Le transfert des PCBs du sédiment au biote dans le Rhône

Christelle Lopes
Cemagref de Lyon
Laboratoire d'Ecotoxicologie

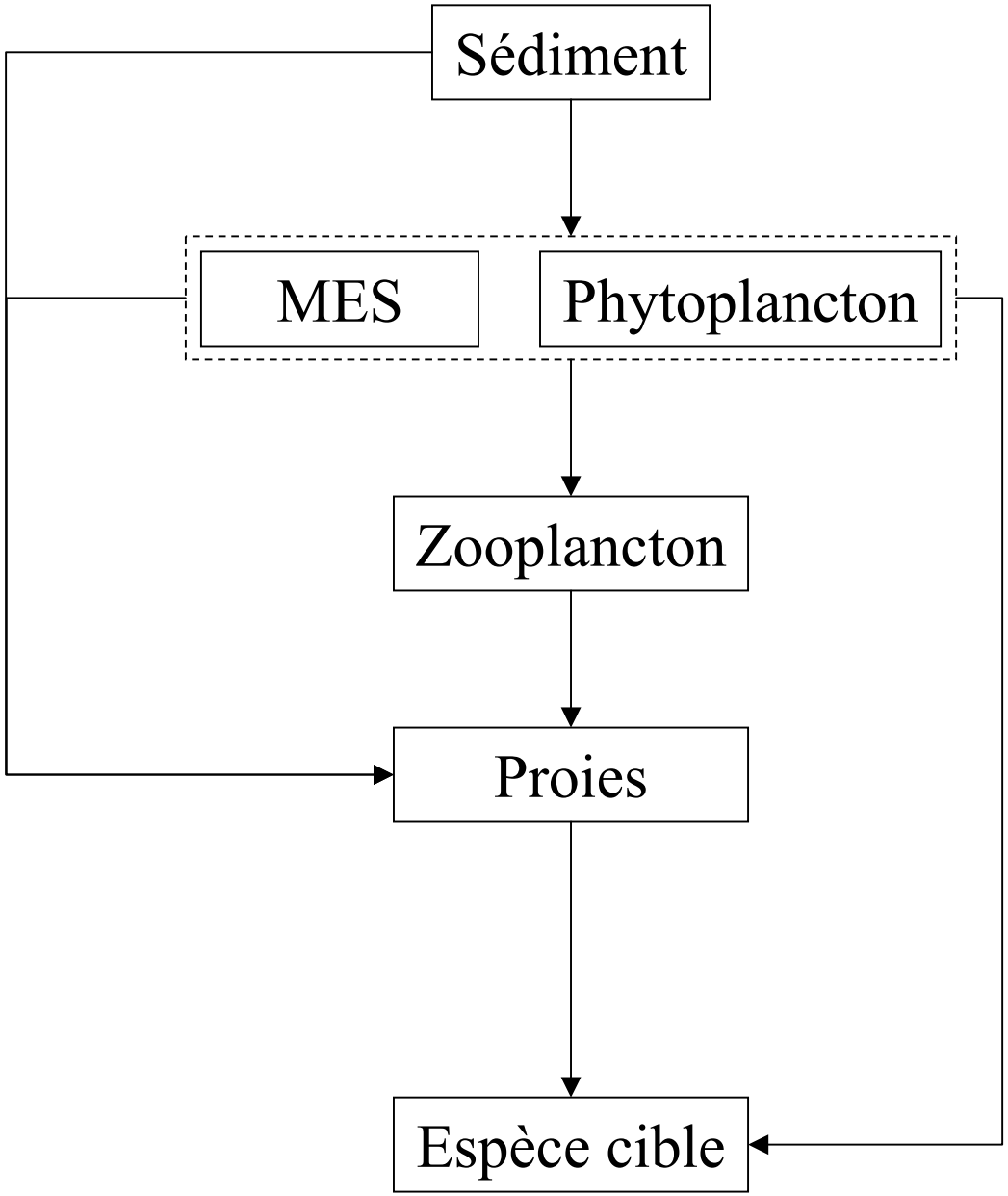
https://tsip-pcb.cemagref.fr/

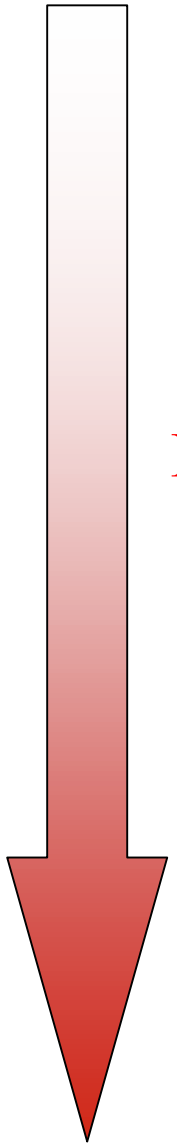
Équipes du projet
M. Desmet, G. Roux – ENTPE L.S.E. (* actuellement Université de Tours)*
***M. Babut**, C. Miège, M-C. Roger, A. Roy, **C. Lopes**, B. Motte - CEMAGREF*
***H. Persat** – CNRS, LEHF UMR 5023, Université Lyon 1*
P. Bonté, I. Schmitt – CNRS-CEA LSCE, Gif sur Yvette
B. Mahler, P. Van Metre - USGS, Austin

