

Modélisation des dynamiques bactériennes

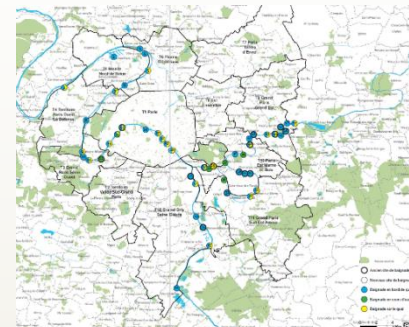
dans les rivières de l'agglomération parisienne
pour une aide à la gestion du risque baignade

J.M. Mouchel¹, P. Dupain^{1,2}, S. Housni², V. Jauzein², V. Rocher²

¹. UMR METIS, Sorbonne-Université, CNRS, EPHE, Paris

². Direction Innovation, SIAAP, Colombes

Rappel des enjeux : projet francilien de la baignade

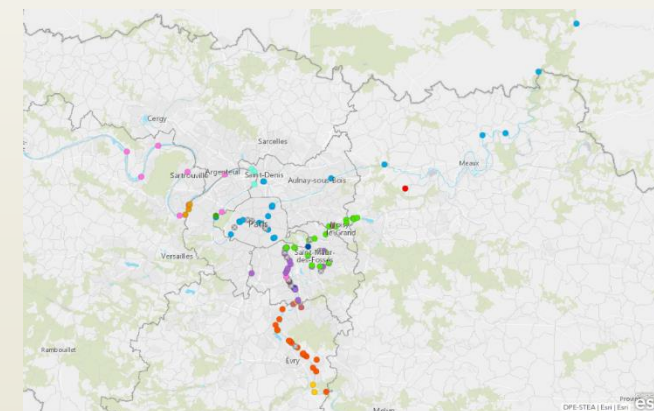


**Jeux Olympiques et
Paralympiques de 2024**

Sites de baignade en héritage

Conséquence :

- Une forte mobilisation en faveur des projets de baignade en Seine
- Production de données nouvelles, notamment sur la qualité de l'eau, qui permettent entre autre de revisiter les modèles de simulation de la qualité



Stations de suivi de la qualité bactériologique
Source : Ville de Paris

ProSe bactériologie

- Principal facteur de disparition des bactéries fécales : **broutage** (Menon et al, 2003)
- Autre facteur important : **attachement** des bactéries (Garcia-Armisen et Servais, 2009)
- Modèle initial :

Espèces attachées	Espèces libres
$\frac{dEC_A}{dt} = -k_A \times EC_A - \frac{V_C}{h} \times EC_A$	$\frac{dEC_L}{dt} = -k_L \times EC_L$

