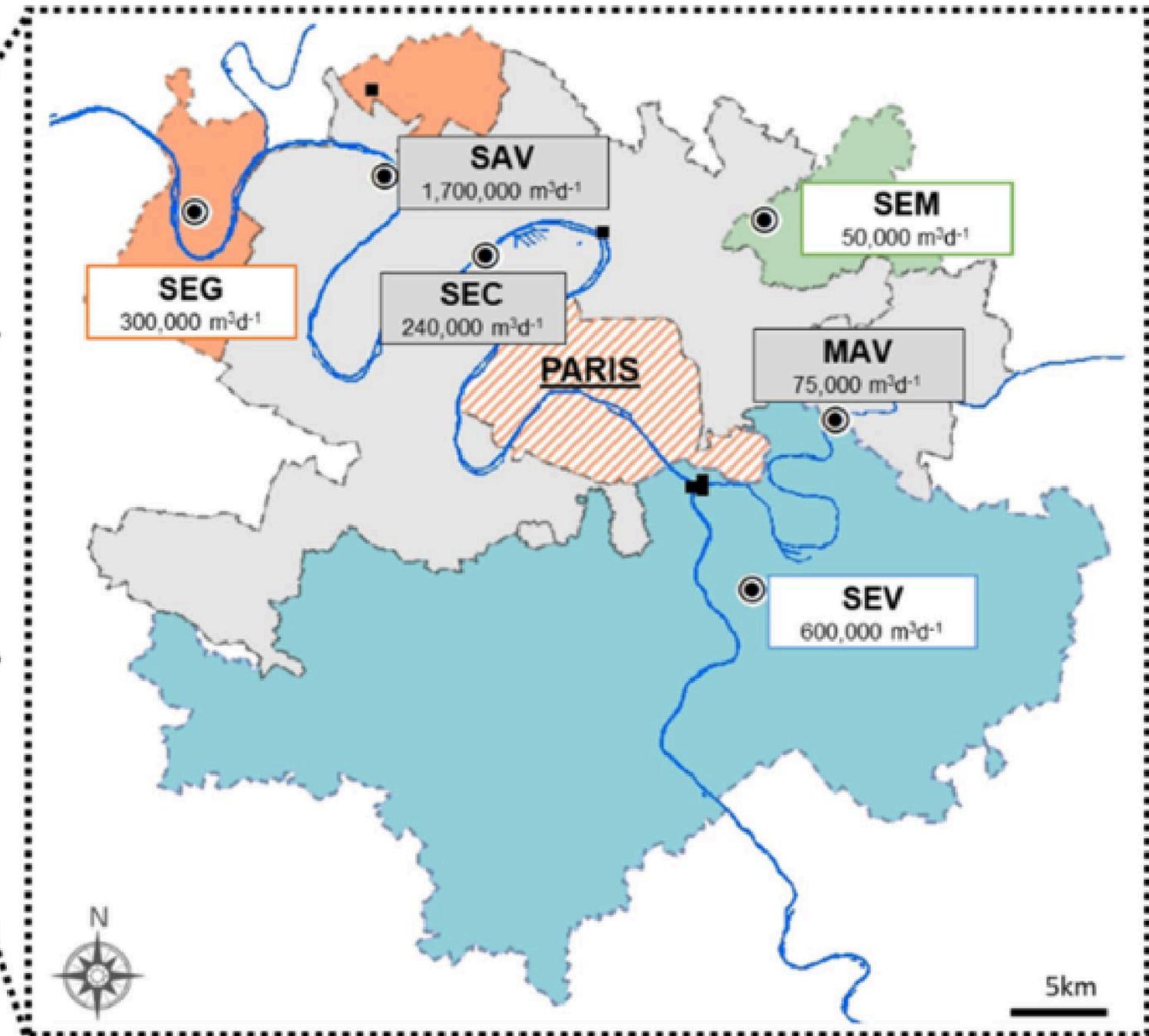
- Suivi physico-chimique
- Suivi bactériologique et virologique



SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL POUR L'ASSAINISSEMENT

SIAAP

DE L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE



(1) Observatoire de la rivière depuis 1990

- Suivi physico-chimique
- Suivi bactériologique et virologique

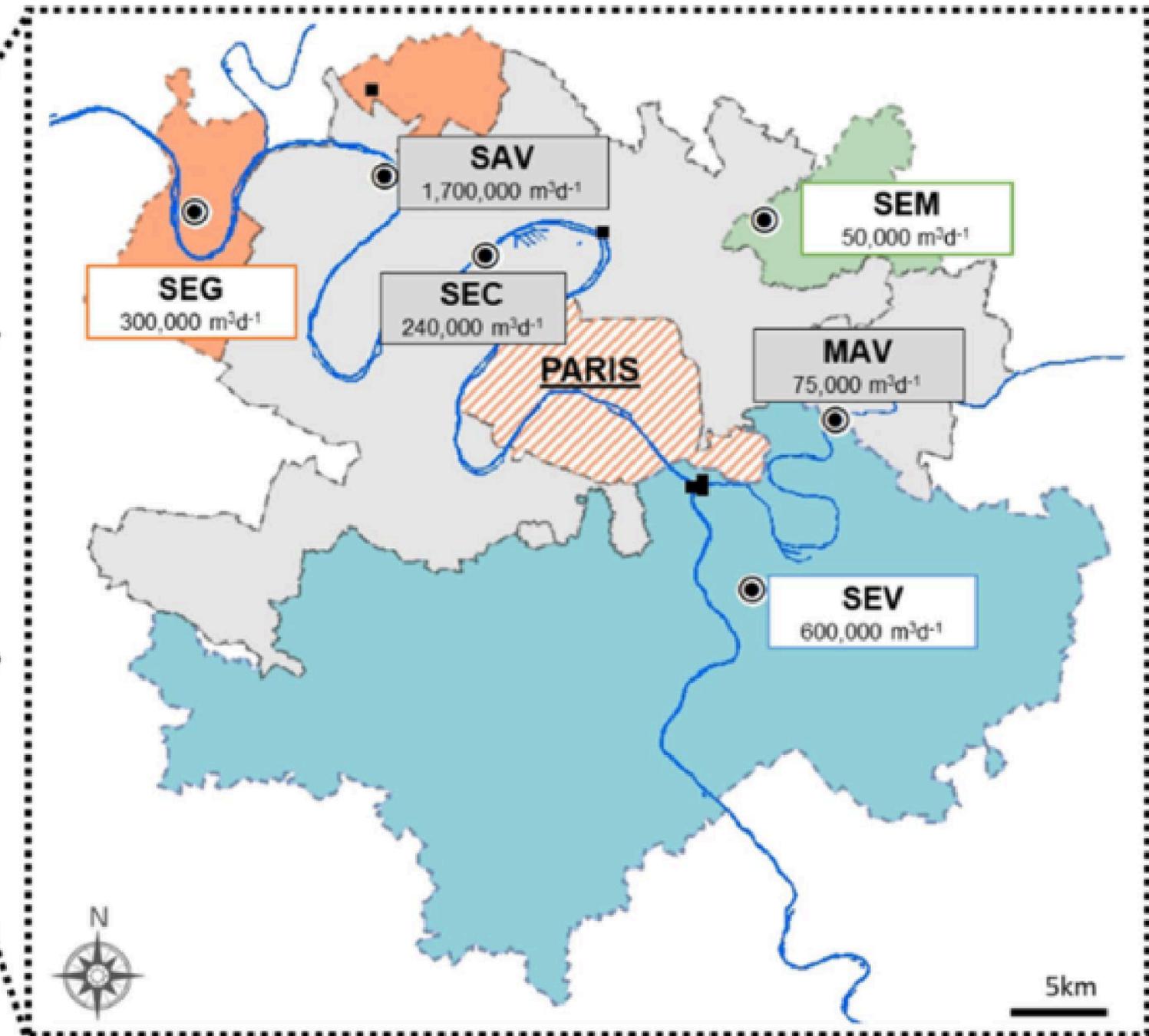
(2) Programme de recherche depuis 2020

- Améliorer la connaissance de l'état des rivières franciliennes
- Promouvoir l'innovation dans les outils de suivi de la qualité des eaux de surface

SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL POUR L'ASSAINISSEMENT

SIAAP

DE L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE



(1) Observatoire de la rivière depuis 1990

- Suivi physico-chimique
- Suivi bactériologique et virologique

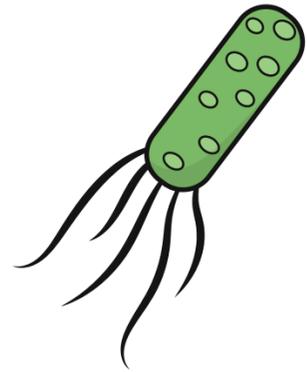
(2) Programme de recherche depuis 2020

- Améliorer la connaissance de l'état des rivières franciliennes
- Promouvoir l'innovation dans les outils de suivi de la qualité des eaux de surface

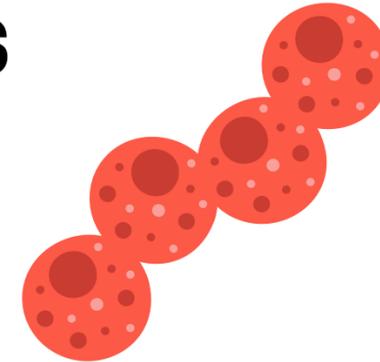
Projet VirSeine : 2023-2026

Evaluation de la qualité des eaux de baignade ?

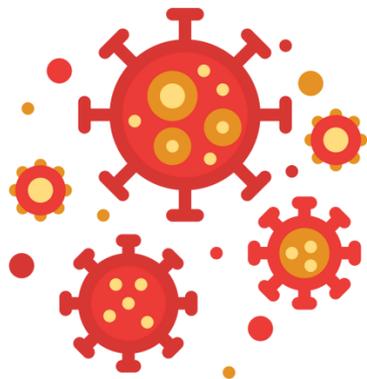
E. coli



**Enterocoques
intestinaux**



→ La présence de Bactéries Indicatrices Fécales (BIF) dans les eaux de baignade ne reflète pas la présence des virus dans la Seine (Prevost *et al.*, 2015)



Quelles informations sur les virus circulant dans la Seine ?

Aval



Amont



→ La concentration seule en plusieurs points ne suffit pas

Objectif : Modéliser la dynamique virale dans la Seine

Quelles données ?

→ **15 virus** mesurés 1 fois par mois par dPCR depuis Juillet 2021

Virus

Pepper Mild Mottle Virus (PMMoV)

Norovirus GI et GII

Hépatovirus A

Salivirus (A)

Entérovirus (A à D)

Cosavirus

Orthohepevirus (A)

Sapovirus (GI, GII, GIV)

Astrovirus

Rotavirus

Adénovirus (ABCDEF)

Aichi virus A

Polyomavirus (BKV et JCV)

CrAssphage

Quelles données ?

→ **15 virus** mesurés 1 fois par mois par dPCR depuis Juillet 2021

dont **13 pathogènes humains**

Virus

Pepper Mild Mottle Virus (PMMoV)

Norovirus GI et GII

Hépatovirus A

Salivirus (A)

Entérovirus (A à D)

Cosavirus

Orthohepevirus (A)

Sapovirus (GI, GII, GIV)

Astrovirus

Rotavirus

Adénovirus (ABCDEF)

Aichi virus A

Polyomavirus (BKV et JVC)

CrAssphage

Quelles données ?

→ **15 virus** mesurés 1 fois par mois par dPCR depuis Juillet 2021

dont **13 pathogènes humains** et 2 non pathogènes (PMMoV et CrAssphage)

Virus

Pepper Mild Mottle Virus (PMMoV)

Norovirus GI et GII

Hépatovirus A

Salivirus (A)

Entérovirus (A à D)

Cosavirus

Orthohepevirus (A)

Sapovirus (GI, GII, GIV)

Astrovirus

Rotavirus

Adénovirus (ABCDEF)

Aichi virus A

Polyomavirus (BKV et JVC)

CrAssphage

Quelles données ?

→ **15 virus** mesurés 1 fois par mois par dPCR depuis Juillet 2021

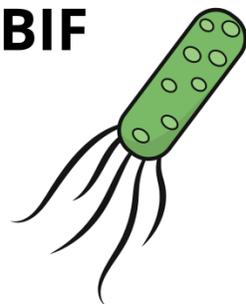
dont **13 pathogènes humains** et 2 non pathogènes (PMMoV et CrAssphage)

→ Mesures de paramètres physico-chimiques : **pH, température, COD, O₂**



→ Mesures de paramètres hydrométriques : **débit, pluviométrie**

→ Mesure de paramètres biotiques : **BIF**



Virus

Pepper Mild Mottle Virus (PMMoV)

Norovirus GI et GII

Hépatovirus A

Salivirus (A)

Entérovirus (A à D)

Cosavirus

Orthohepevirus (A)

Sapovirus (GI, GII, GIV)

Astrovirus

Rotavirus

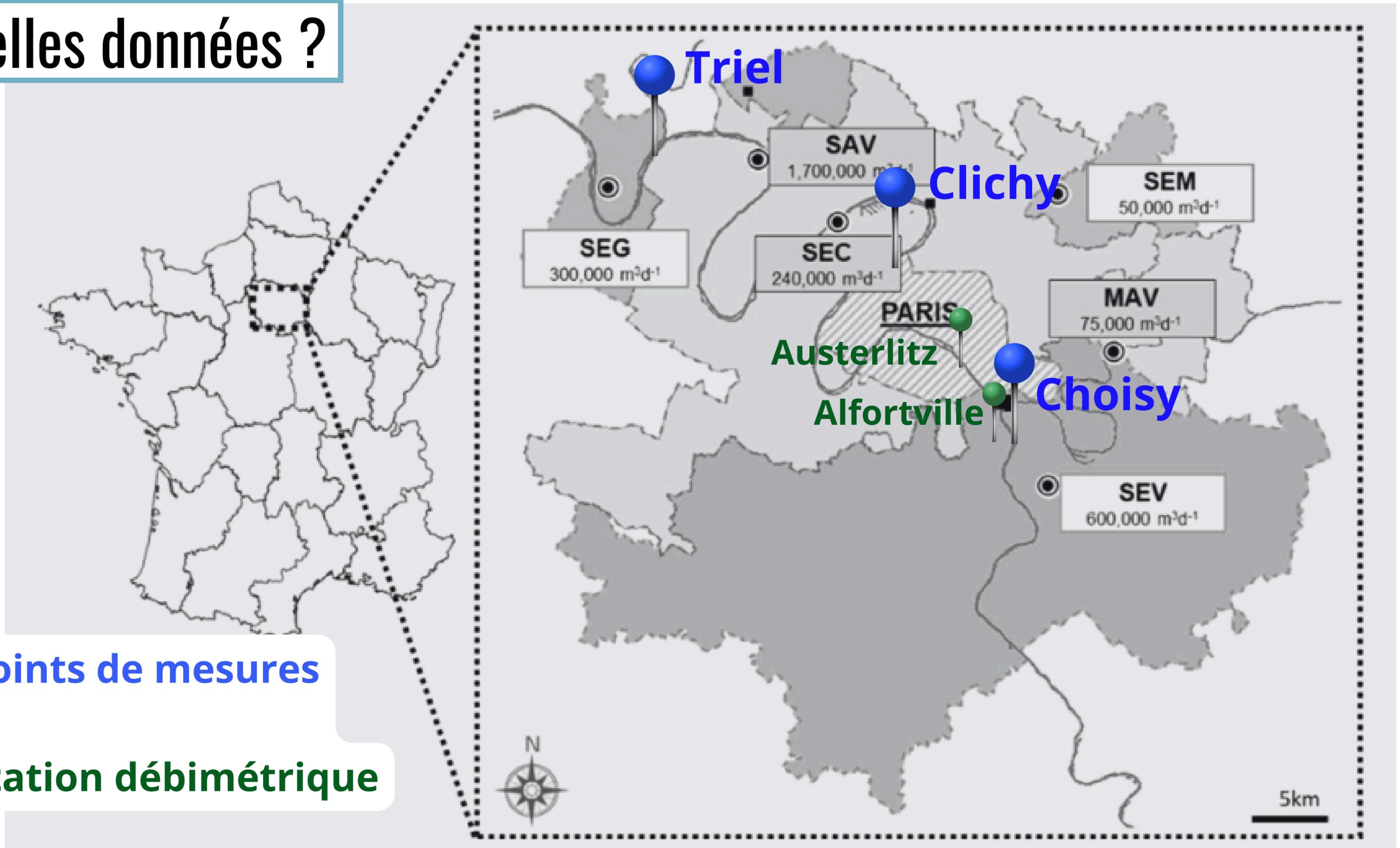
Adénovirus (ABCDEF)

Aichi virus A

Polyomavirus (BKV et JVC)

CrAssphage

Quelles données ?