ZABR

ZONE ATELIER BASSIN DU RHONE
RHONE BASIN LONG TERM ENVIRONMENTAL RESEARCH

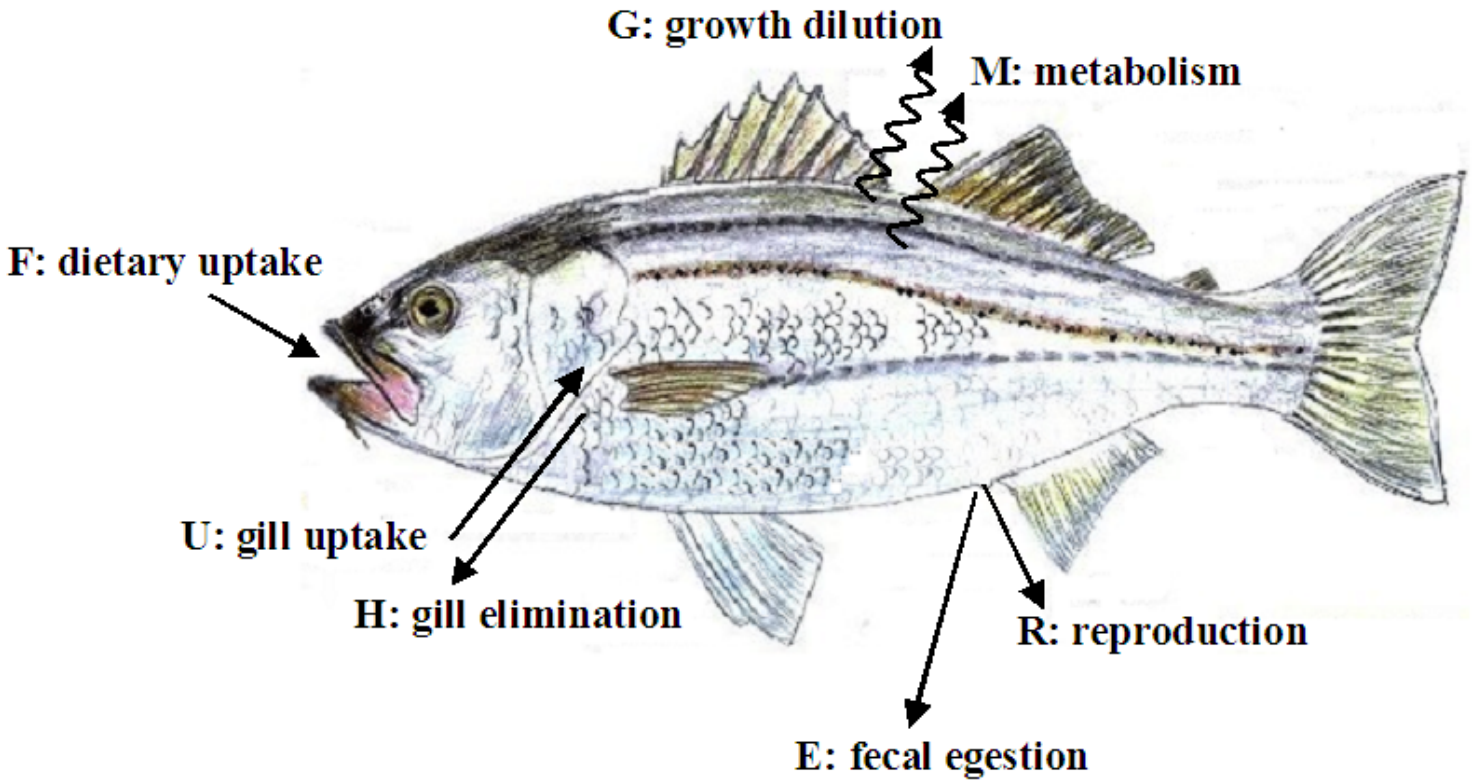
Transfert trophique





PCB ?

Voies de contamination et d'élimination des PCBs



Modèle de bioaccumulation

➢ Principes: modèle cinétique à base physiologique, décrivant la cinétique de contamination d'un poisson en congénère c

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \underbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie respiratoire}} + \underbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}_{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t), T(t))$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

↳ Inférence Bayésienne pour estimer les paramètres impliqués dans chaque fonction

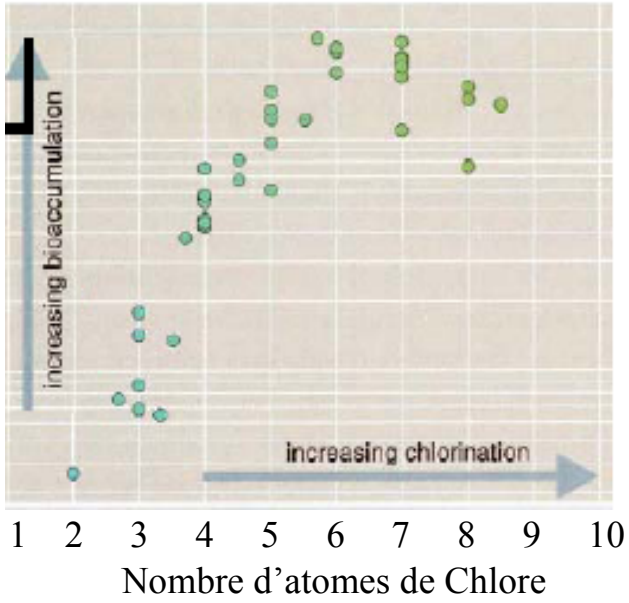
Hypothèses sous-jacentes

- Distribution homogène du congénère à l'intérieur de l'organisme, vraisemblable à long terme pour congénères faiblement métabolisés