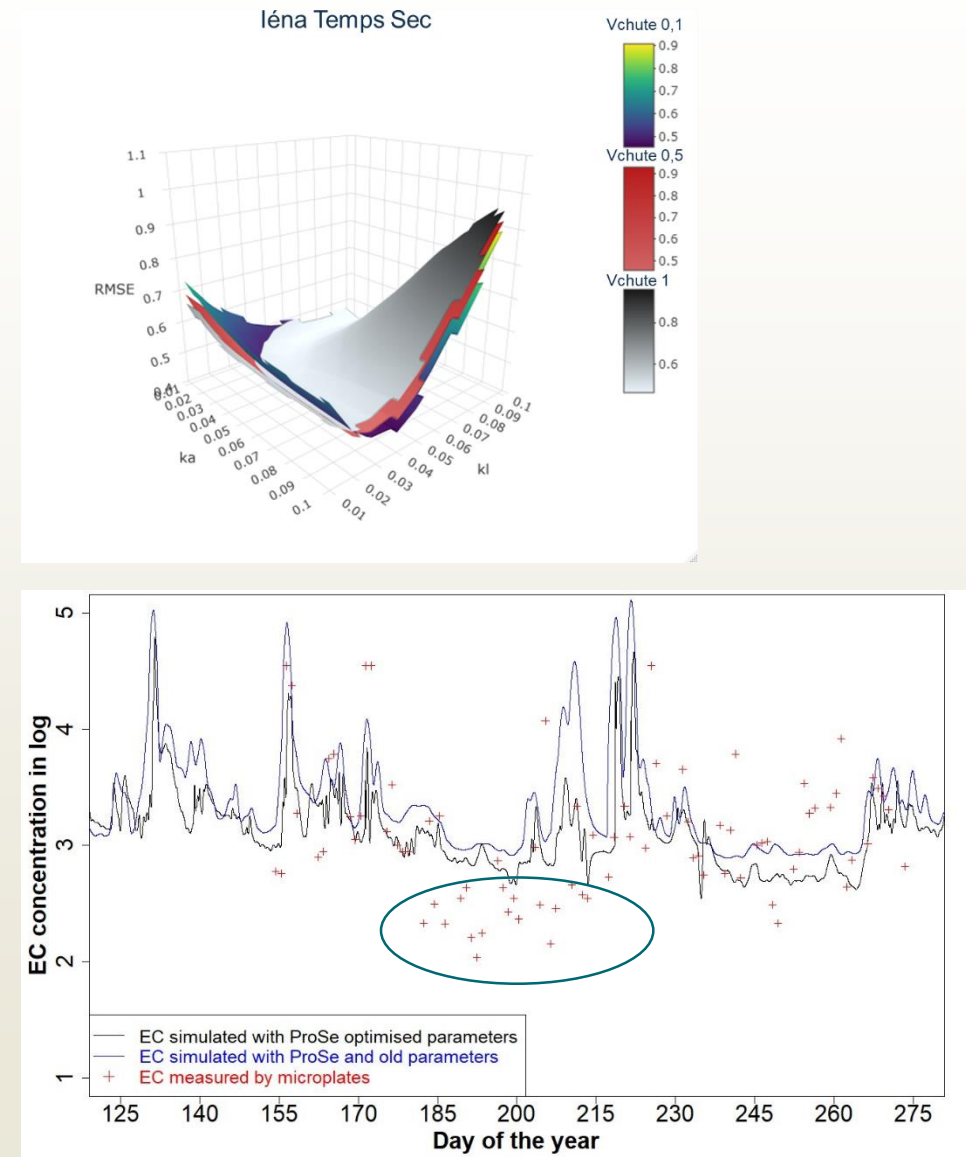
➤ $k_L = 0.045 \text{ h}^{-1}$ à 20°C ; $k_A = 0.025 \text{ h}^{-1}$ à 20°C ; $V_C = 0,07 \text{ m.h}^{-1}$

- k fonctions de la température via une gaussienne centrée sur 20°C (écart-type 20°)

- Approche mise en œuvre :
 - Analyse de sensibilité sur les paramètres
 - Caractérisation de vitesses de dégradation (inactivation) dans différentes conditions
 - Prise en compte de l'effet de la lumière solaire

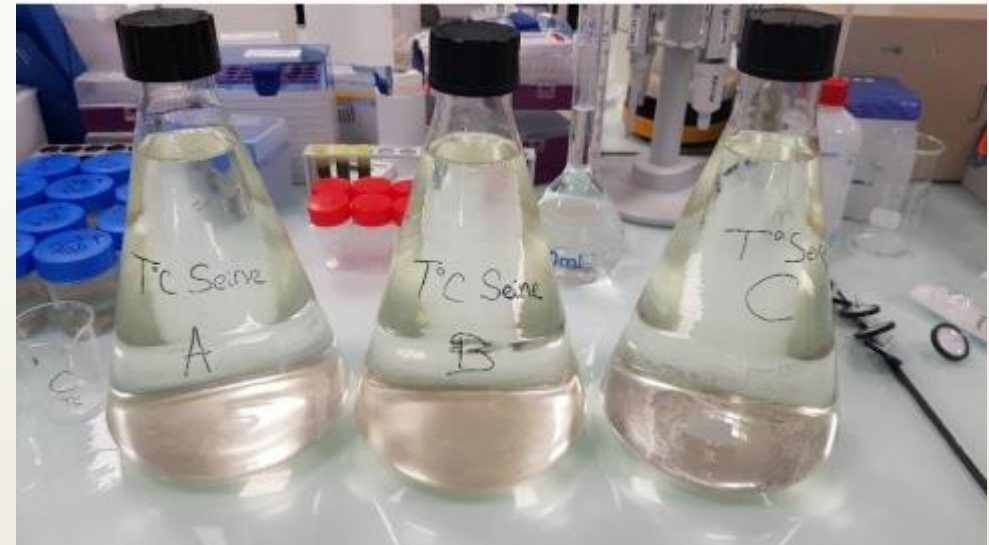
Analyse de sensibilité et caractérisation de l'inactivation

- L'effet de la décantation est très limité
 - Phénomènes de re-suspension ?
- k_a et k_l sont fortement liés en temps sec comme en temps pluie
- Une mauvaise prise en compte des temps secs dans les simulations
- L'ajustement conjoint des vitesses d'inactivation des bactéries libres et attachées tend vers une même constante
 - Libres : $0.032 \pm 0.016 \text{ h}^{-1}$
 - Attachées : $0.037 \pm 0.017 \text{ h}^{-1}$



Inactivation des bactéries au noir

- Incubations d'eau de Seine, au laboratoire à 20°C et à la température de la Seine
- Estimation des constantes de dégradation pour les bactéries attachées et les bactéries libres



Inactivation des bactéries au noir

► Une tendance à l'augmentation des vitesses de dégradation en fonction de la teneur en bactéries fécales.