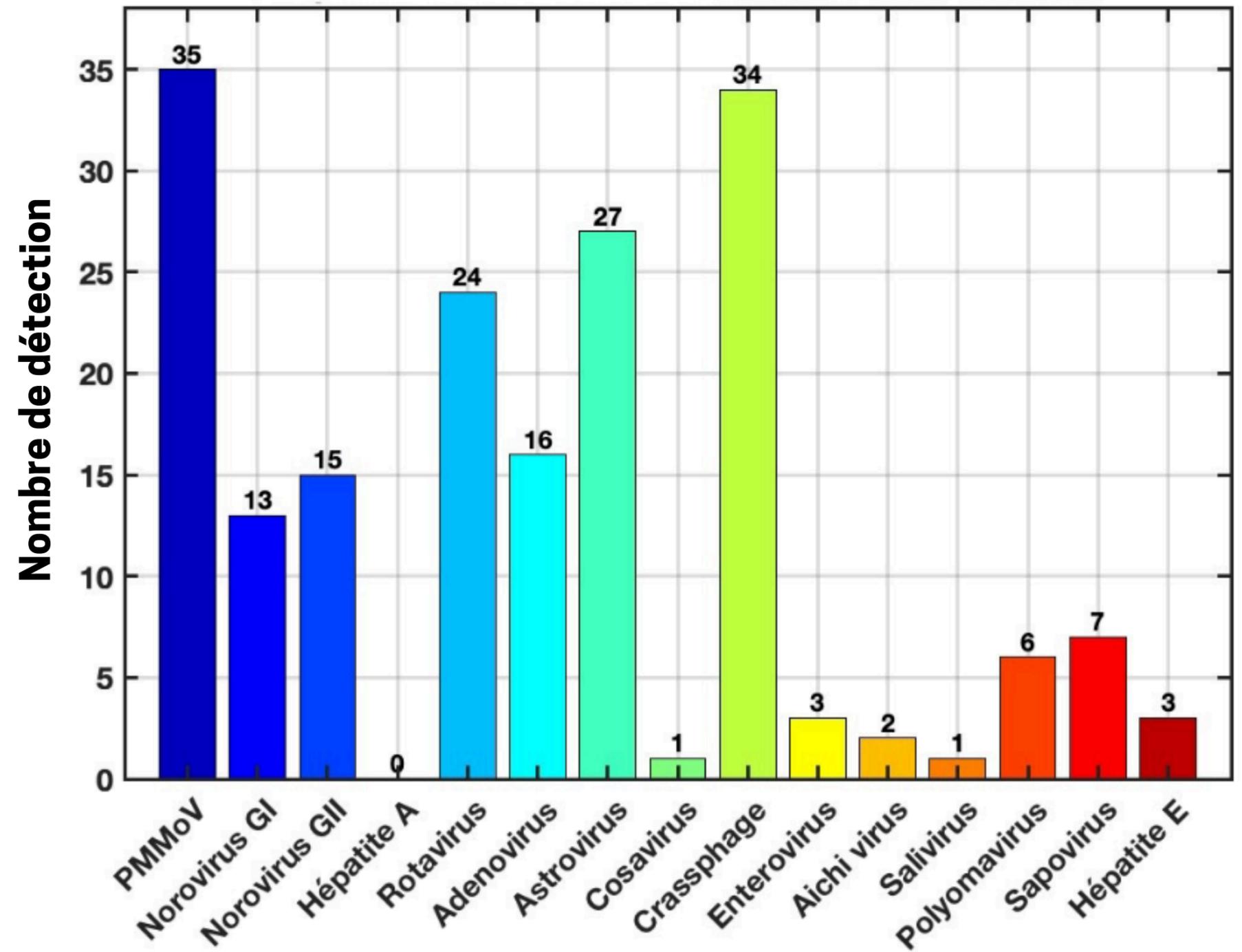


Points de mesures



Station débitométrique

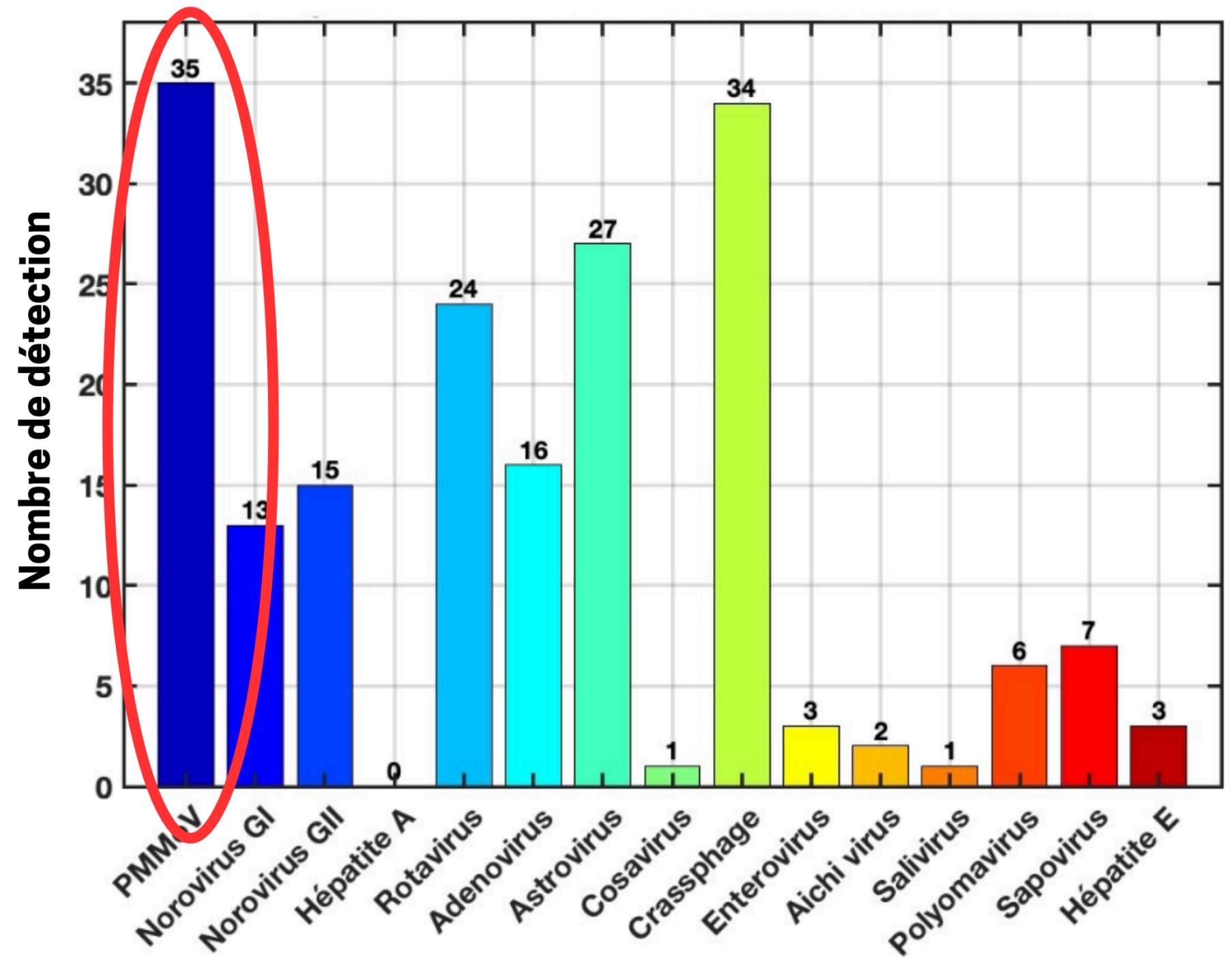
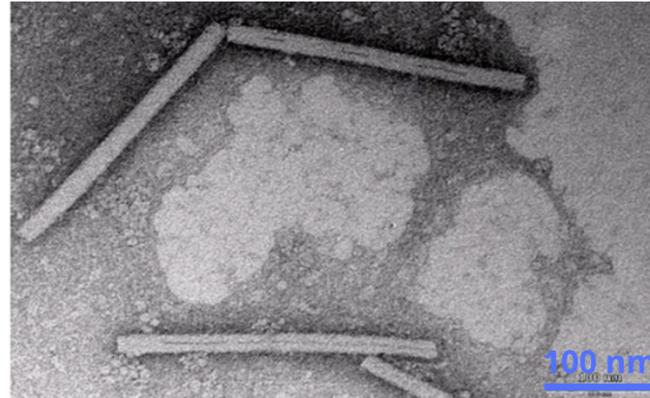
Quels virus les plus fréquents en Seine ?



Quels virus les plus fréquents en Seine ?

PMMoV

→ Phytovirus

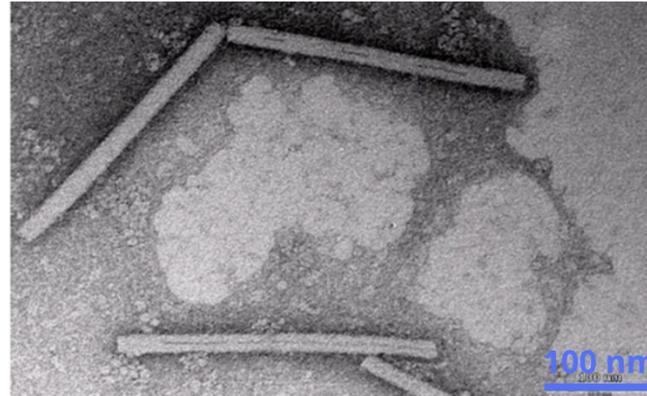


Quels virus les plus fréquents en Seine ?

PMMoV

→ Phytovirus

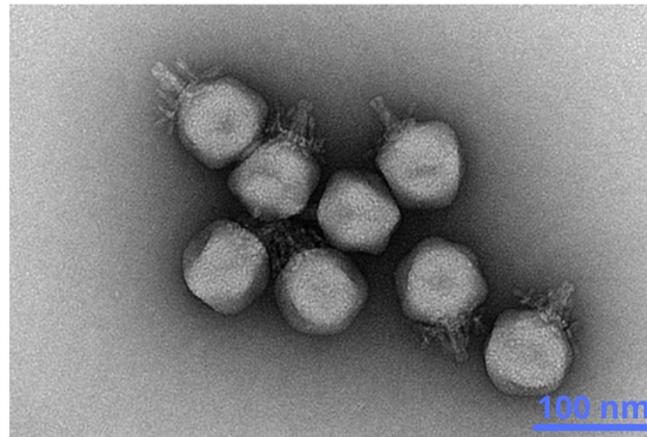
Zang *et al.* (2006)



CrAssphage

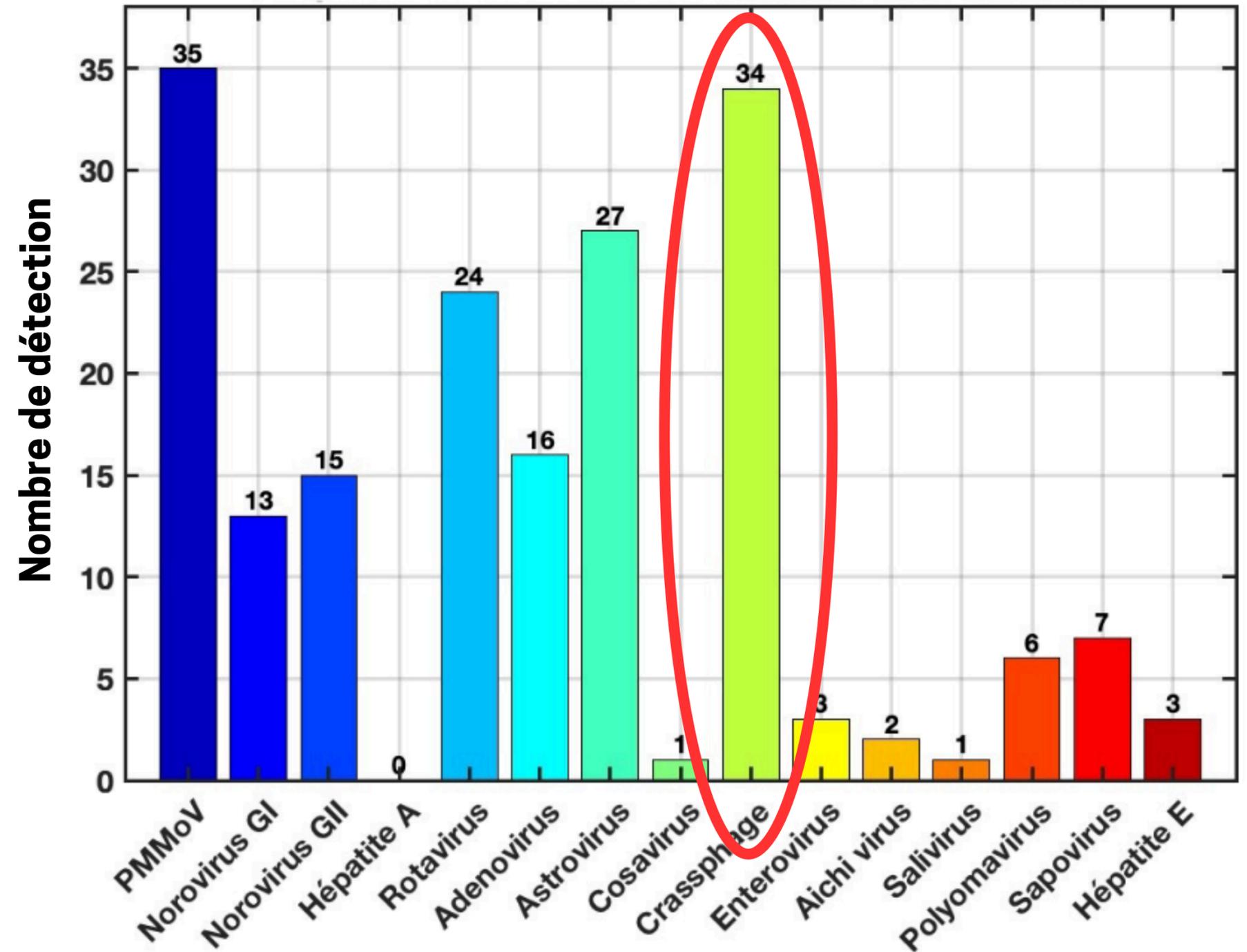
→ Bactériophage

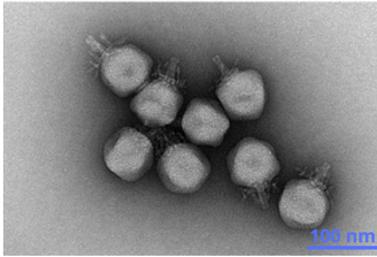
Dutilh *et al.* (2014)



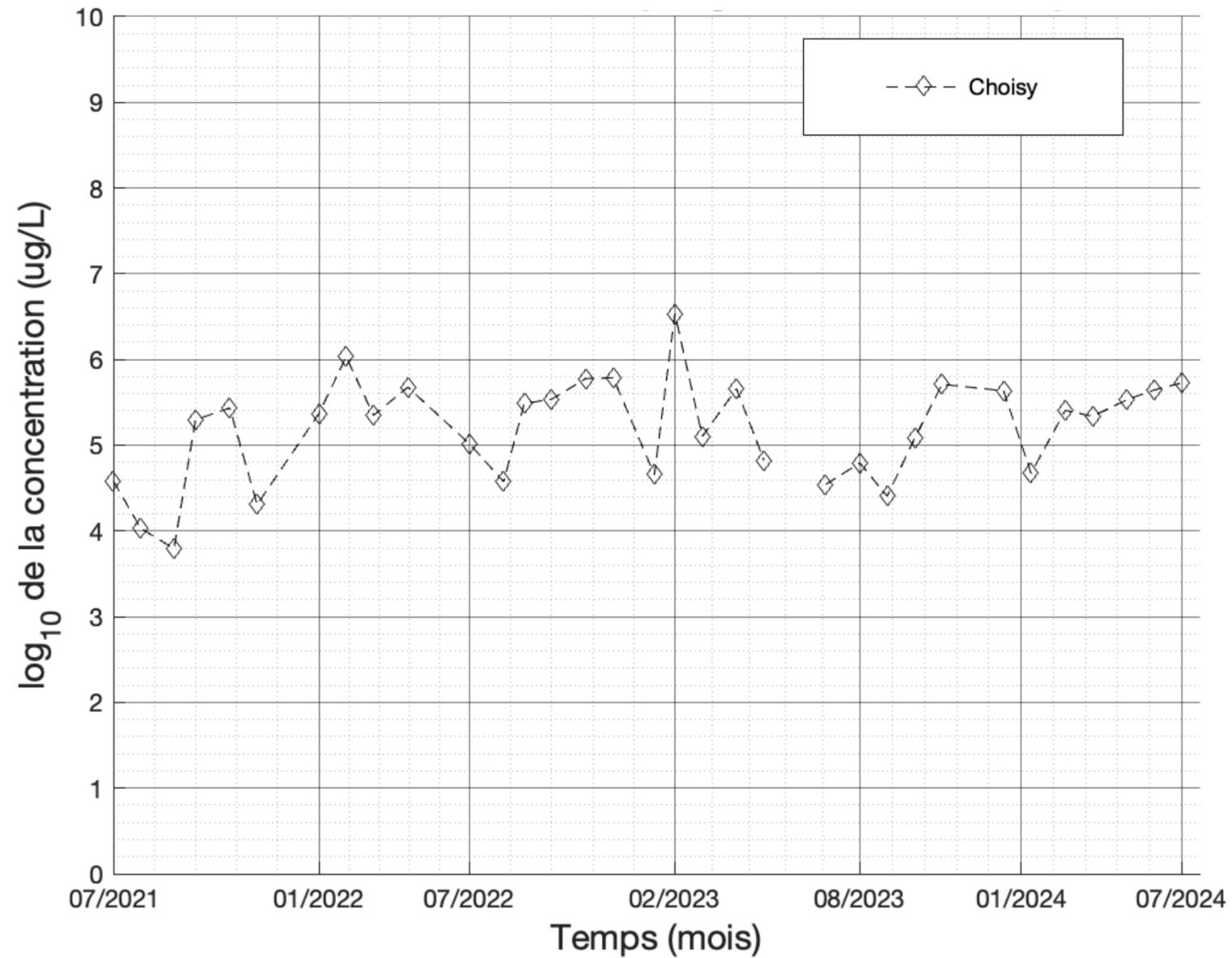
→ Potentiels bioindicateurs
de contamination fécale

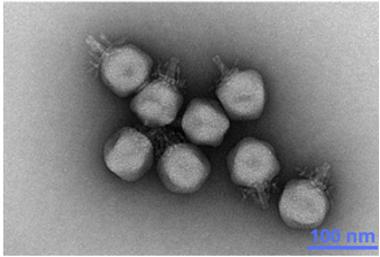
Farkas *et al.* (2020)



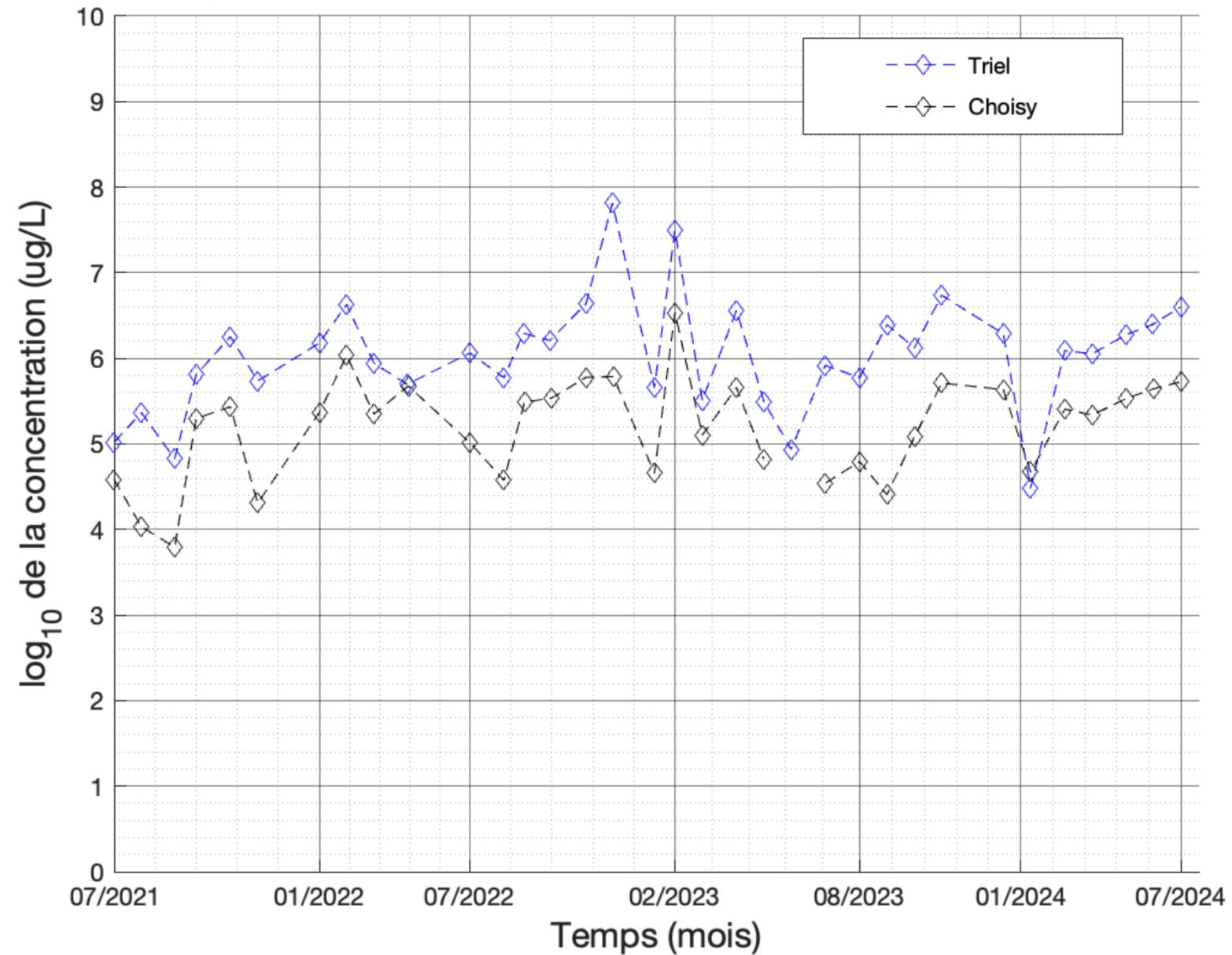


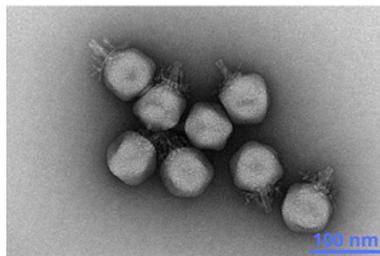
Quelle concentration du CrAssphage en milieu naturel et eau résiduelle ?