- Organisme décrit comme une compartiment unique en interaction avec son environnement

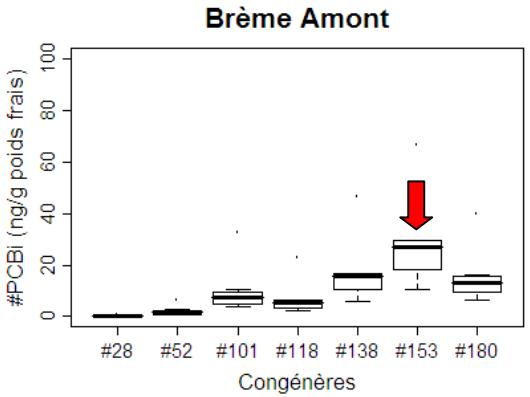
Choix du congénère étudié

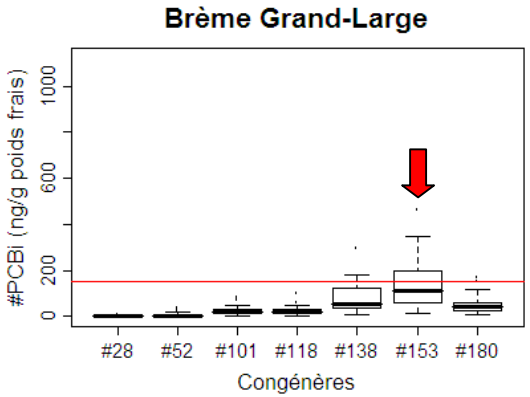
- PCB comptant 5 à 7 atomes de chlore sont les plus susceptibles de se bioaccumuler dans la chaîne trophique

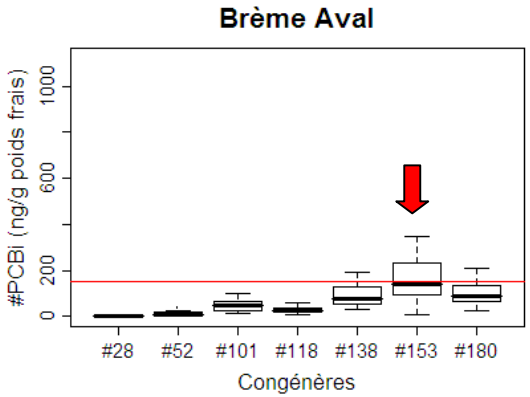


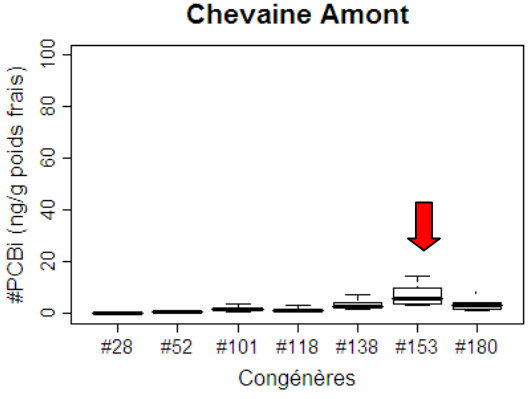
Congénère 153 avec 6 atomes de chlore = bon candidat

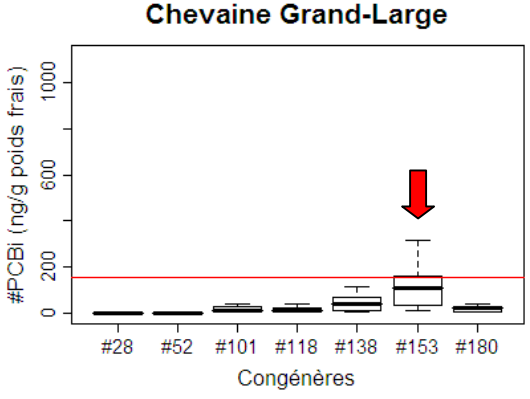
Distribution des PCBi (Poissons)