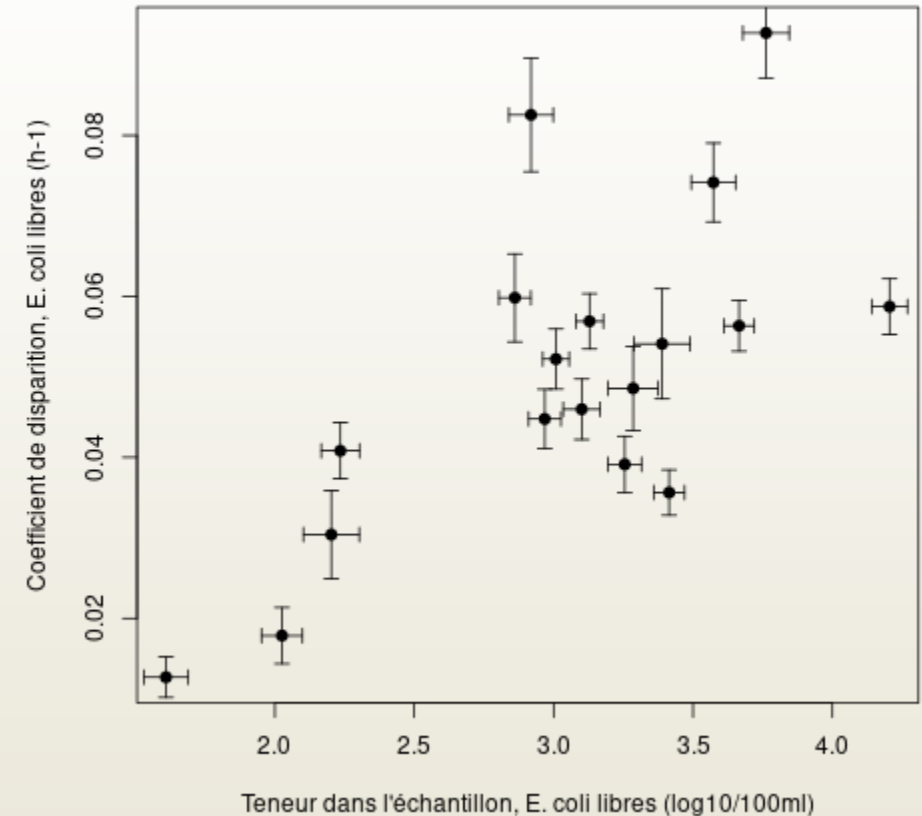
► Plus de brouteurs ?

► Bactéries plus sensibles ? Moins protégées ?

► Le modèle devient :

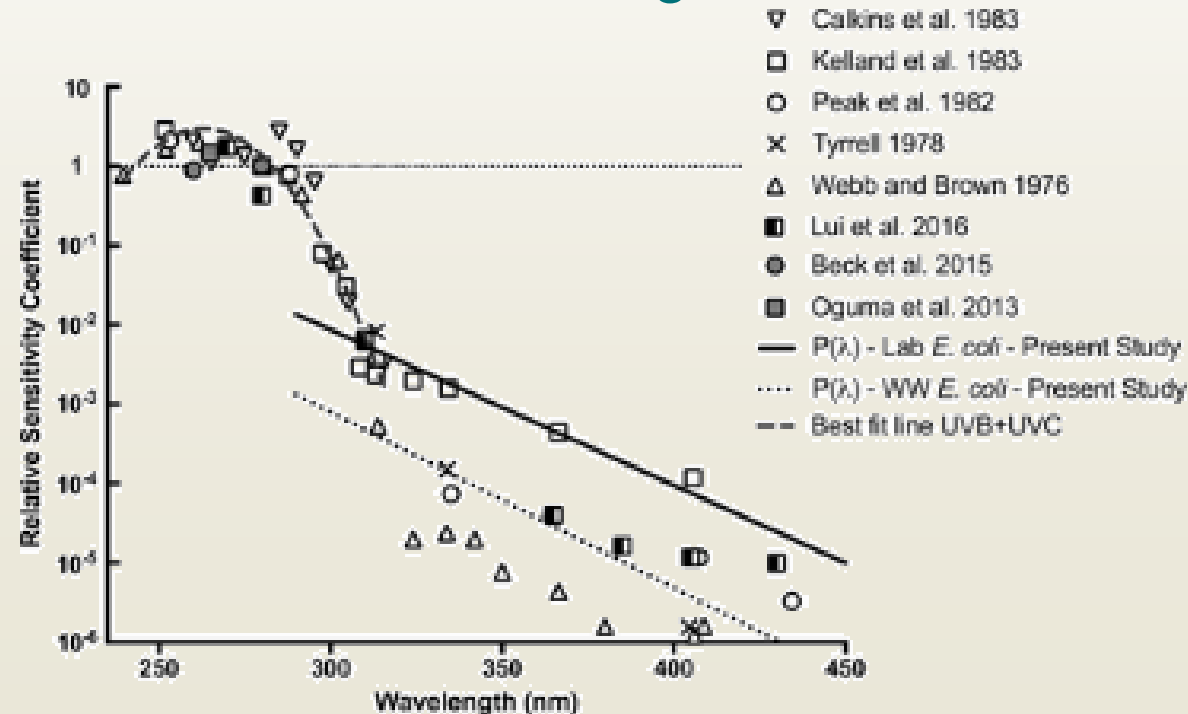
$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C \cdot \left(\frac{C}{C_{ref}}\right)^m$$