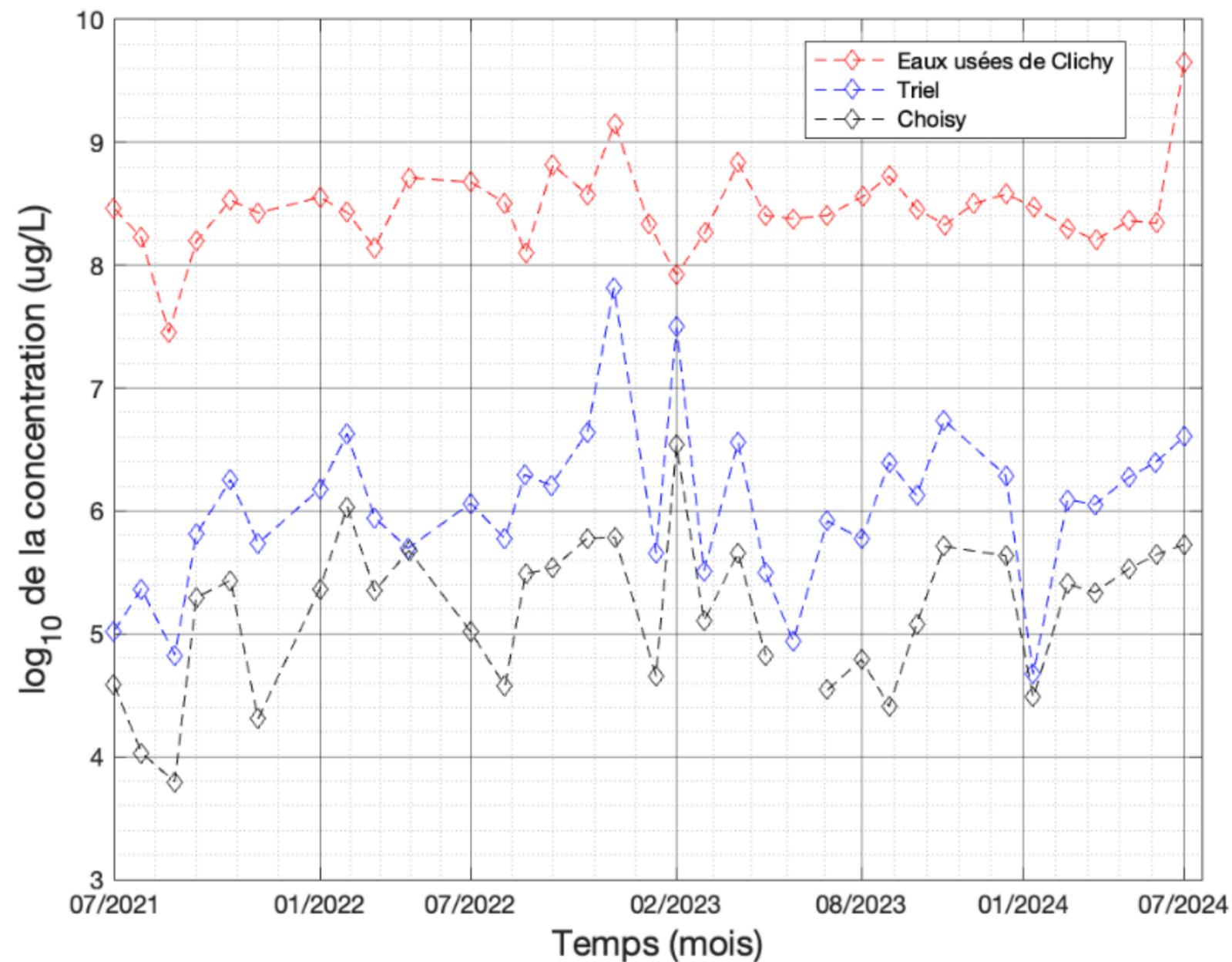


Quelle concentration du CrAssphage en milieu naturel et eau résiduelle ?



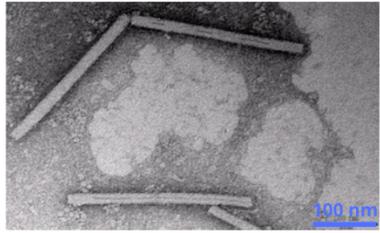


Quelle concentration du CrAssphage en milieu naturel et eau résiduelle ?

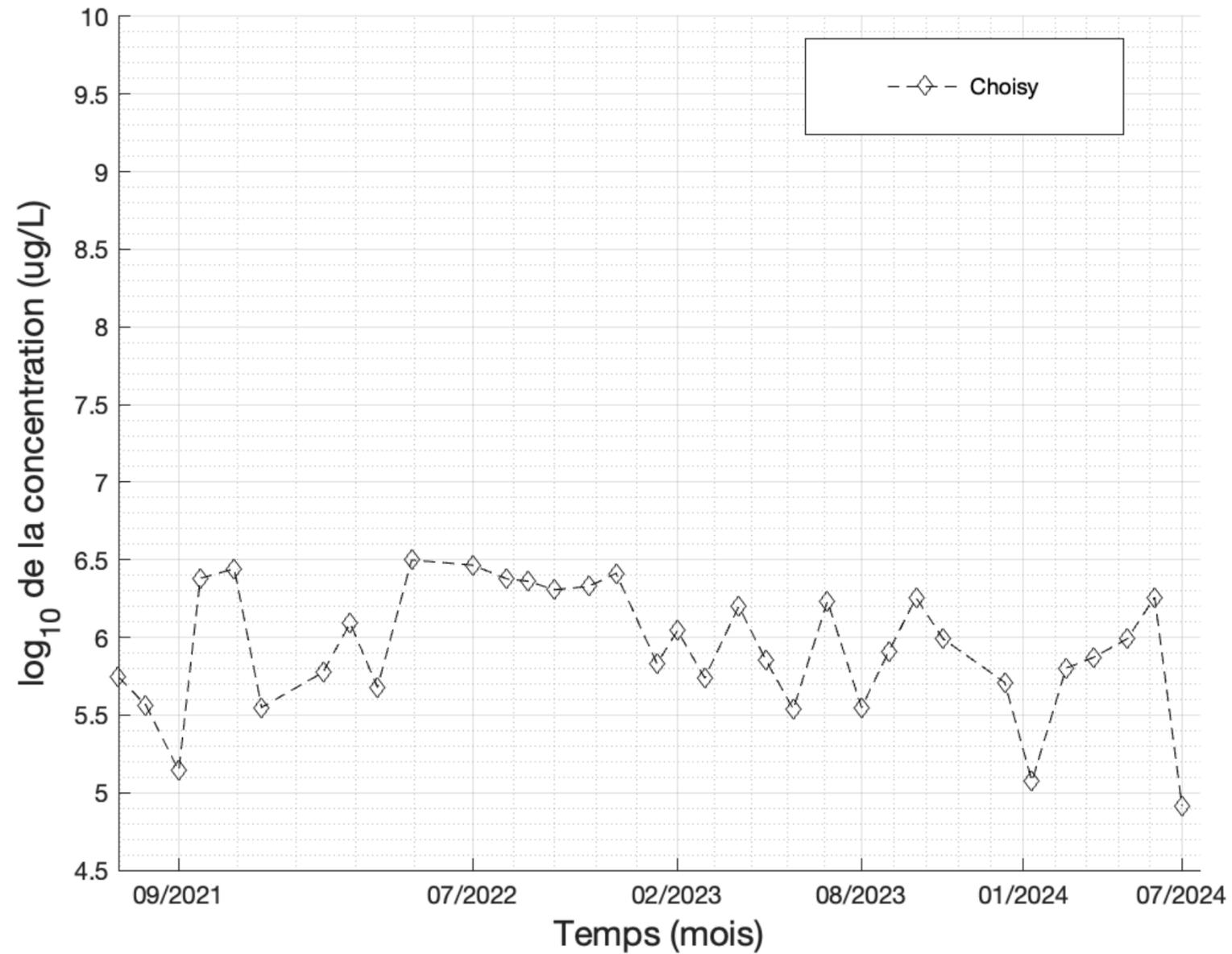


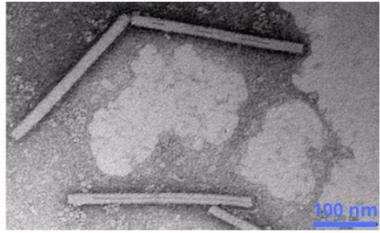
→ Concentration plus élevée à l'aval

→ Concentration des eaux résiduelles jusqu'à 1000 fois supérieure à celles de rivière

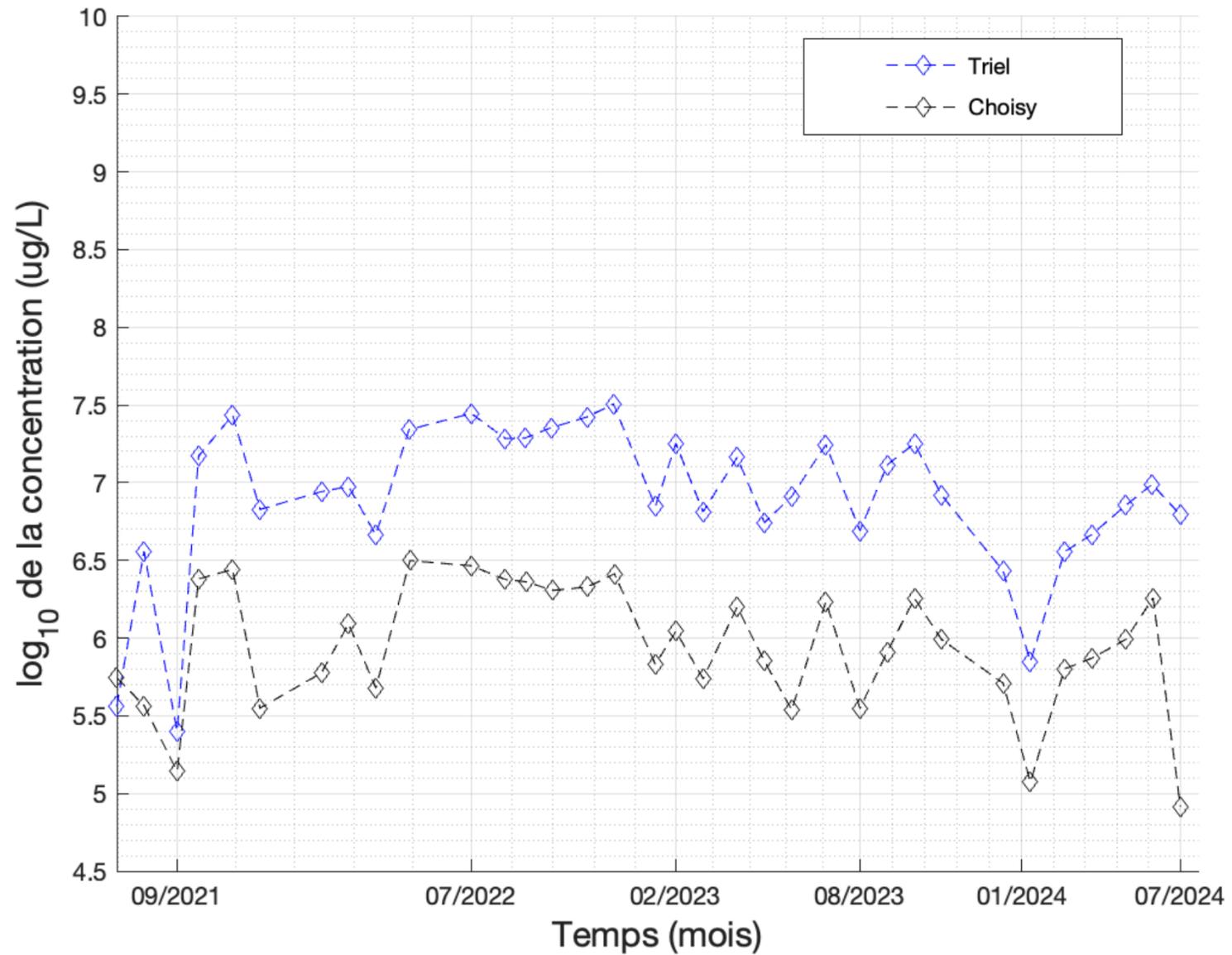


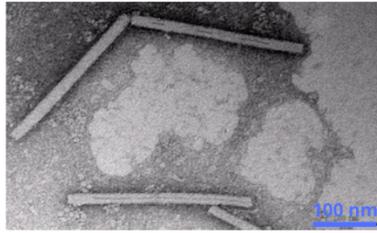
Quelle concentration du PMMoV en milieu naturel et eau résiduelle ?



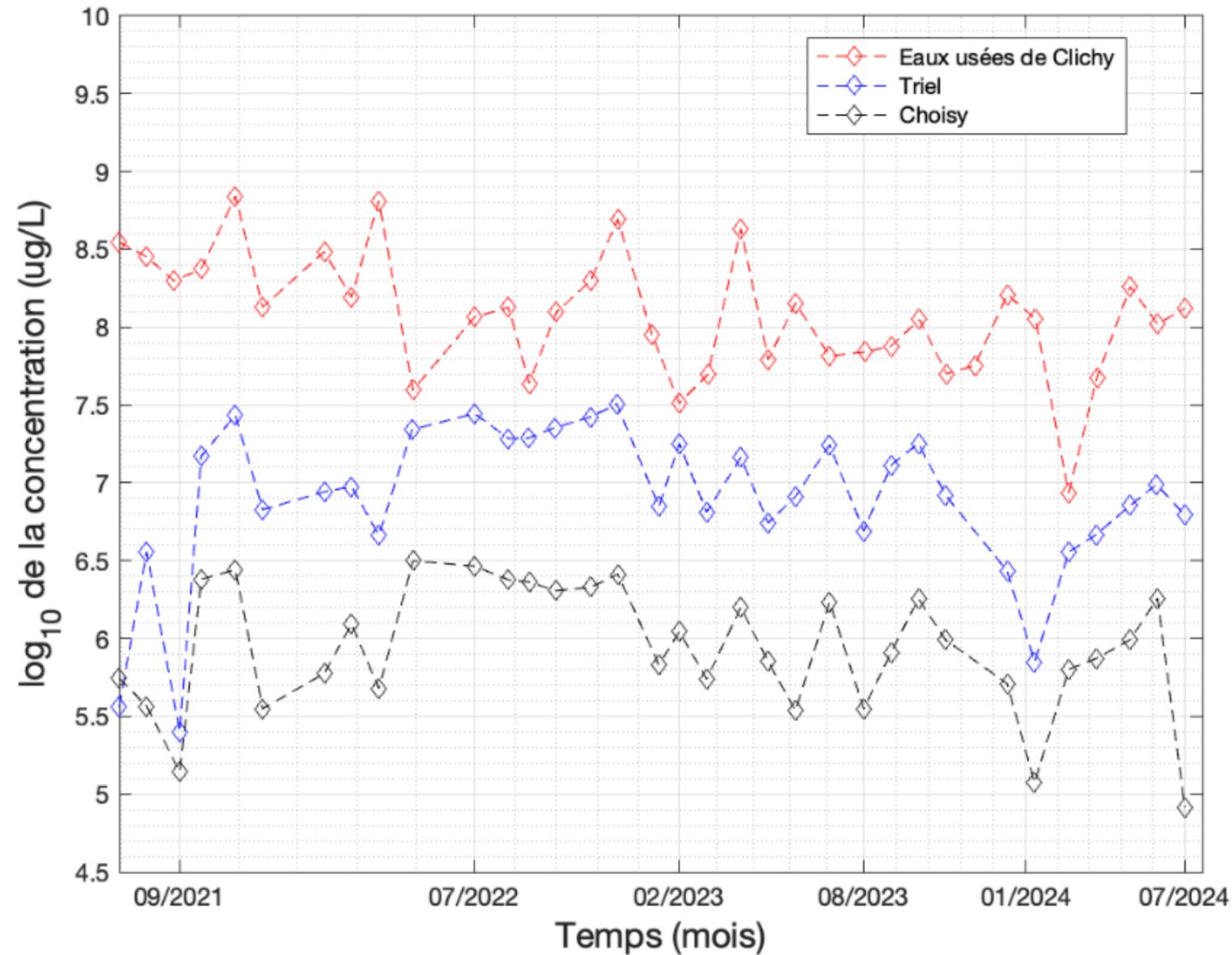


Quelle concentration du PMMoV en milieu naturel et eau résiduelle ?