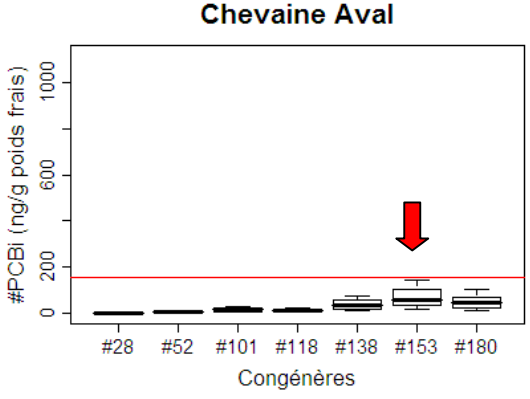


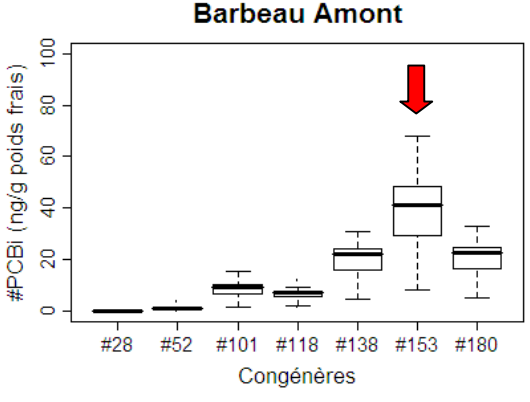


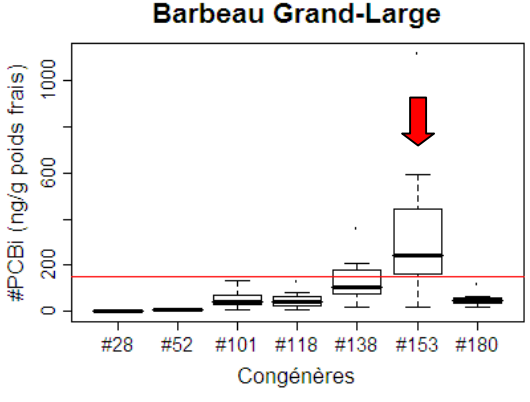


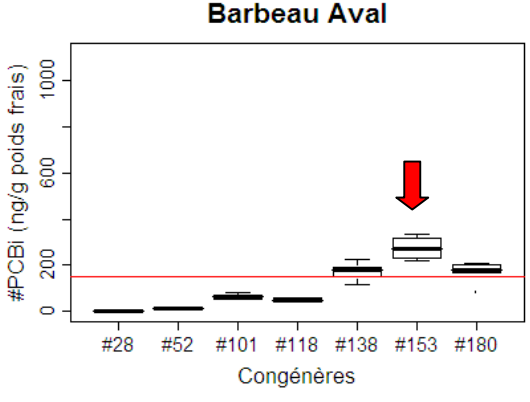








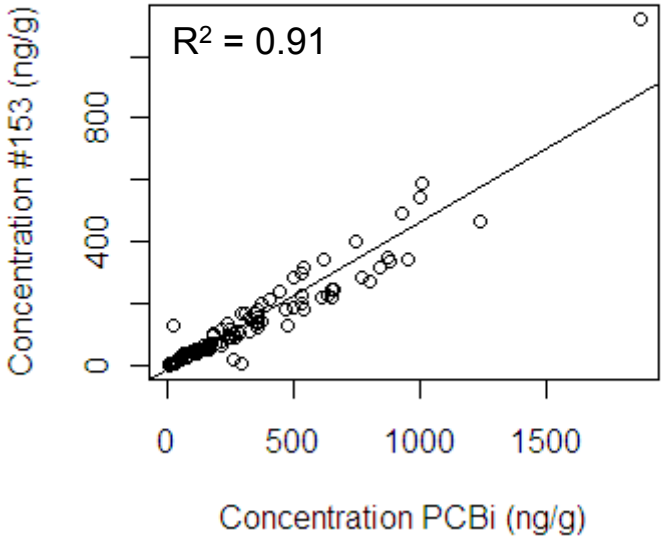




Choix du congénère étudié

- PCB comptant 5 à 7 atomes de chlore sont les plus susceptibles de se bioaccumuler dans la chaîne trophique

- #153 corrélé à ΣPCB_i → bon indicateur



$$\#153 = -11.9 + 0.48 * \sum PCB_i$$

- $\log(K_{ow})$ pour #153 varie de 6.58 à 8.31 (Lie *et al*., 2003), valeur moyenne souvent employée = 6.92

Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, Lf(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t), T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

Variation annuelle de la température de l'eau

- Données de températures depuis 20 ans entre MTE et GDL
  → données de 1994 à 2008 retenues car le plus vieux poisson a 14 ans

- Ajustement d'un modèle « gaussien » :

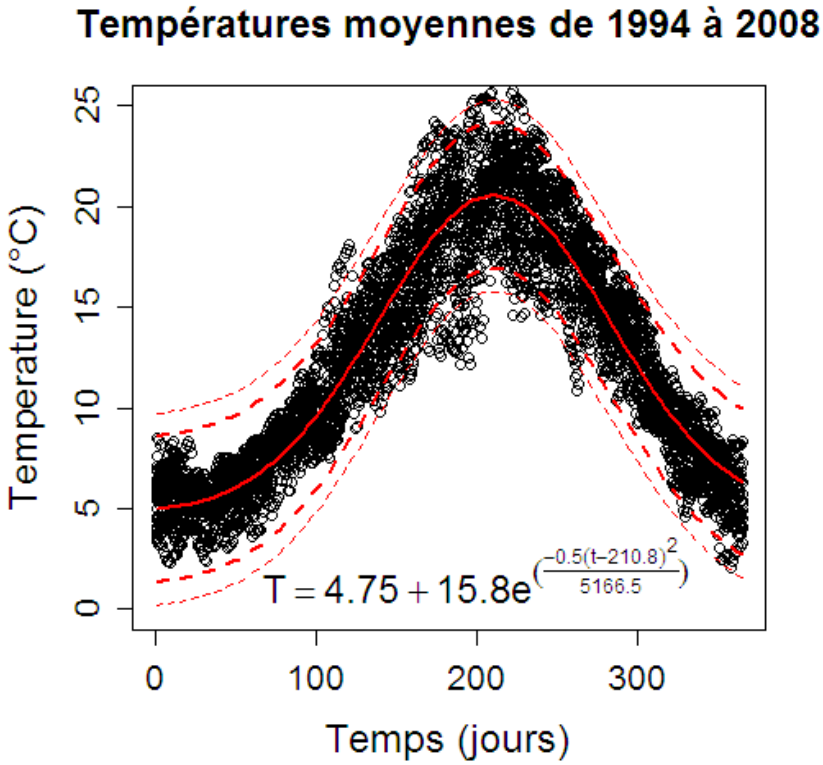
$$T = \delta + \alpha * \exp\left(-\mathbf{0.5} * \frac{(t-\beta)^2}{\sigma^2} \right)$$