avec $m = 0.15$ à 0.25 et $k = 0.035$ à 0.045 h^{-1}



Inactivation de *E. coli* par la lumière solaire

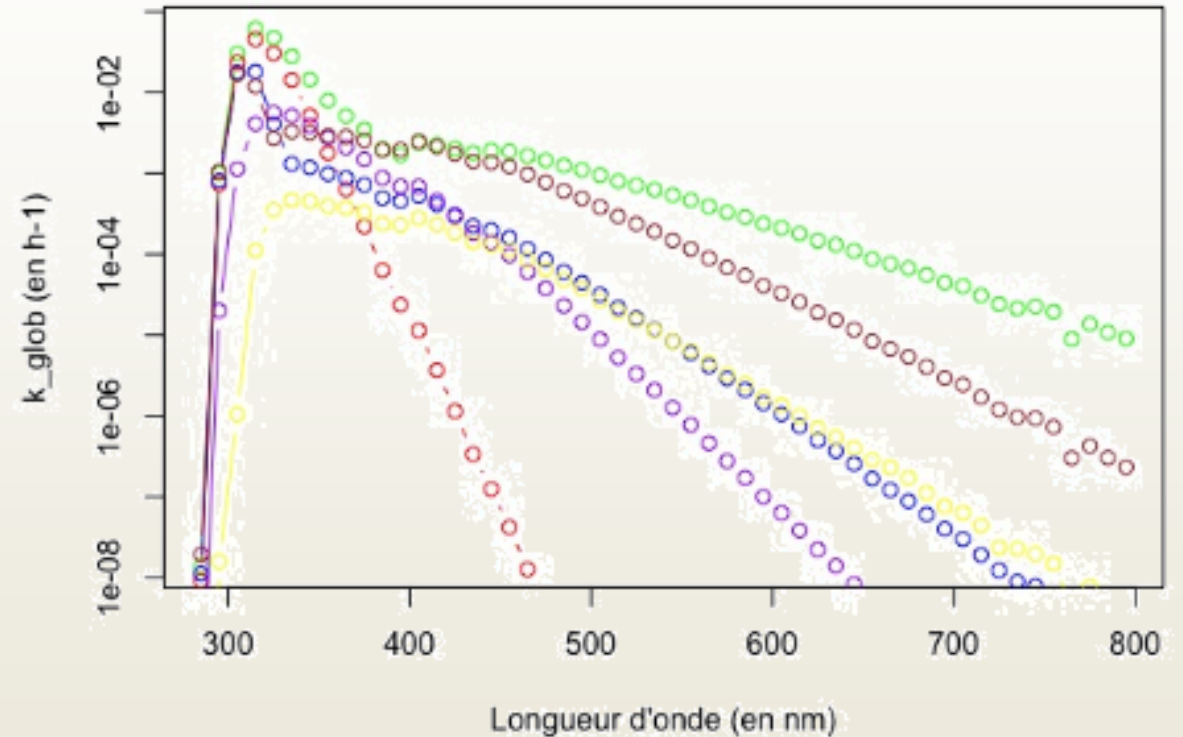
- 6 références bibliographiques principales
 - Essais au labo sur souches pures
 - ou mélanges de *E. coli* issus de STEP + lumière artificielle.
- Fonctions empiriques donnant la vitesse d'inactivation en fonction de l'intensité de la lumière et de la longueur d'onde.