Quelle concentration du PMMoV en milieu naturel et eau résiduelle ?



- Concentration plus élevée à l'aval
- Concentration des eaux résiduelles jusqu'à 1000 fois supérieure à celles de rivière
- **Apport de virus entre Choisy (amont) et Triel (aval)**

Construction du modèle déterministe de la dynamique des virus

$$\frac{\partial c^{(i)}(t, x)}{\partial t}$$



Variation de la concentration en virus i $c(t, x)$ au cours du temps (t) , en une position (x)

Construction du modèle déterministe de la dynamique des virus

$$\frac{\partial c^{(i)}(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (v(t, x) c^{(i)}(t, x))$$

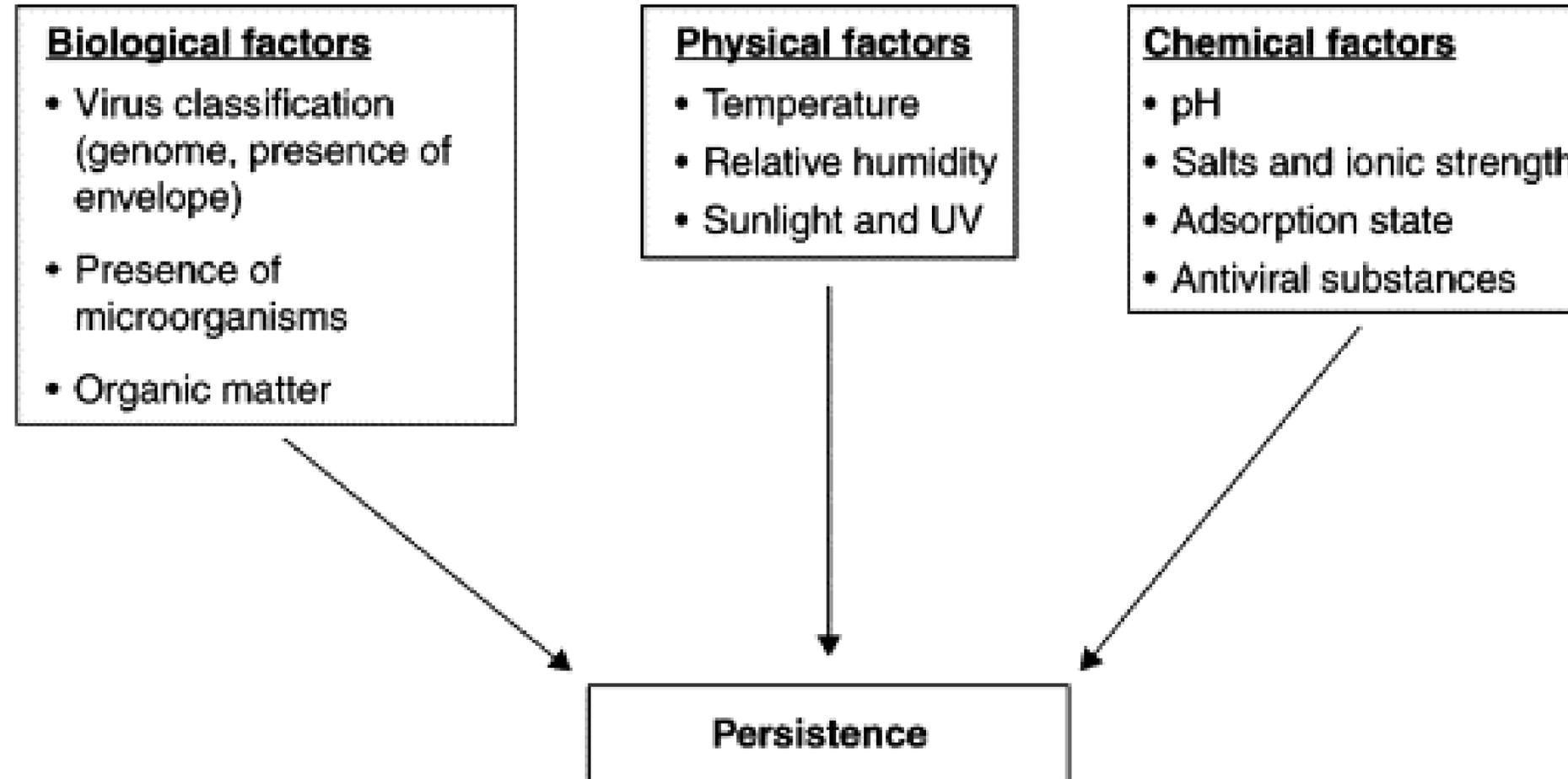
↓

Variation de la concentration en virus i $c(t, x)$ au cours du temps (t) , en une position (x)

↓

Transport des virus par l'eau de vitesse $v(t, x)$: variation spatiale

Facteurs impactant la persistance des virus



(Vasickova et Kovarcik , 2013)

→ **Extinction des virus dans la Seine**

Construction du modèle déterministe de la dynamique des virus

$$\frac{\partial c^{(i)}(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (v(t, x)c^{(i)}(t, x)) = \alpha_i c^{(i)}(t, x) \quad \text{avec } \alpha_i \text{ une constante.}$$

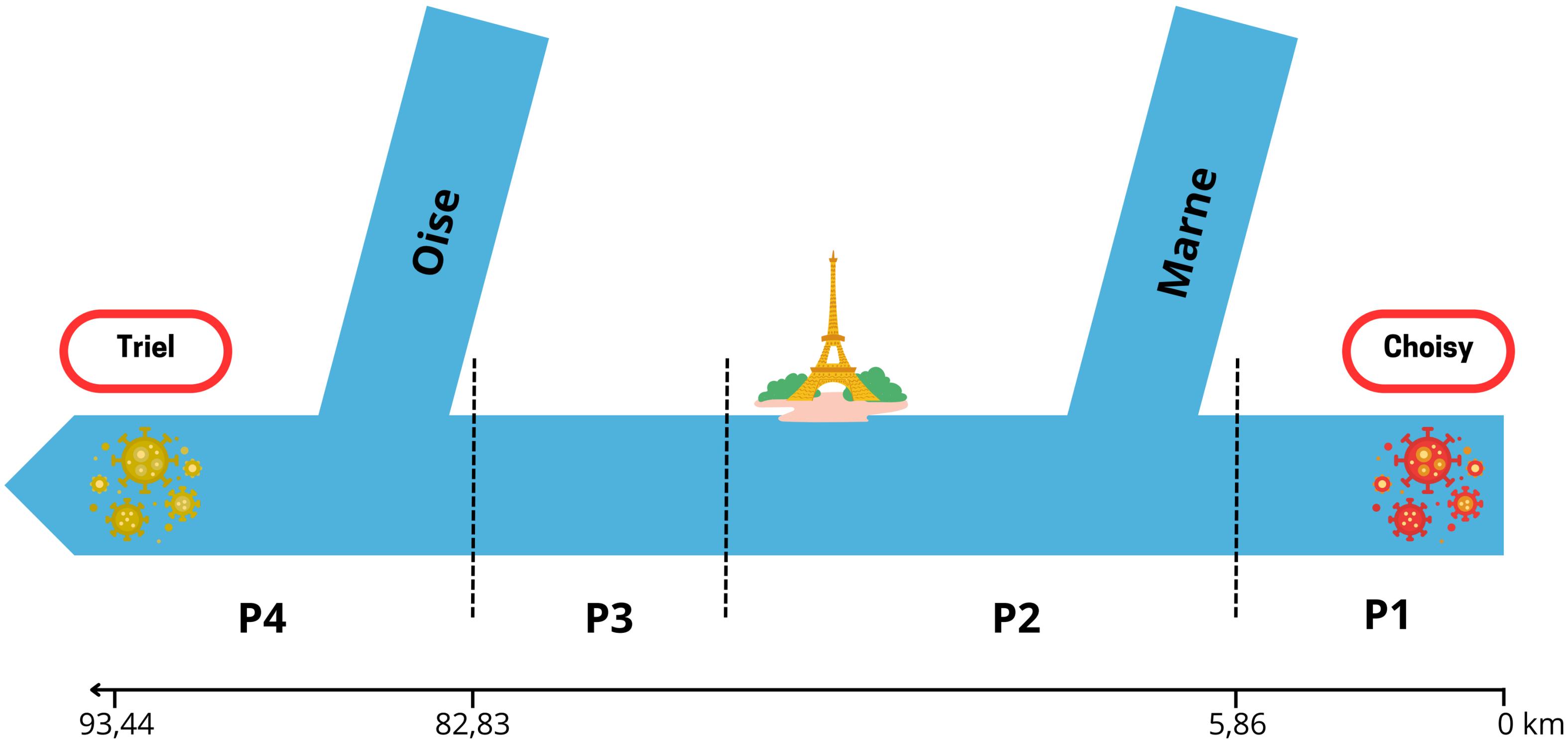
Variation de la concentration en virus i $c(t, x)$ au cours du temps (t) , en une position (x)

Transport des virus par l'eau de vitesse $v(t, x)$: variation spatiale

Décroissance de la concentration en virus i due à un taux constant d'extinction

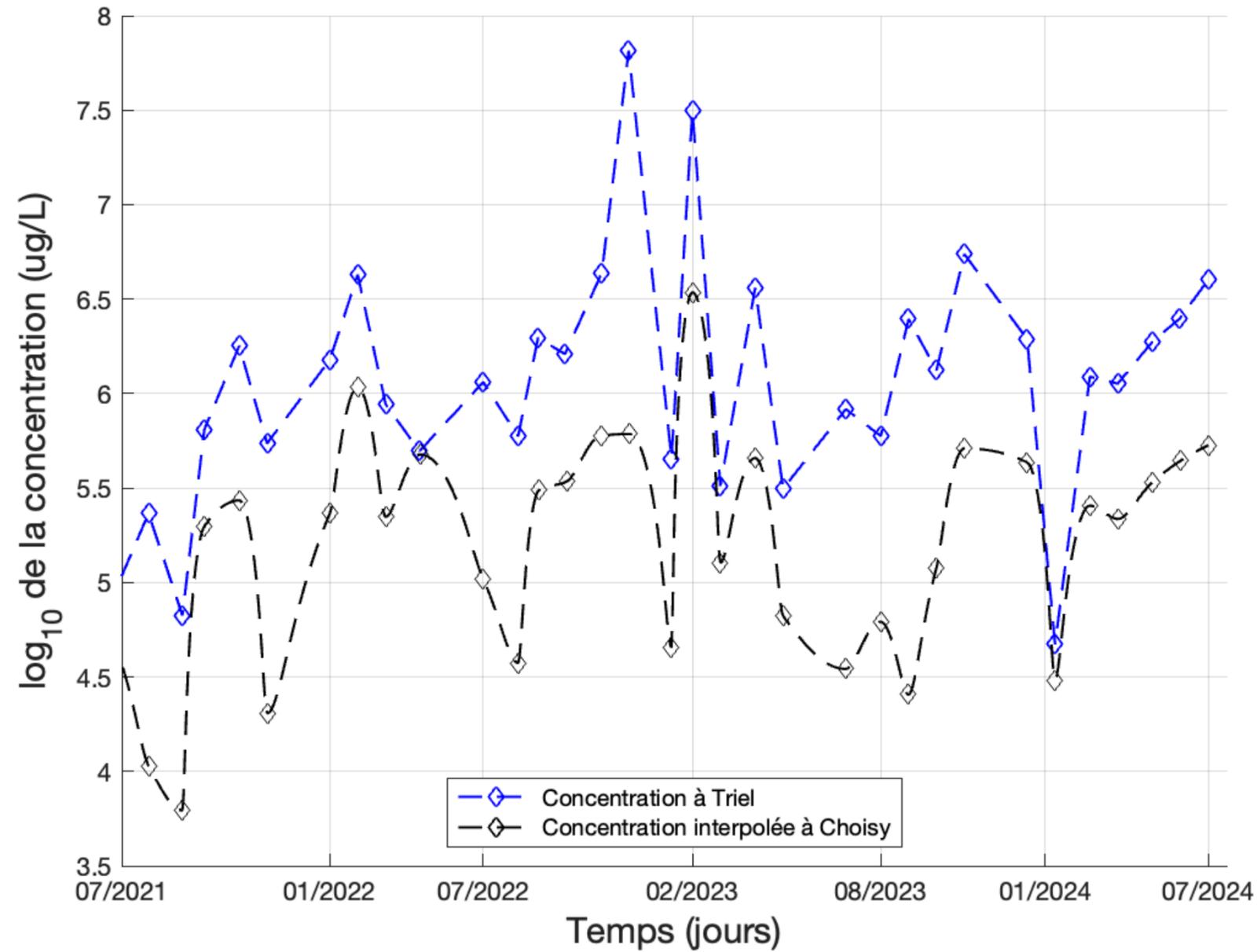
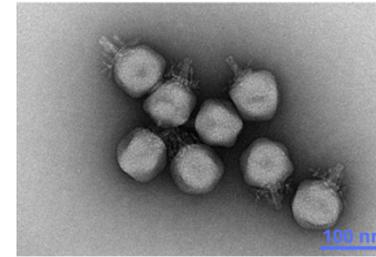
-0.257 pour CrAssphage
-0.088 pour PMMoV

Modélisation du tronçon de la Seine étudié



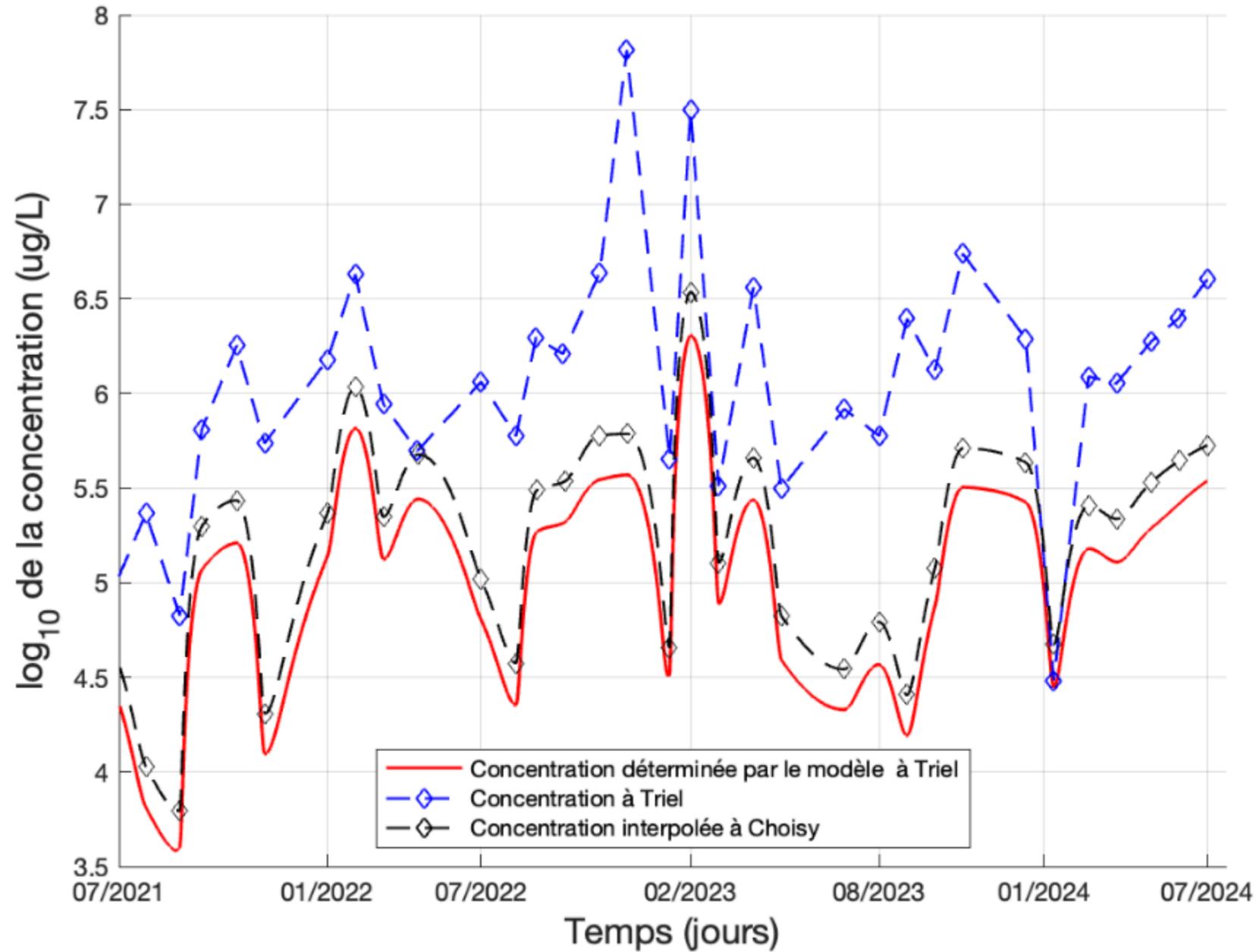
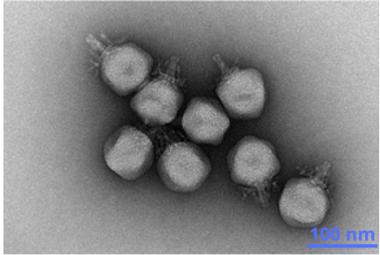
Hypothèse 1/4

Sans apport significatif de virus ?



Hypothèse 1/4

Sans apport significatif de virus ?