— Température moyenne

- - Intervalle de crédibilité des prédictions à 95%

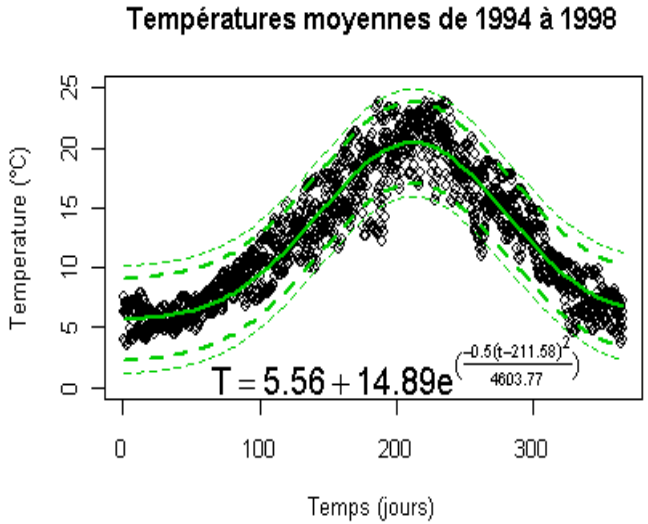
- - Intervalle de crédibilité des prédictions à 99%

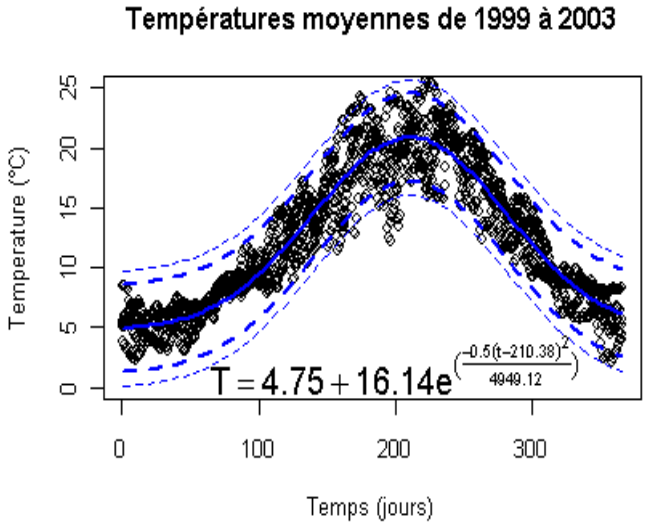
Température estimée chaque jour par tirages aléatoires dans l'intervalle de crédibilité



Température de l'eau

- Modèle gaussien ajusté sur 3 périodes de 5 ans

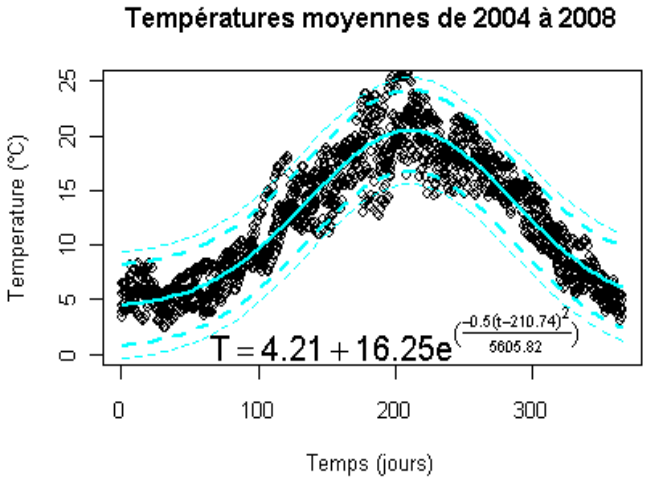




— Température moyenne

- - Intervalle de crédibilité des prédictions à 95%

- - Intervalle de crédibilité des prédictions à 99%



Pas de décalage temporel donc ajustement sur données globales utilisé

Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, Lf(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

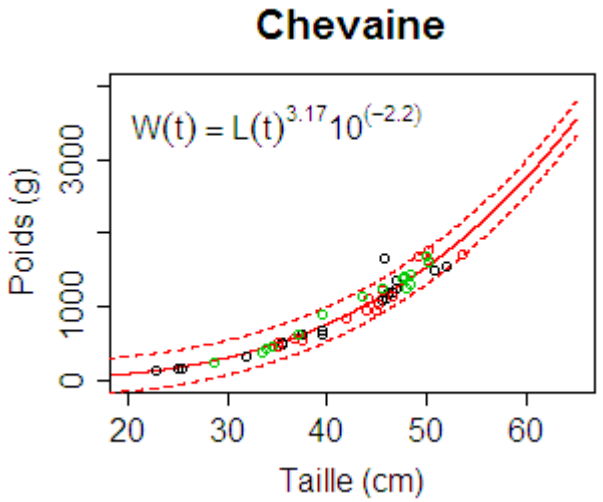
$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