Silverman et Nelson, 2016

Inactivation de *E. coli* par la lumière solaire

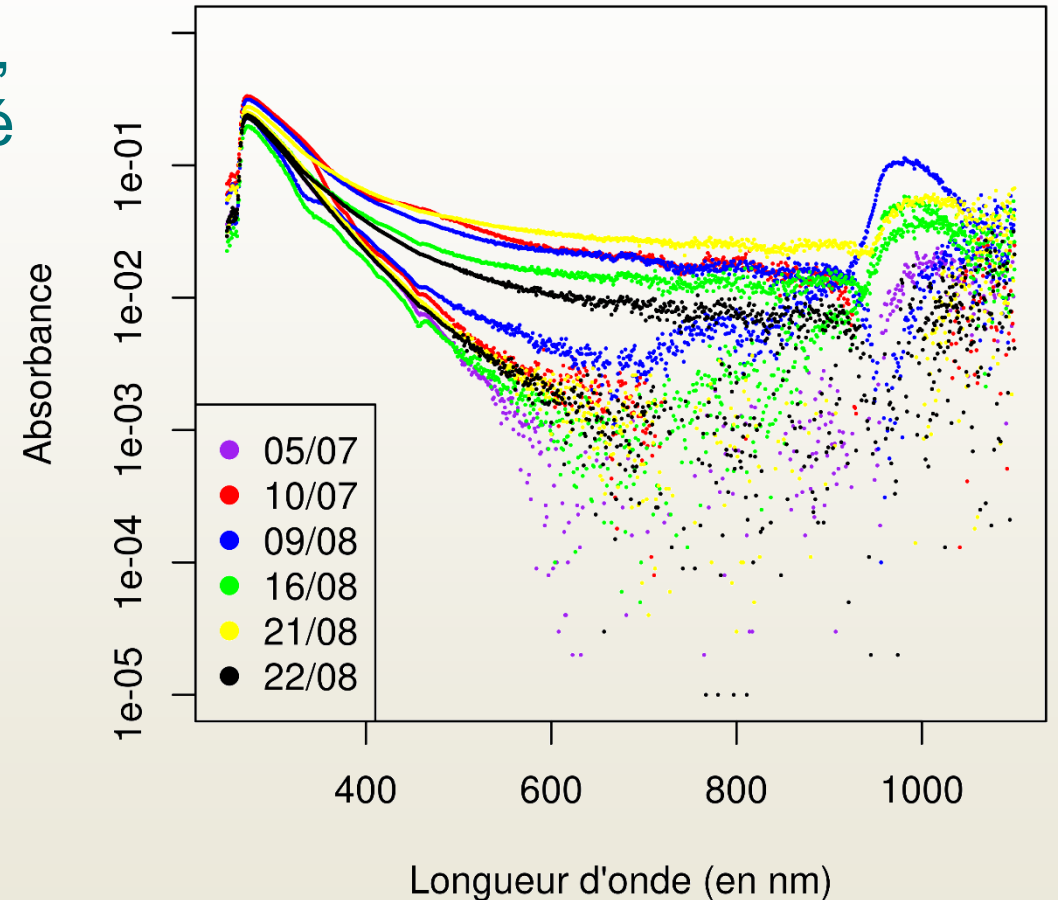
- ▶ En appliquant ces données de la littérature combinées au spectre solaire :
 - ▶ les longueurs d'ondes de 300 à 350 nm pourraient être les plus efficaces
- ▶ Mais elles ont aussi les plus absorbées par l'eau



Coefficients d'inactivation théoriques à la surface de l'eau, pour un éclairage par un spectre solaire estival, pour les références biblio choisies.

Inactivation de *E. coli* par la lumière solaire

- L'absorbance est maximale dans l'UV, donc compétition forte entre l'efficacité germicide et l'absorption de la lumière
- Les plus faibles longueurs d'ondes, les particules jouent un rôle majeur dans l'absorption de lumière
 - mais la diffusion est très mal connue
 - ➔ un point à préciser pour la suite