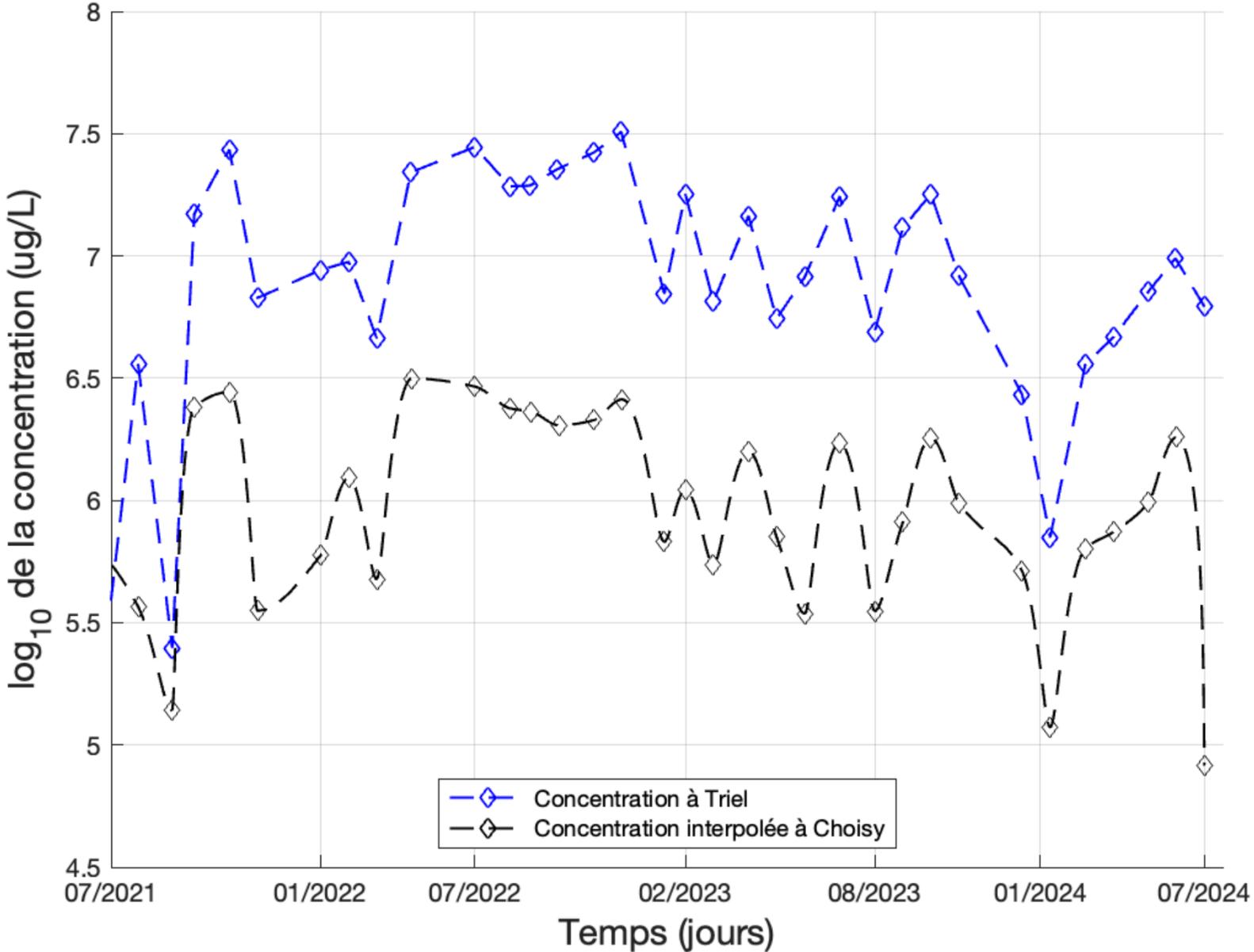
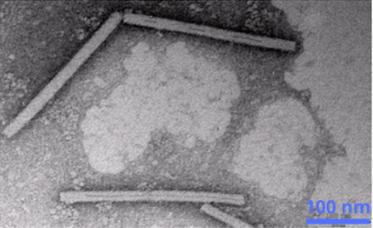


→ Extinction faible et progressive des virus

→ Taux d'extinction de 9 jours pour le CrAssphage

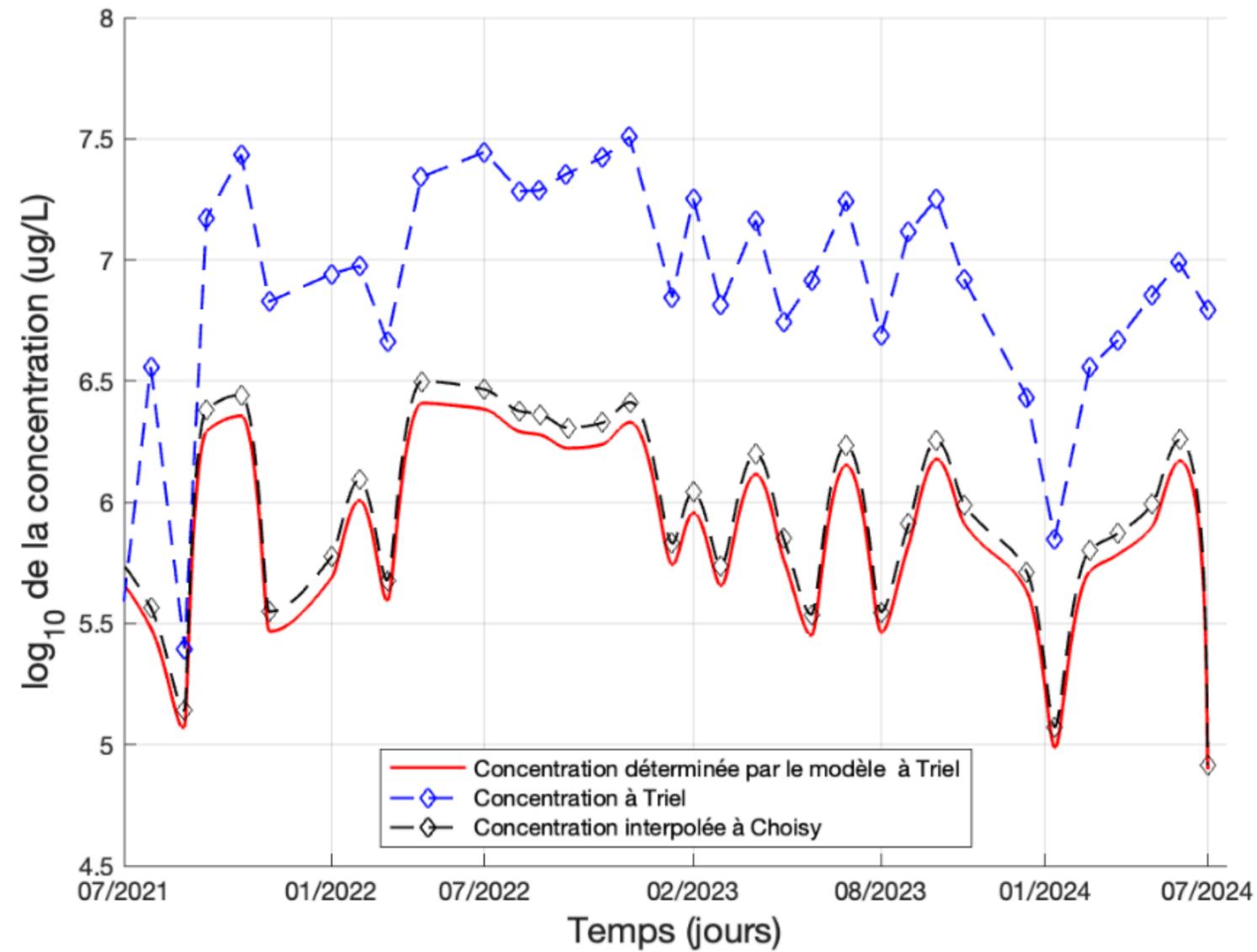
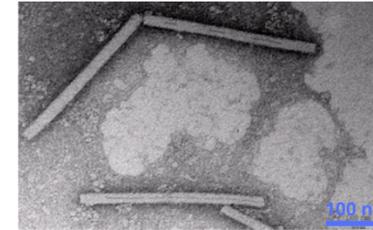
Hypothèse 1/4

Sans apport significatif de virus ?



Hypothèse 1/4

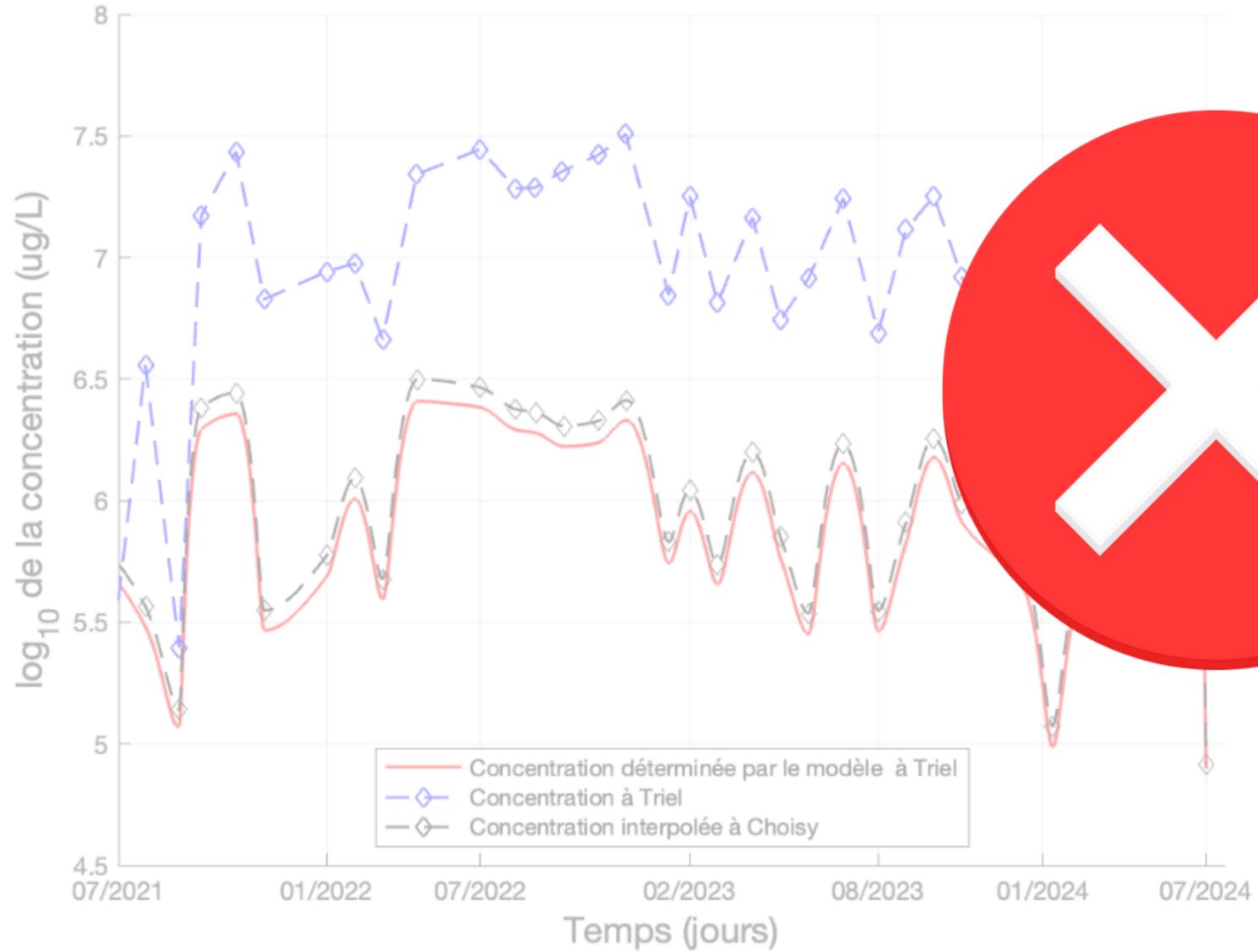
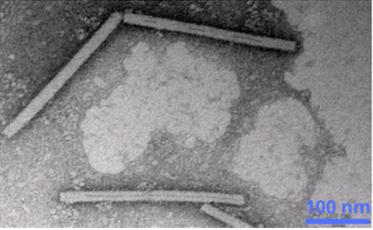
Sans apport significatif de virus ?



- Extinction faible et progressive des virus
- Taux d'extinction de 25 jours pour le PMMoV

Hypothèse 1/4

Sans apport significatif de virus ?

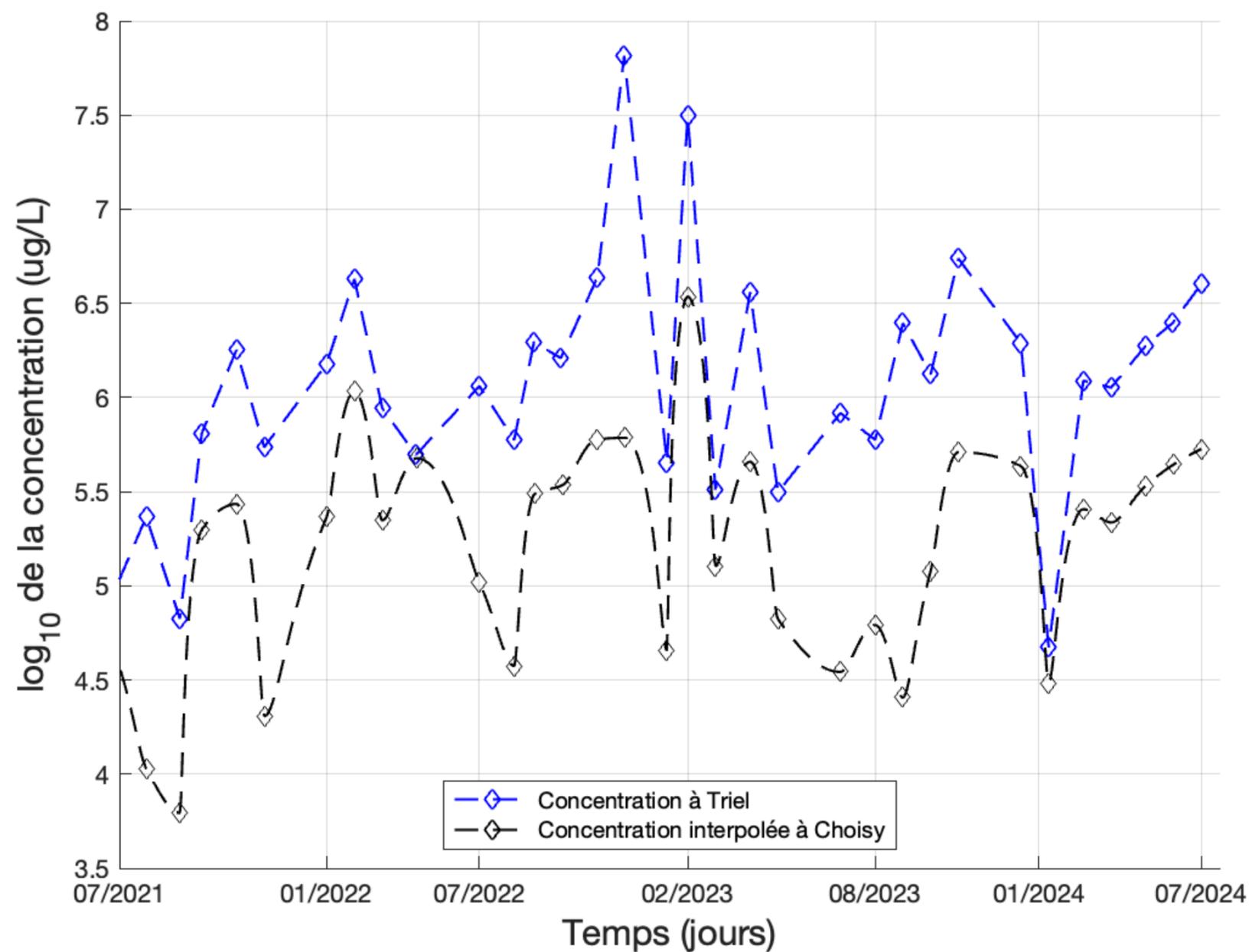
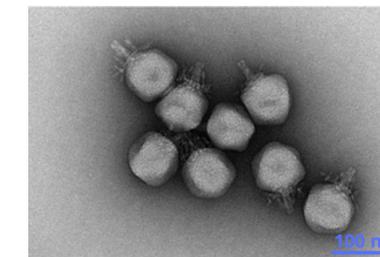


Extinction faible et progressive des virus

Taux d'extinction de 25 jours pour le PMMoV

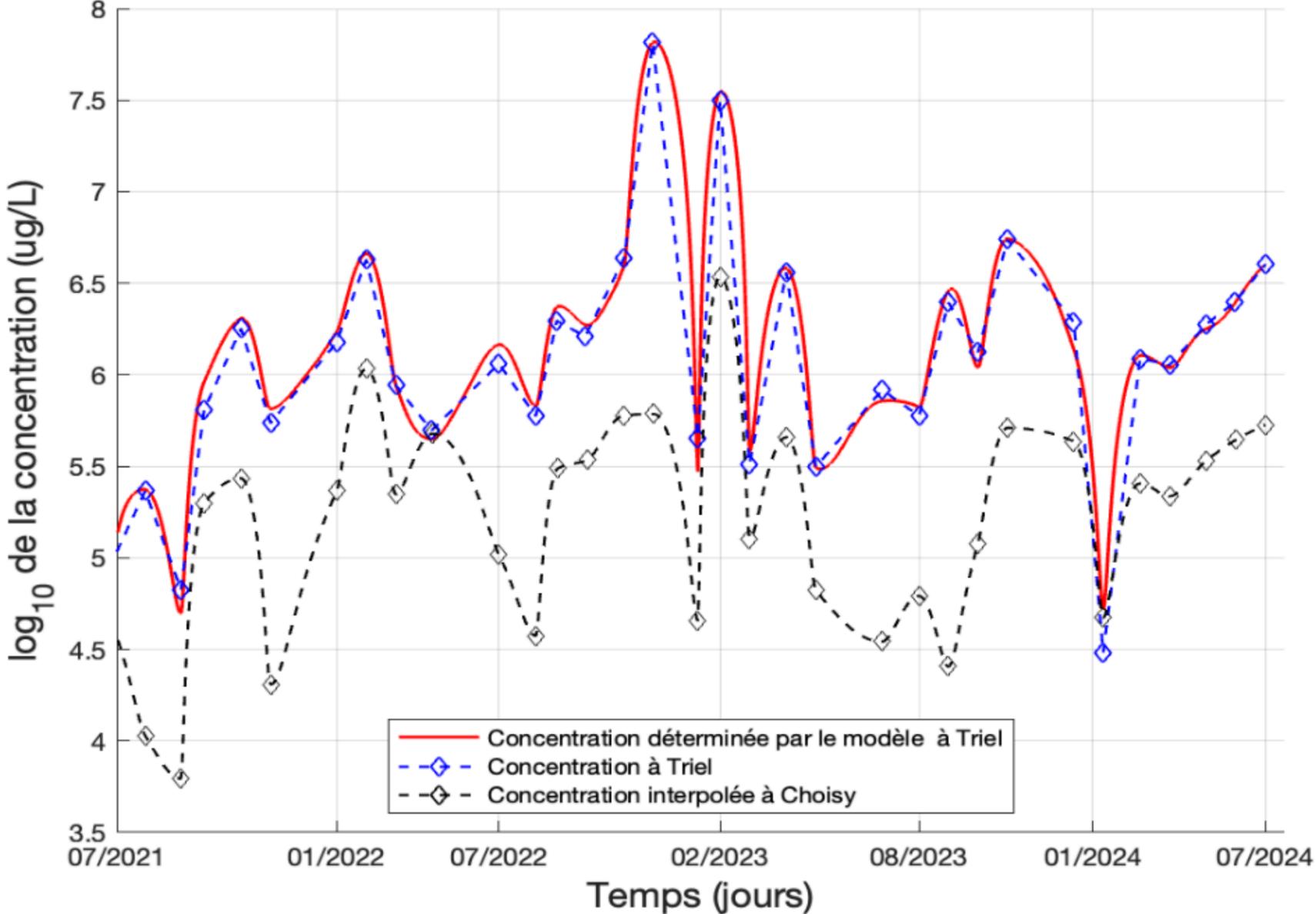
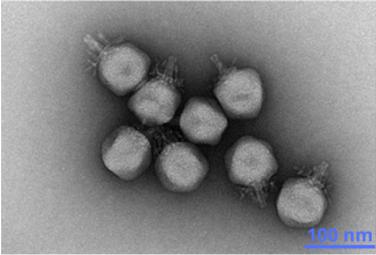
Hypothèse 2/4

Quelle concentration nécessaire en virus
CrAssphage provenant de la Marne ?