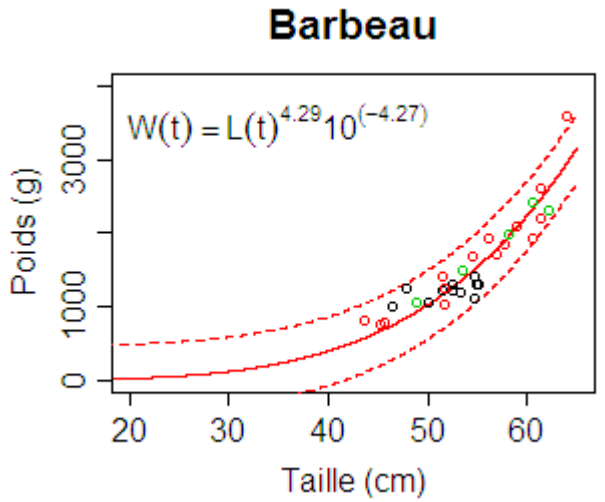
$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

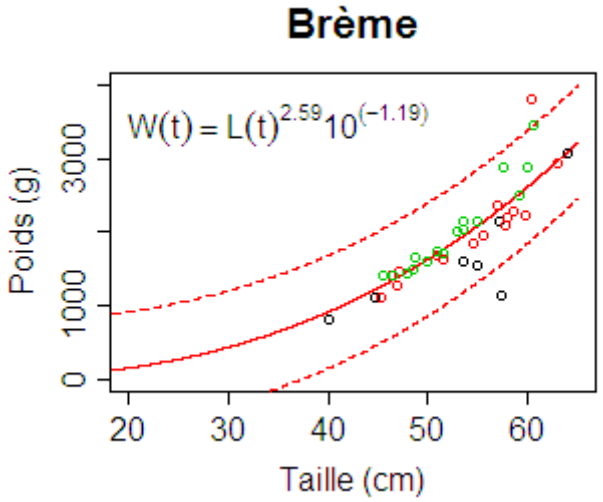
Relation Taille/Poids

$$\log(W(t)) = a * \log(L(t)) - b \quad \Leftrightarrow \quad W(t) = L(t)^{a} * \mathbf{10}^{-b}$$