Absorbance par l'eau de Seine brute et filtrée à différentes dates

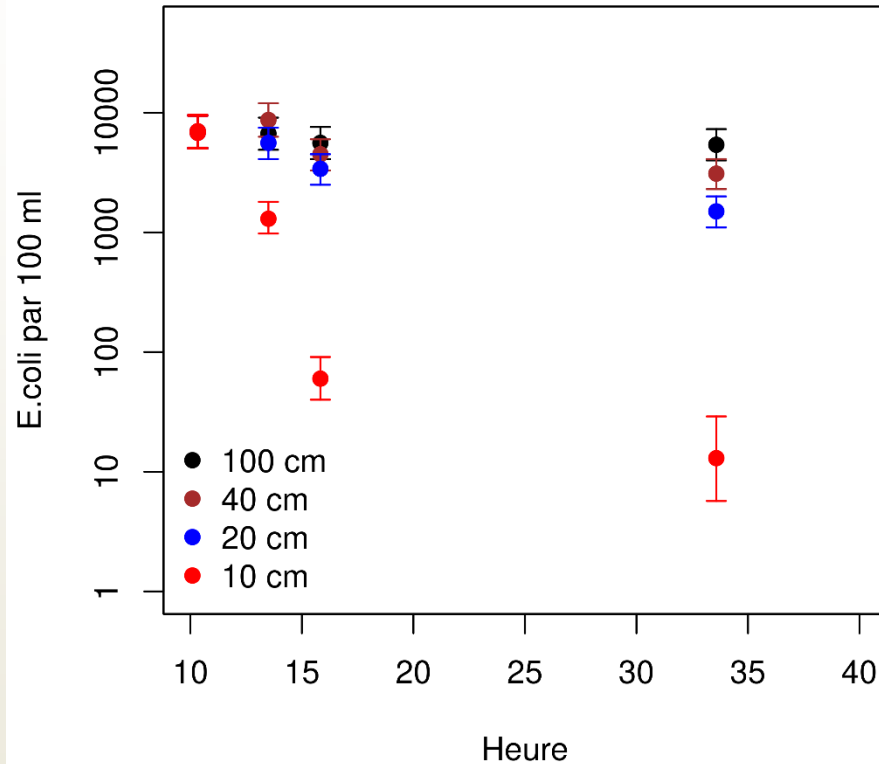
Inactivation de *E. coli* par la lumière solaire

- Exposition de *E.coli* à différentes profondeurs : tubes en quartz sur un rack vertical
- Installation sur ponton flottant
- Rack pouvant être installé horizontalement en sub-surface
- Plusieurs suivis au cours de l'été 2023 (*E.coli*, rayonnement solaire, absorbance)