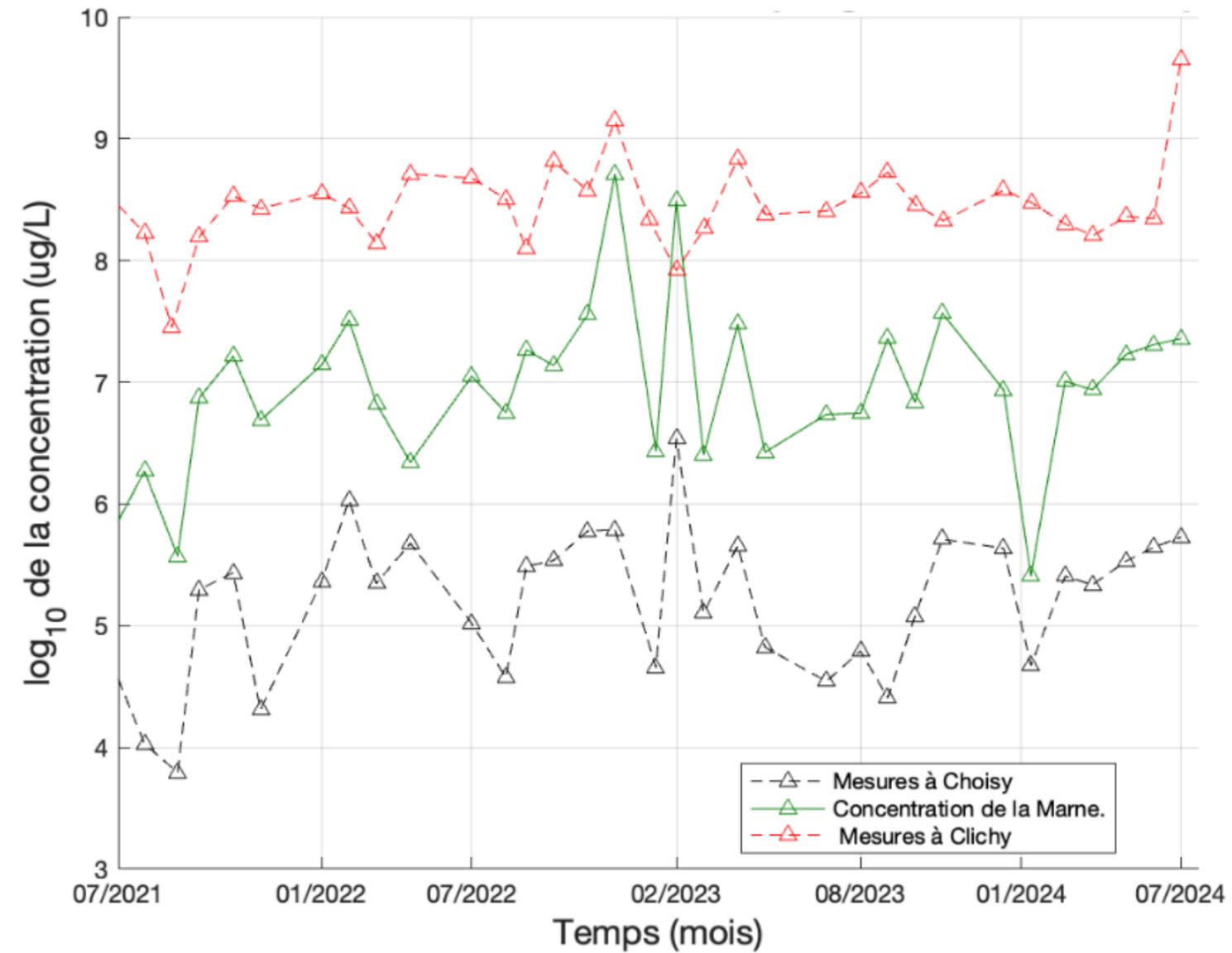
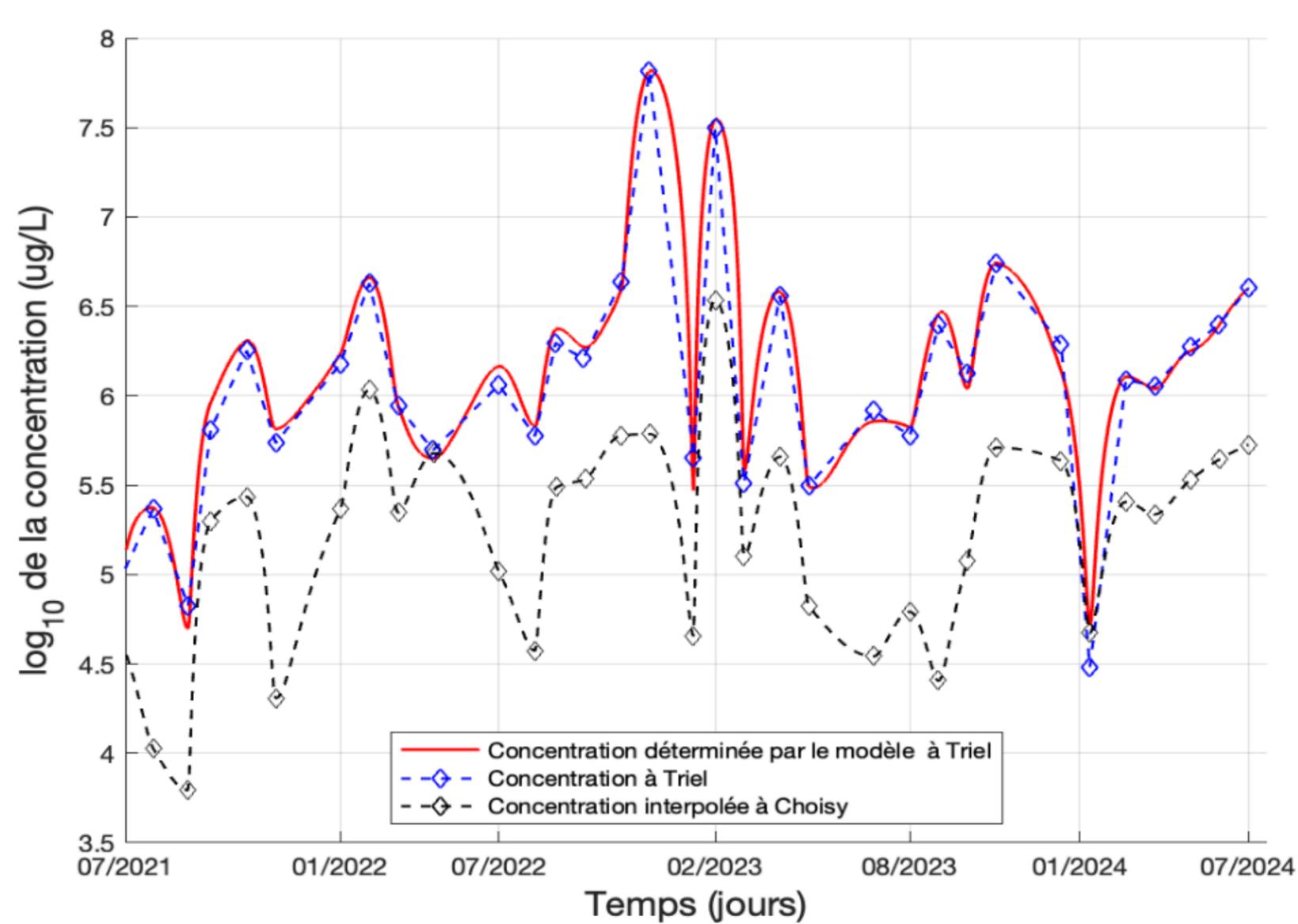
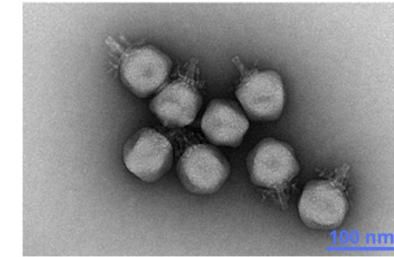
Hypothèse 2/4

Quelle concentration nécessaire en virus CrAssphage provenant de la Marne ?



Hypothèse 2/4

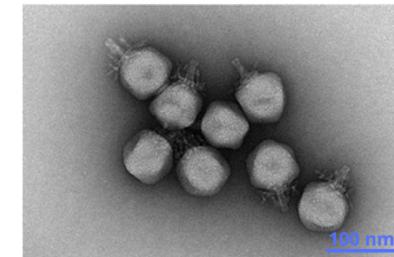
Quelle concentration nécessaire en virus CrAssphage provenant de la Marne ?



→ Concentration de la Marne devrait être 100 fois la concentration à Choisy

Hypothèse 2/4

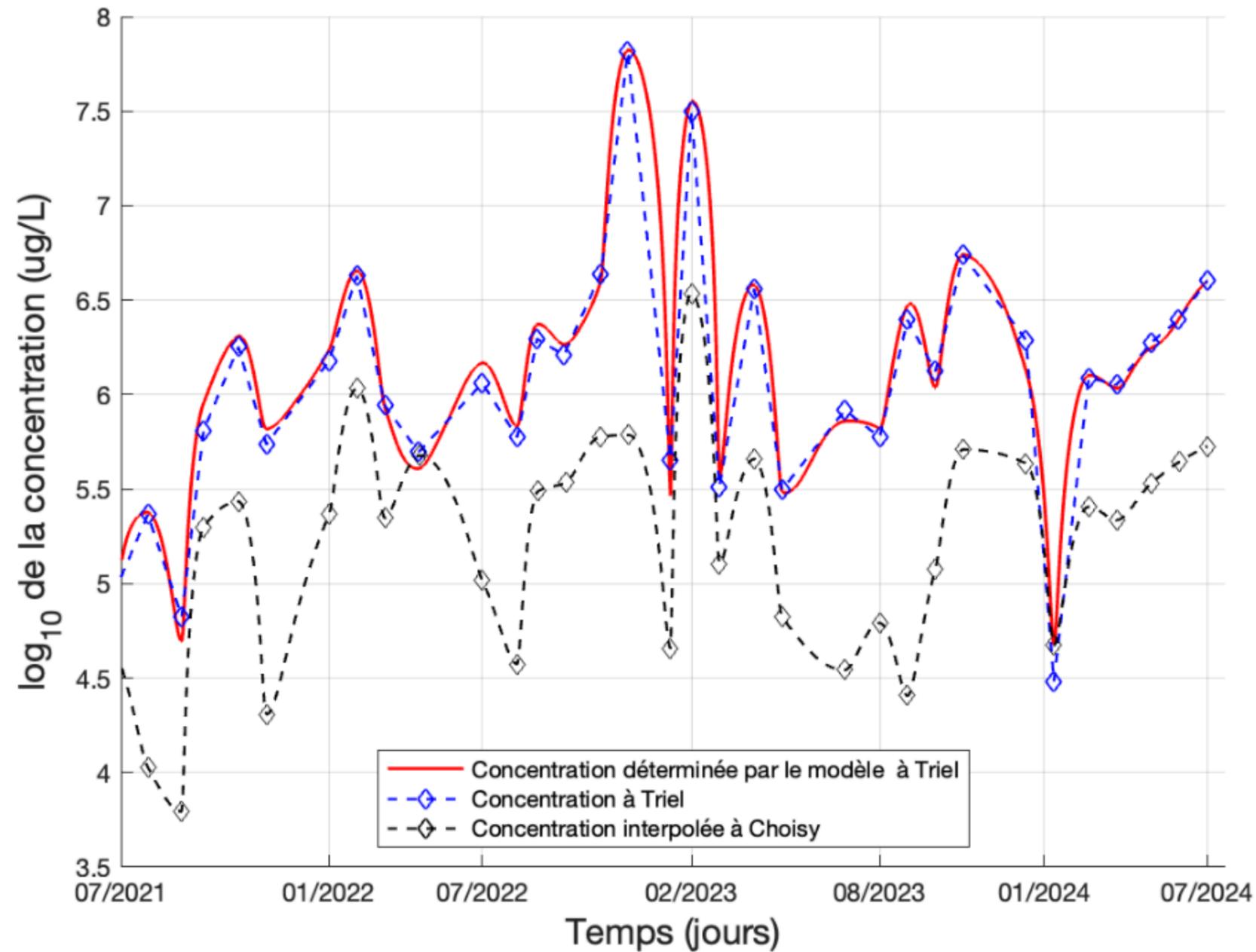
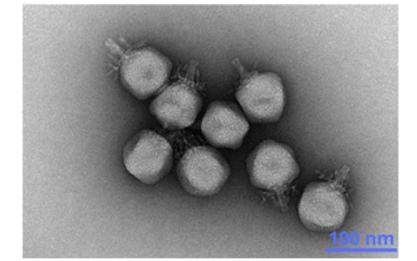
Quelle concentration nécessaire en virus CrAssphage provenant de la Marne ?



→ Concentration de la Marne devrait être 100 fois la concentration à Choisy

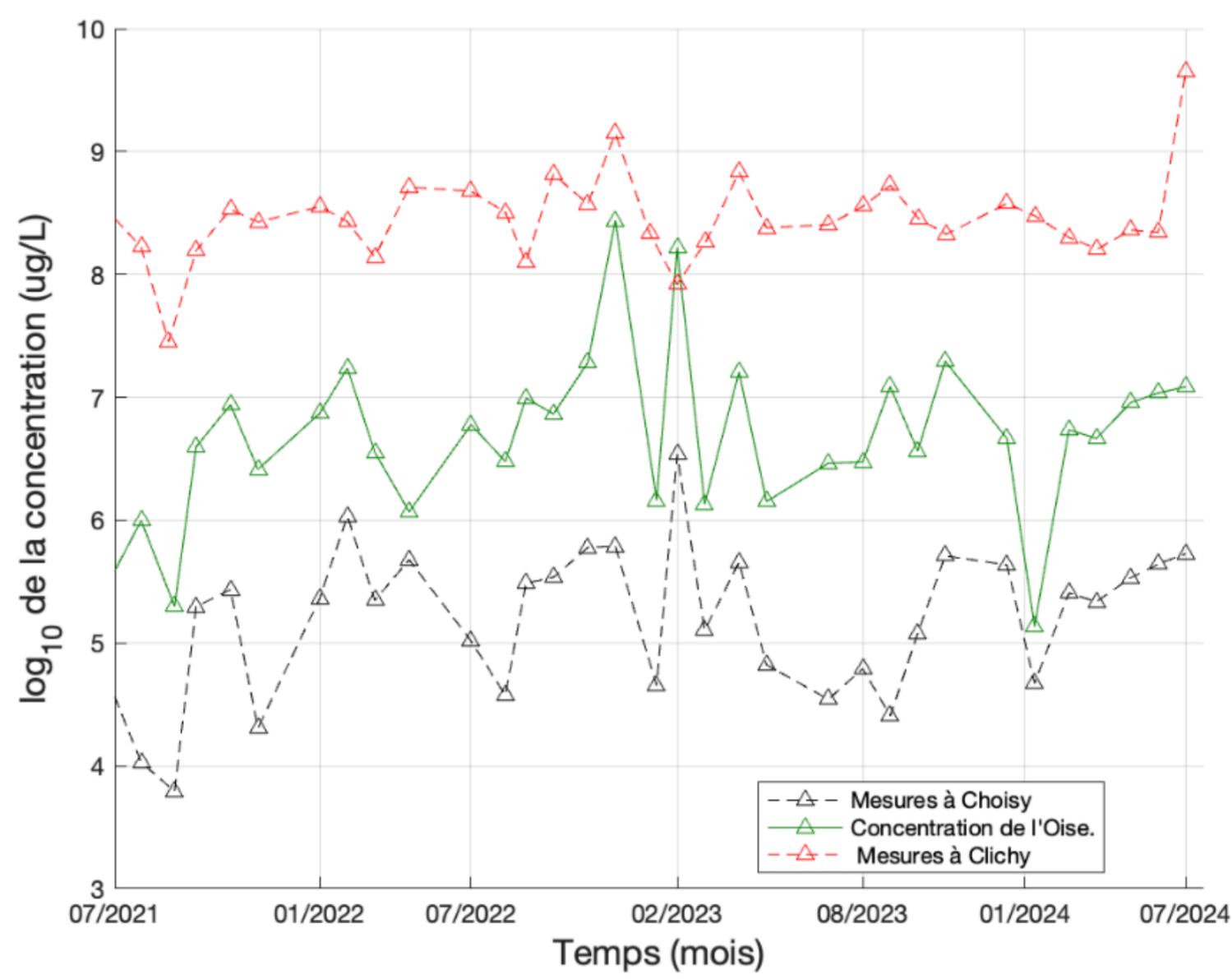
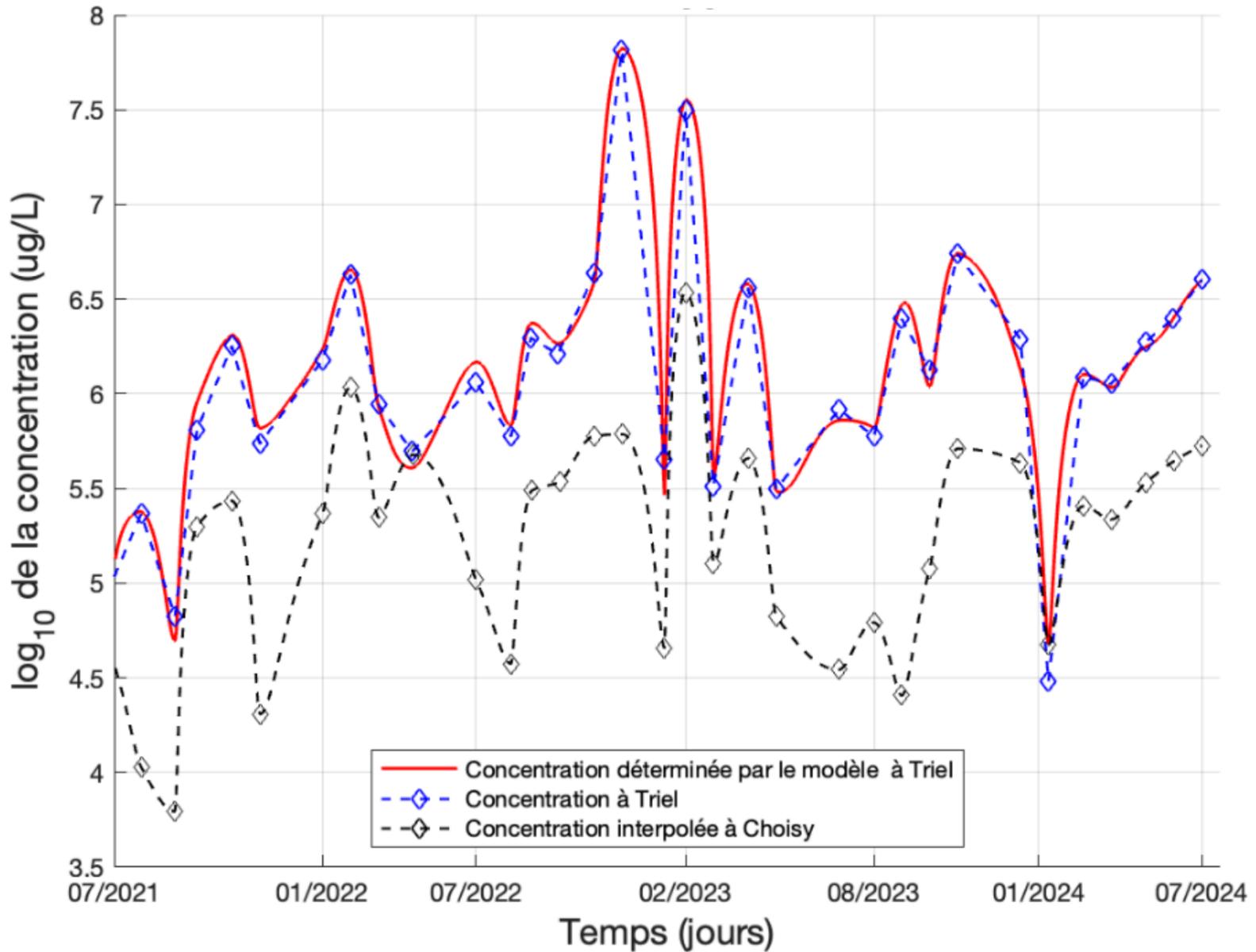
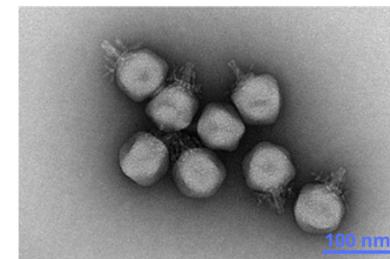
Hypothèse 3/4