o MTE
o GDL
o BRE

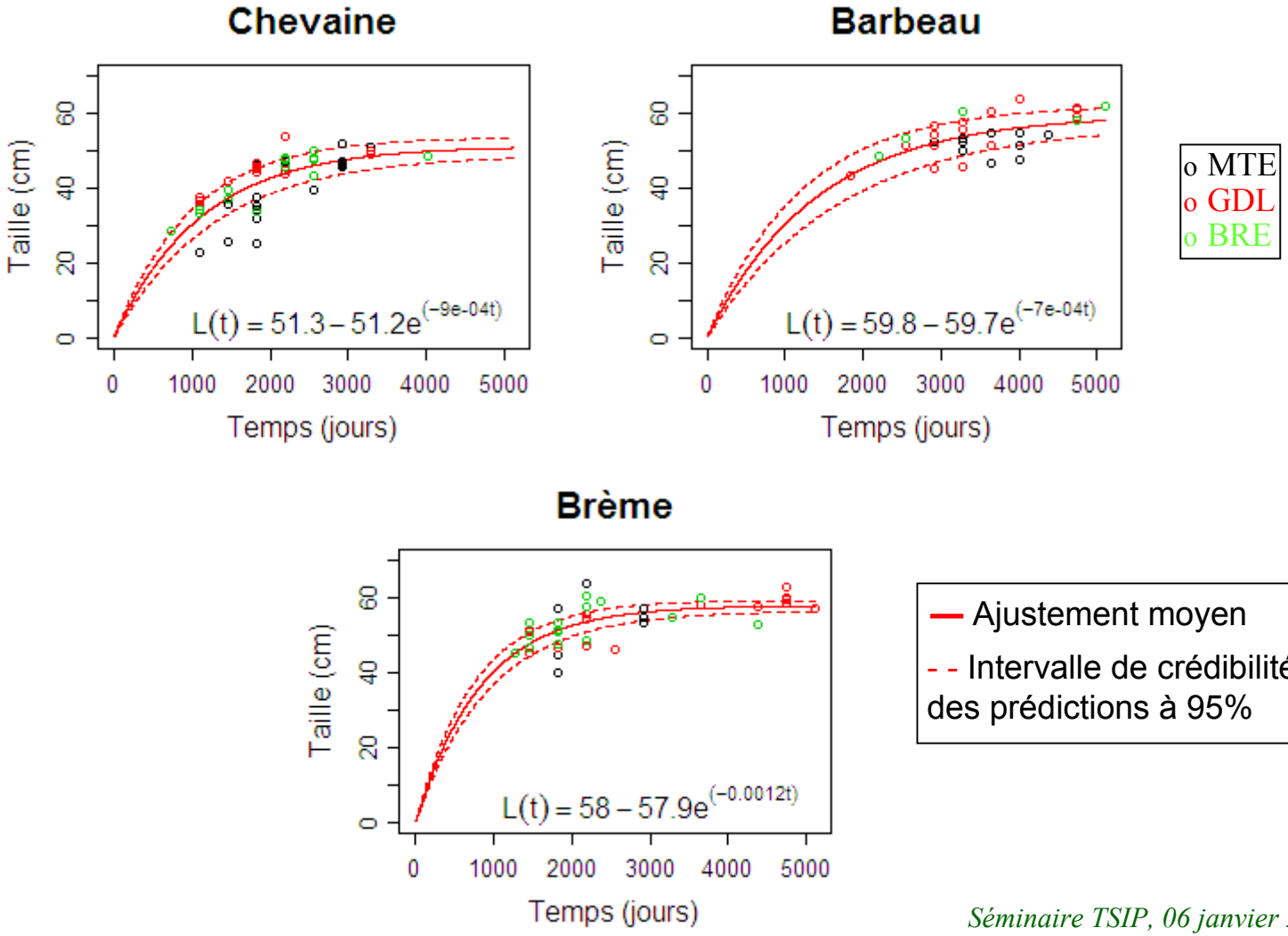


— Ajustement moyen

- - Intervalle de crédibilité des prédictions à 95%

Relation Taille/Age : Von Bertalanffy

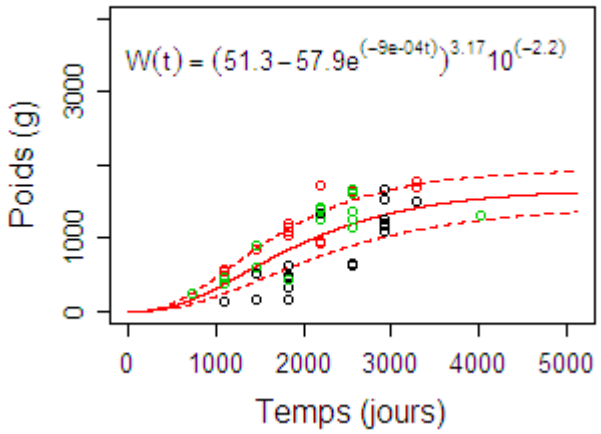
$$\frac{dL(t)}{dt} = k\left(L_\infty - L\right) \quad \Leftrightarrow \quad L(t) = L_\infty - \left(L_\infty - L(\mathbf{0})\right)\exp\left(-k\,t\right)$$



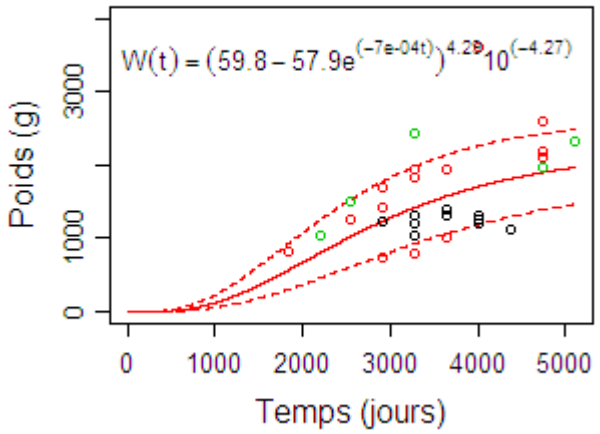
Relation Poids/Age

$$W(t) = L(t)^{a} * \mathbf{10}^{-b} = \left(L_{\infty} - \left(L_{\infty} - L(\mathbf{0})\right)\exp(-k\,t)\right)^{a} * \mathbf{10}^{-b}$$