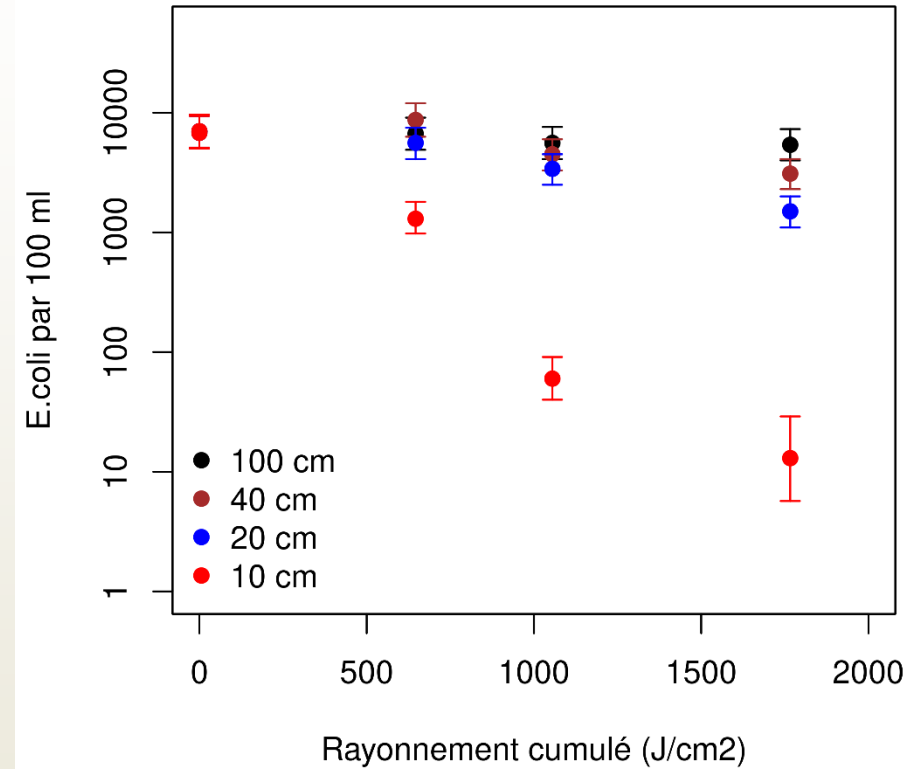


Inactivation de *E. coli* par la lumière solaire

16/08/2023

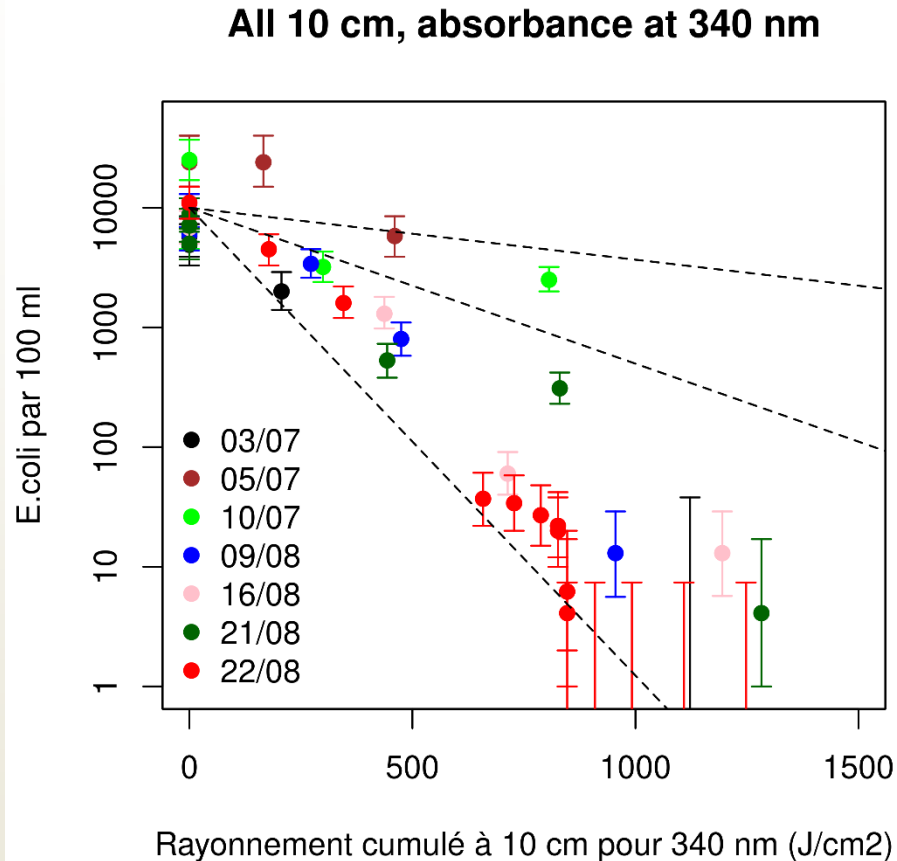


16/08/2023



Le dénombrement des bactéries est suivi **en fonction du temps** à différentes profondeurs **ou de la quantité de lumière reçue** (ici la lumière totale reçue par le plan d'eau)

Inactivation de *E. coli* par la lumière solaire



- Synthèse des résultats de l'été, obtenus à une profondeur de 10 cm.
- Pour calculer le rayonnement reçue à 10 cm, on a supposé que les longueurs d'onde à 340 nm étaient les plus pertinentes et choisi un coefficient d'extinction en fonction ($\sim 5 \text{ m}^{-1}$)
- Les droites pointillées correspondent à des constantes d'inactivation en fonction de la lumière (totale) reçue de $1, 3$ et $9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{J}$
- Intégrée sur la colonne d'eau, la constante d'inactivation est :