Quelle concentration nécessaire en virus CrAssphage provenant de l'Oise ?



Hypothèse 3/4

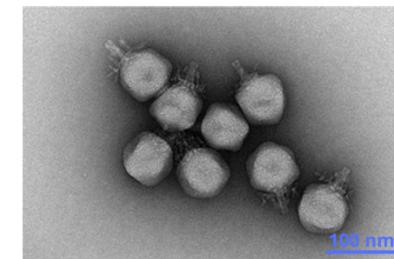
Quelle concentration nécessaire en virus CrAssphage provenant de l'Oise ?



→ Concentration de l'Oise devrait être 60 fois la concentration à Choisy

Hypothèse 3/4

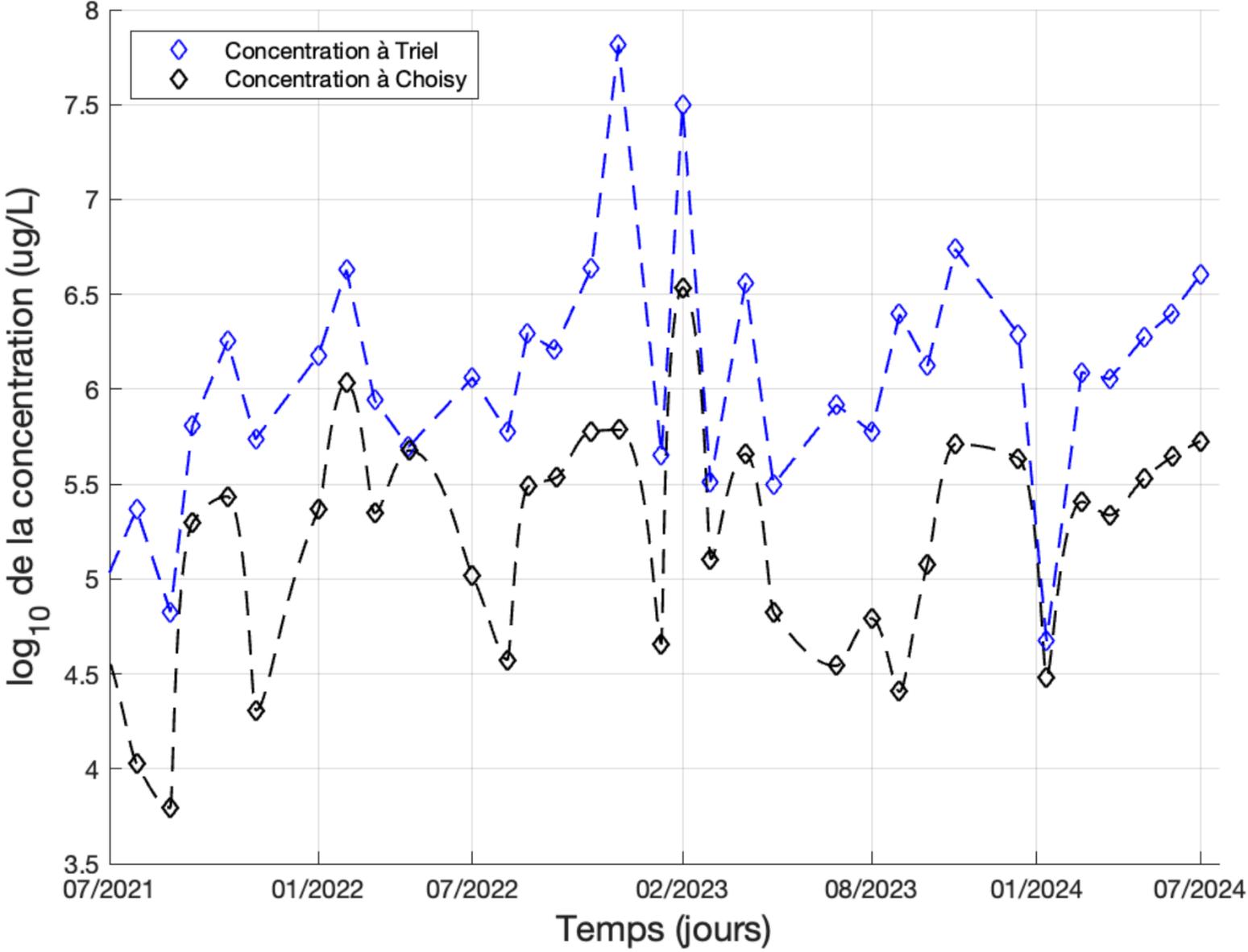
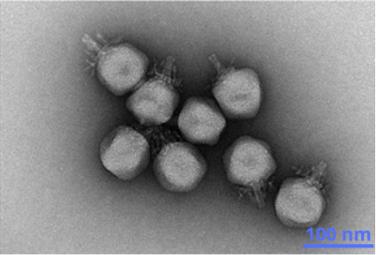
Quelle concentration nécessaire en virus CrAssphage provenant de l'Oise ?



→ Concentration de l'Oise devrait être 60 fois la concentration à Choisy

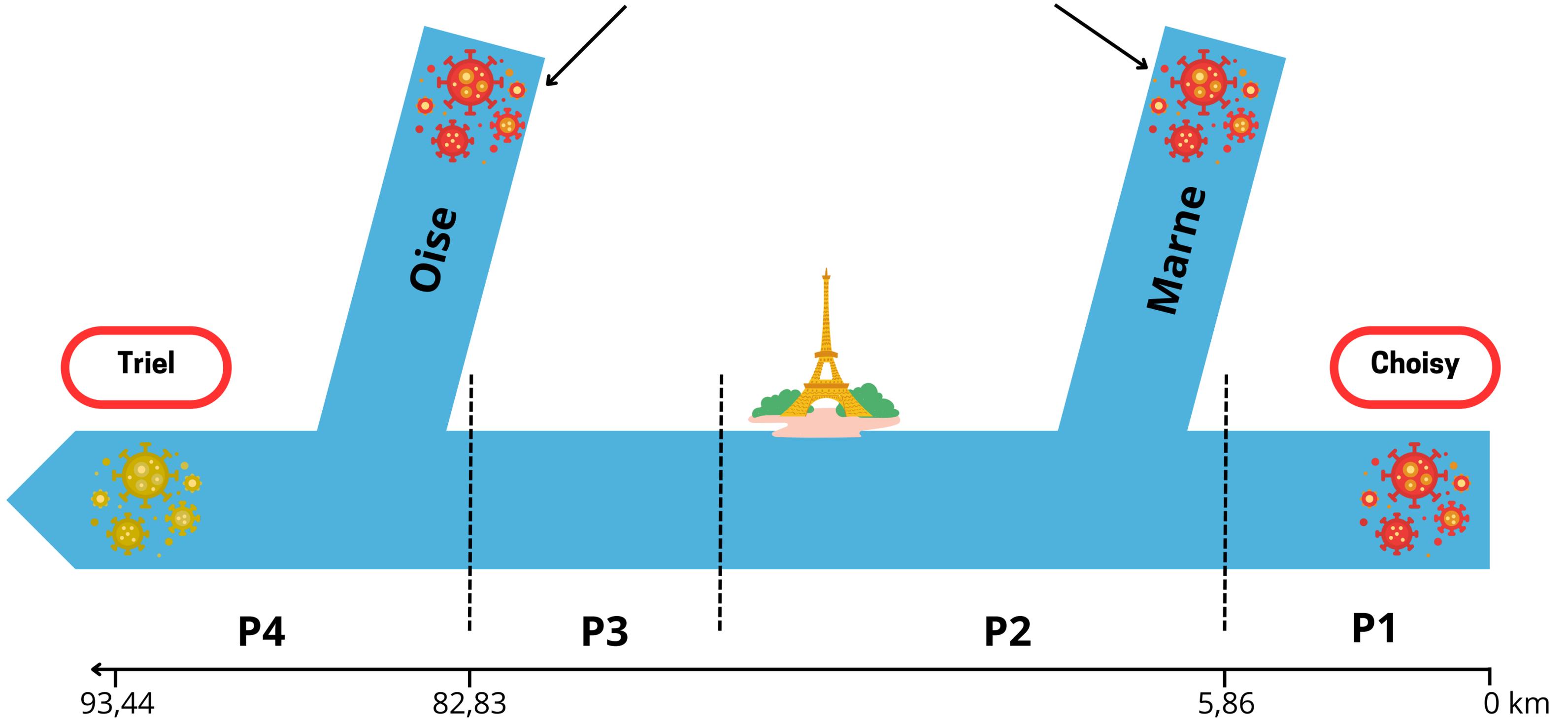
Hypothèse 4/4

Eau résiduelle entre Choisy et Triel ?



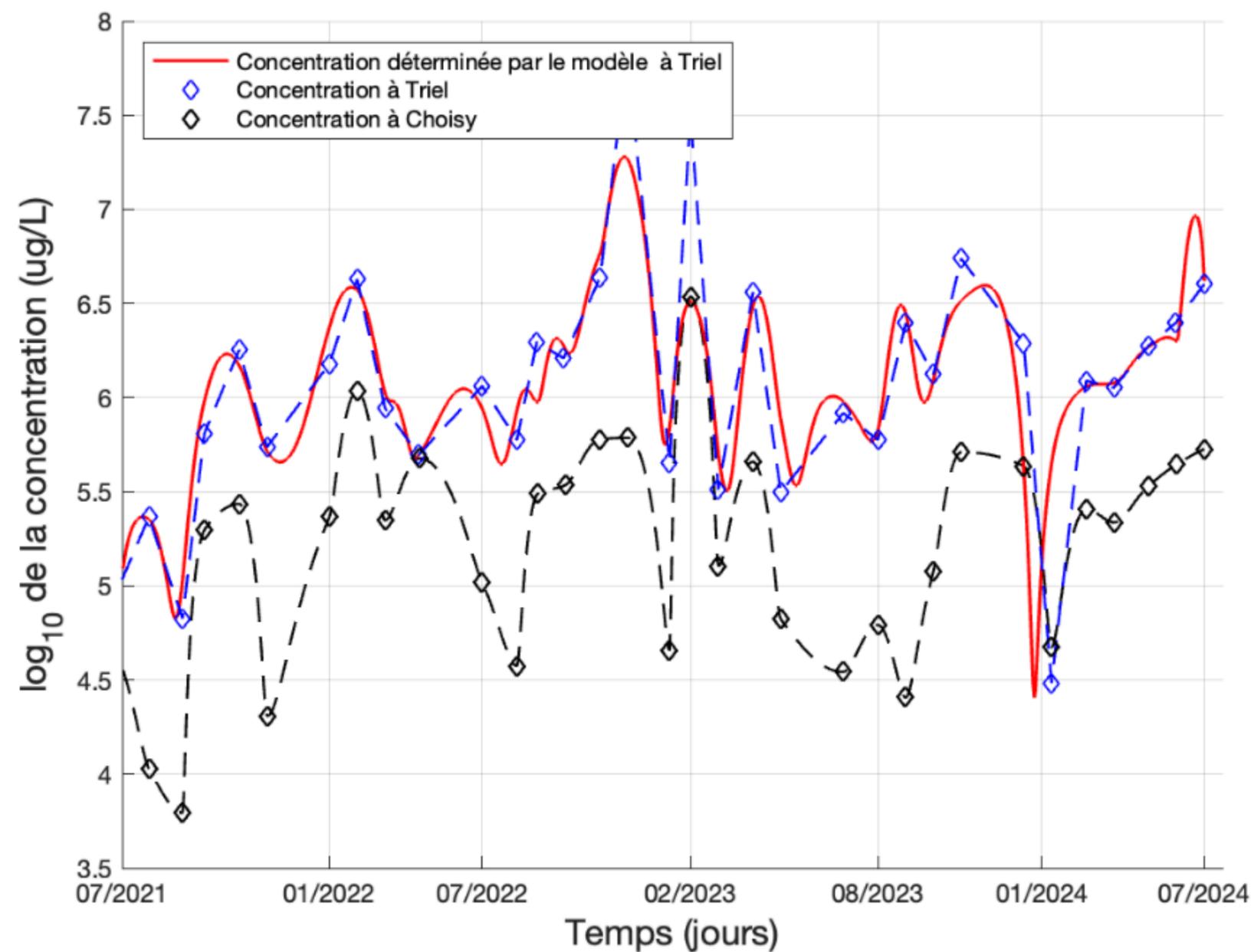
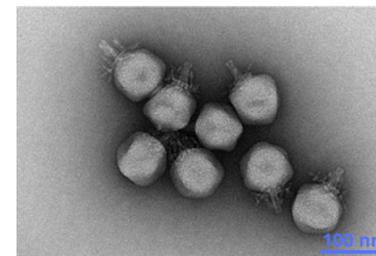
Modélisation du tronçon de la Seine étudié

Extrapolation des concentrations



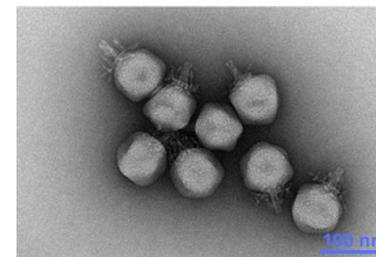
Hypothèse 4/4

Eau résiduelle entre Choisy et Triel ?

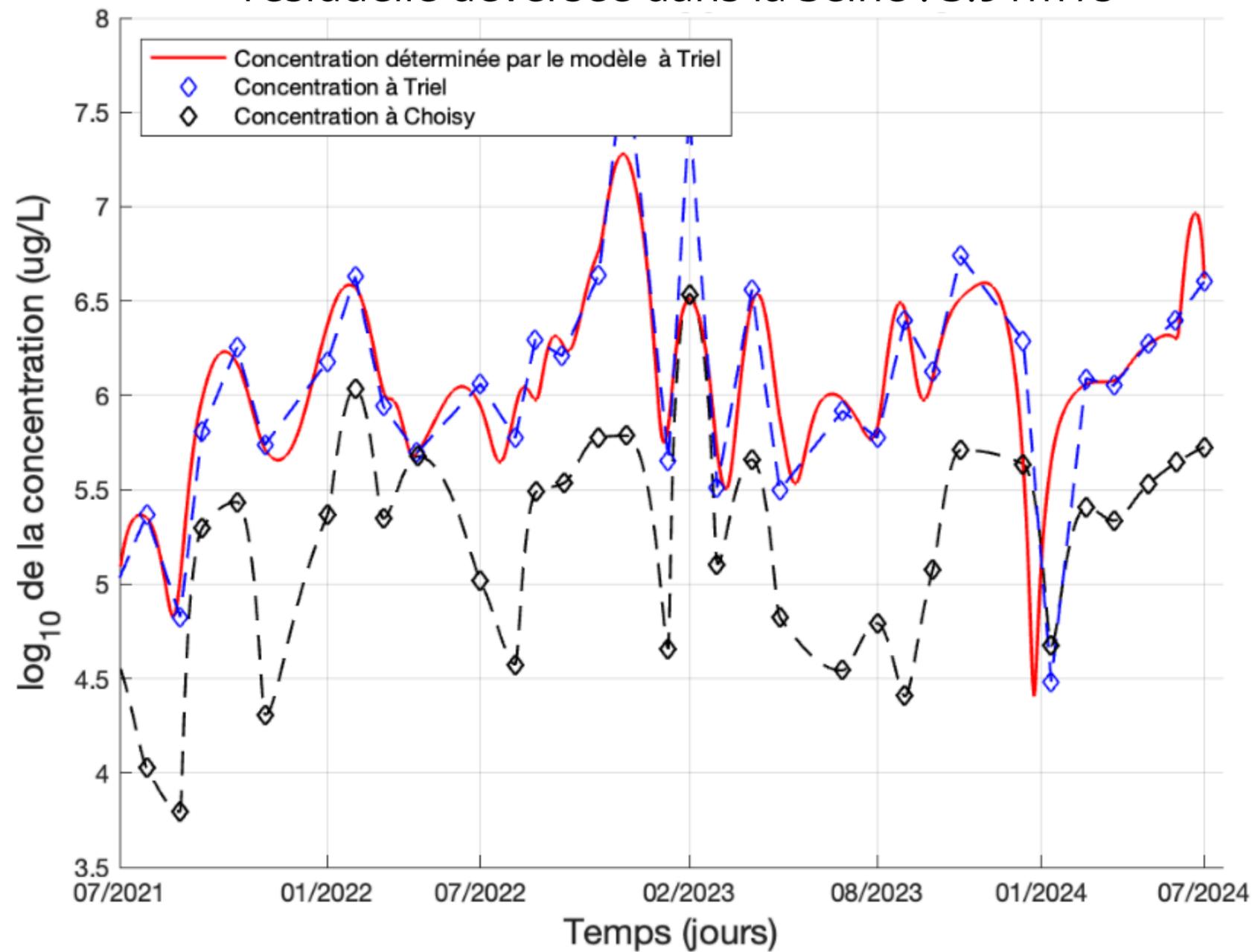


Hypothèse 4/4

Eau résiduelle entre Choisy et Triel ?