$$k = \frac{\alpha I_0}{k_{ext} \cdot Prof}$$

Ajustement de ProSe bactériologie

► Principe algorithmique

► $k = k_N + k_L$

► avec k_N l'effet de la concentration initiale et k_L l'effet de la lumière

► Pour k_N : nouveau paramètre m , facteur pour l'effet de la concentration

► Pour k_L : nouveau paramètre $k_{\text{extinction}}$ et α , le facteur lumière

► Sachant k_L fonction d'un paramètre d'atténuation k_d

et d'un paramètre proportionnel au particulaire k_p

► Le couple α/k_{ext} ajuste l'effet de la lumière

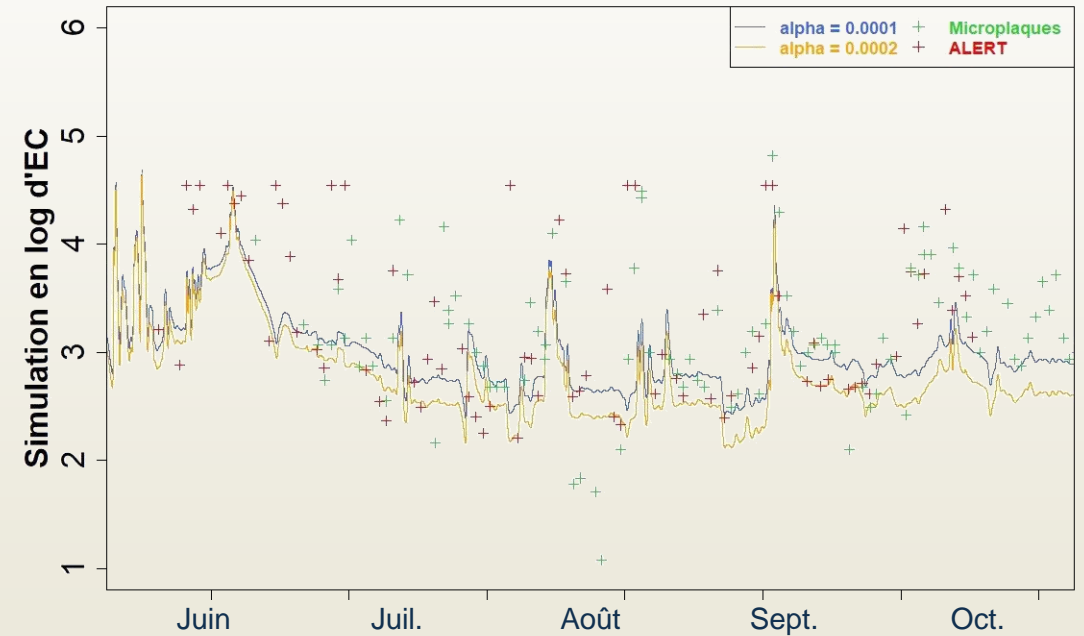
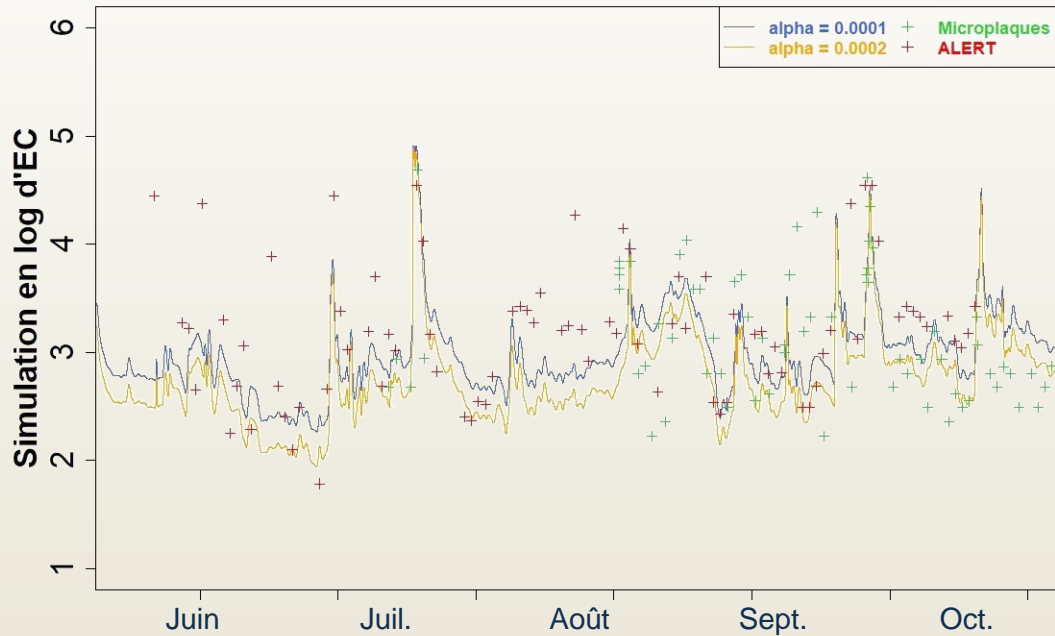
$$k_N(C) = k \left(\frac{C}{C_{\text{ref}}} \right)^m$$

$$k_L = \frac{\alpha I_0}{k_{\text{ext}}(z_L - z_F)}$$

$$k_{\text{ext}} = k_d + k_p \times MES$$

Résultats de ProSe bactériologie

- Meilleure prise en compte des temps secs sans altération des performances de temps de pluies
 - Au prix de 4 paramètres supplémentaires (mais avec des estimations au labo)



Éléments de conclusion

- Renforcement de la description des processus et consolidation de la simulation
- Reste des questions ouvertes concernant la variabilité des mesures en Seine
 - Données 2017-2019
- Encore des inconnues sur les teneurs dans les apports de temps de pluie