→ Débit moyen nécessaire d'une eau résiduelle déversée dans la Seine : $3.91\text{m}^3/\text{s}$

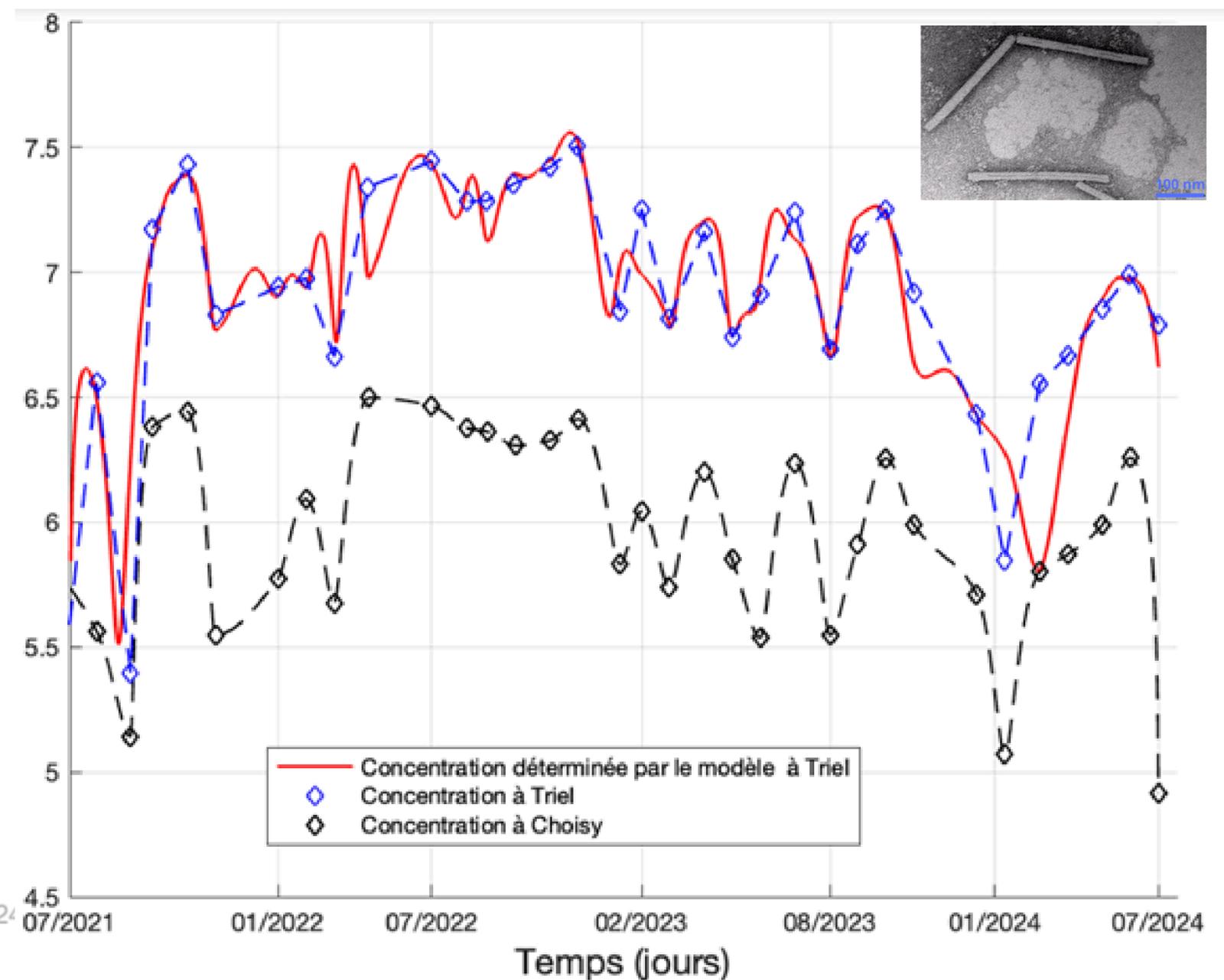
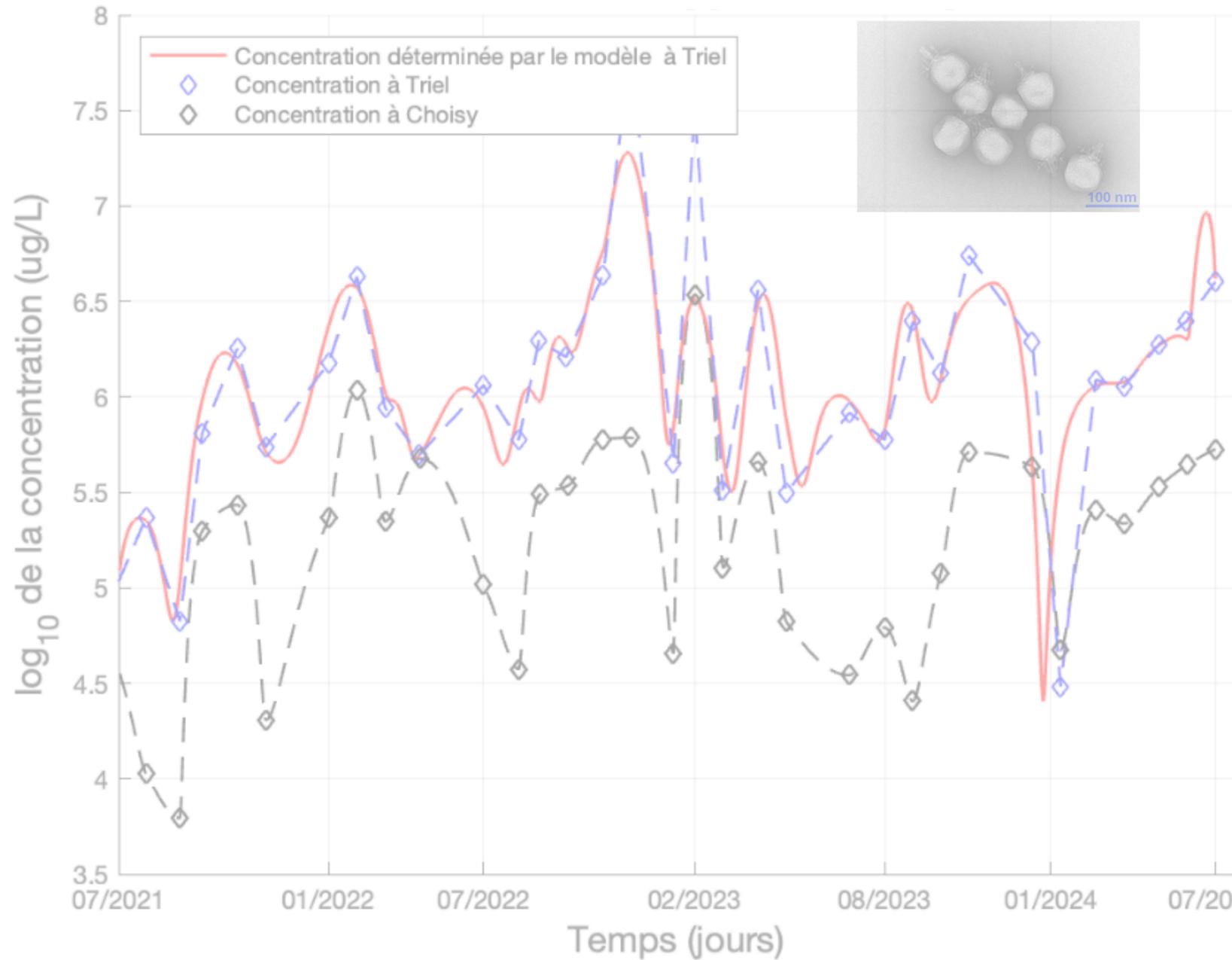


Hypothèse 4/4

Eau résiduelle entre Choisy et Triel ?

→ Débit moyen nécessaire d'une eau résiduelle déversée dans la Seine : $3.91\text{ m}^3/\text{s}$

→ Débit moyen nécessaire d'une eau résiduelle déversée dans la Seine : $39\text{ m}^3/\text{s}$



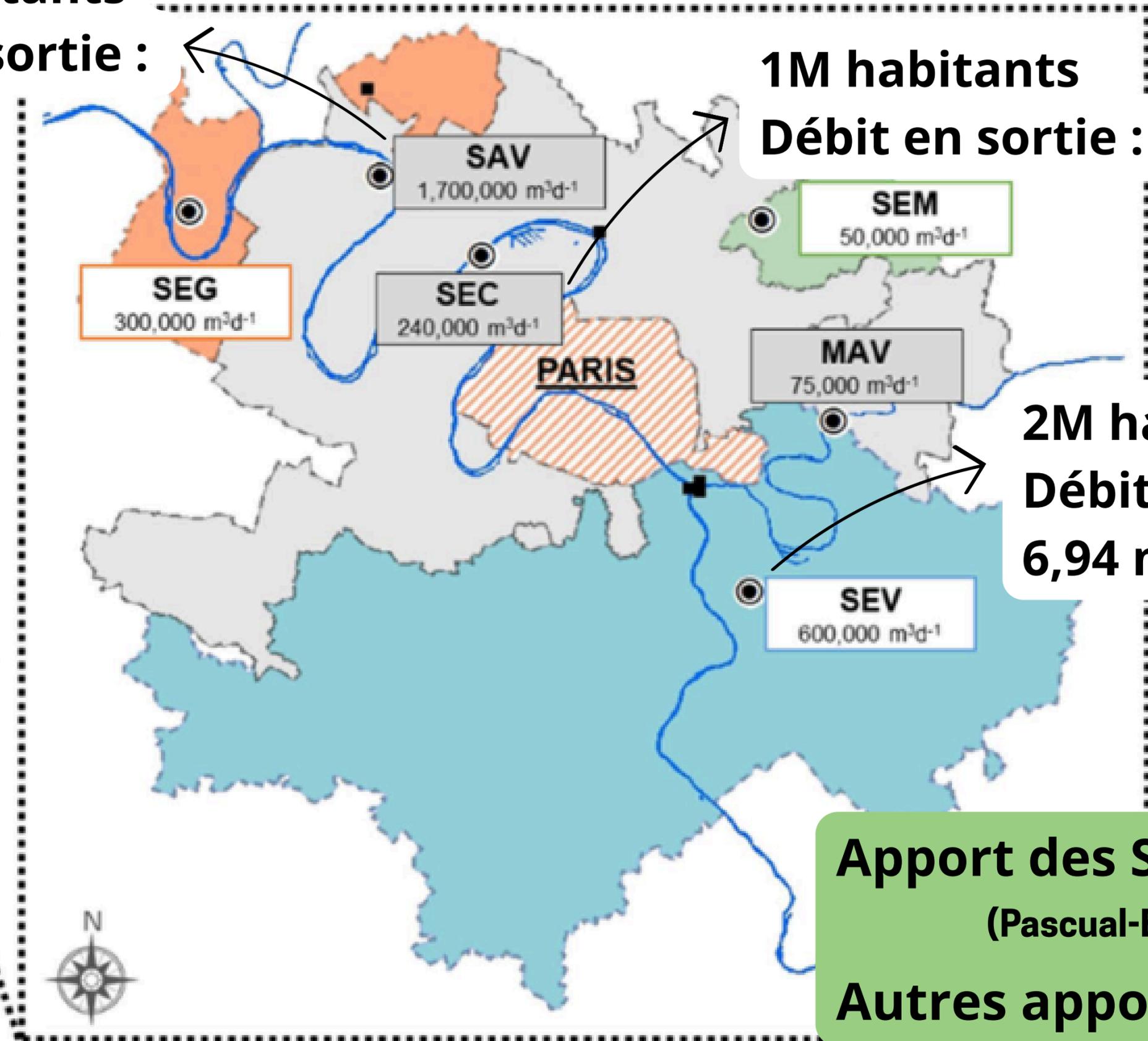
6,5M habitants

Débit en sortie :

23 m³/s



**Débit moyen de
la Seine dans
l'agglomération
parisienne :**
100 à 600 m³/s



1M habitants

Débit en sortie : 2,77 m³/s

2M habitants

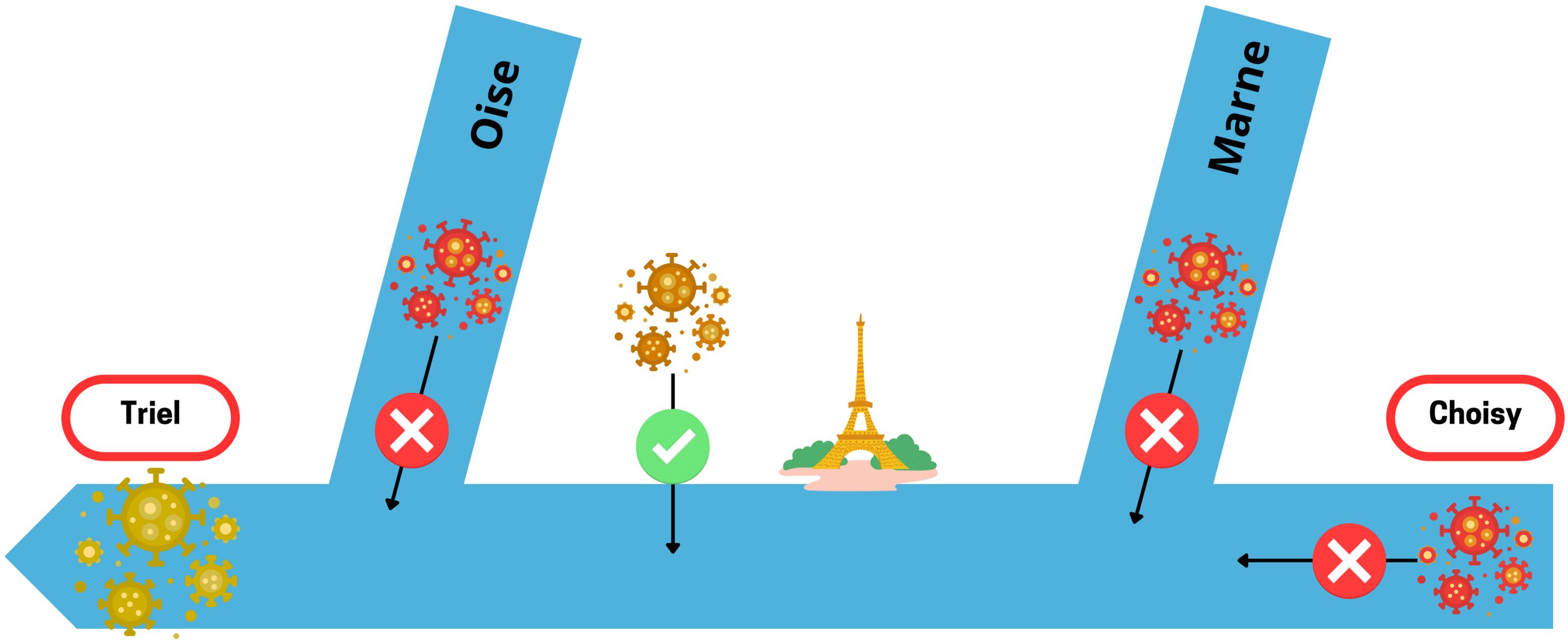
**Débit en sortie :
6,94 m³/s**

Apport des STEU ?

(Pascual-Benito et al. ,2020)

Autres apports ?

Conclusion



Perspectives

(1) Ajuster le modèle en prenant en compte d'autres paramètres :

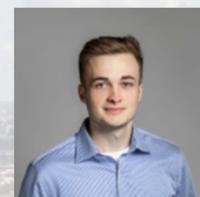
$$\mathbf{X} + \mathbf{X} + \frac{\partial c^{(i)}(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (v(t, x)c^{(i)}(t, x)) = \alpha_i c^{(i)}(t, x)$$

- La diffusion des virus dans l'eau (sédimentation et navigation)
- Conséquences de fortes précipitations : ruissellement, débordements (Mouchel *et al.*, 2021)

(2) Autres mesures : dans la Marne et l'Oise avant leur confluence avec la Seine, entre Choisy et Triel

(3) Regarder d'autres potentiels bioindicateurs : les *microviridae*

Remerciements



Louis Ramseyer Valérie Monbet Fabrice Mahé



Céline Roose-Amsaleg Achim Quaiser



SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL POUR L'ASSAINISSEMENT
SIAAP
DE L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE

MeSeine
Innovation

Jeremy Mougin
Erwan Garcia-Gonzalez
Véronique Brémont
Anthony Marconi
Vincent Jauzein

Eloïse De Treden
Anne-Sophie Permal
Carlyne Lacroix
Eléonore Thiry
Sabrina Guérin



Collab'
Maths et Entreprises
appel à projets
MATHéo
partenariat entre la recherche académique et l'industrie
co-financement de projets sur les
Mathématiques de l'Eau.



aMies
LES MATHS
VECTEUR D'INNOVATION



**Pour en savoir plus sur ma thèse,
rendez-vous sur Inneauvation.fr**