Chevaine

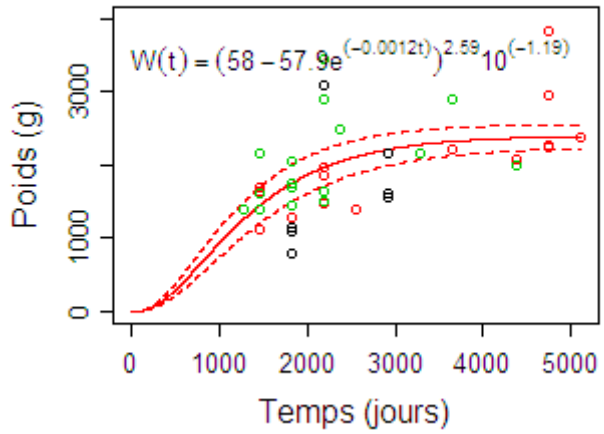


Barbeau



o MTE
o GDL
o BRE

Brème

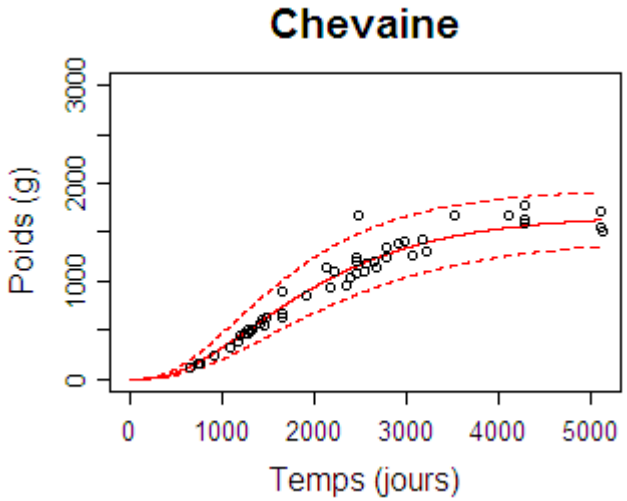


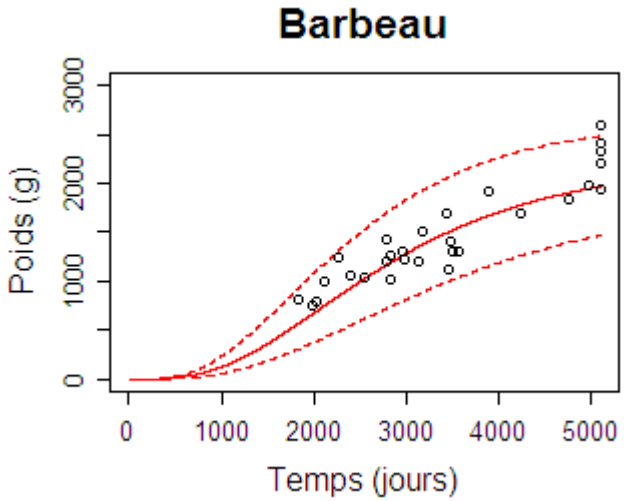
— Ajustement moyen

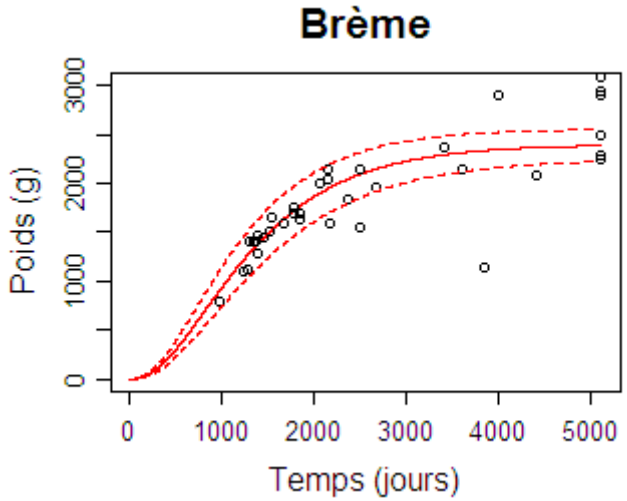
- - Intervalle de crédibilité des prédictions à 95%

Rétro-calcul de l'âge

$$Age = -\frac{1}{k} * \ln\left(1 - \frac{L}{L_\infty}\right) + \frac{1}{k} * \ln\left(1 - \frac{L_0}{L_\infty}\right) = \frac{1}{k} * \ln\left(\frac{L_\infty - L_0}{L_\infty - L}\right)$$







Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

Taux de filtration de l'eau (L/g/j)

- Gobas (1993); Gobas et Wilcockson (2003) :

$$U_{c,i}(t) = \frac{K_{ow_c} * 0.01 * 88.3 * \left(W_i(t)/1000\right)^{0.6}}{K_{ow_c} * 0.01 + 1}$$

- Gobas (2004); Gobas et Arnot (2010) :

$$U_{c,i}(t) = \frac{1400 * \left(W_i(t)/1000\right)^{0.65}}{C_{ox}(t)}$$

$C_{ox}(t)$: concentration en oxygène dans l'eau à t

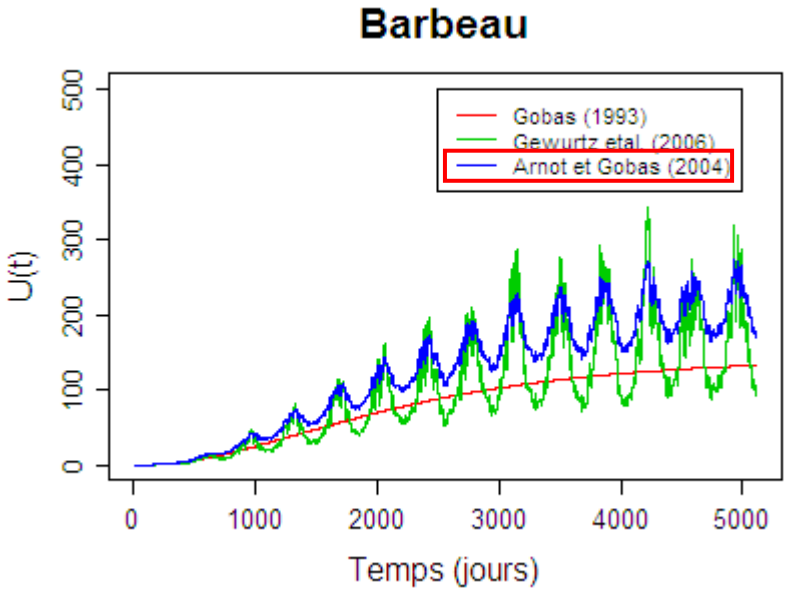
$$C_{ox}(t) = \begin{cases} 14.45 - 0.413 * T(t) + 0.0056 * T(t)^2 & \text{Norstrom et al. (1976)} \\ \left(-0.24 * T(t) + 14.04\right) * S & \text{Arnot et Gobas (2004)} \end{cases}$$

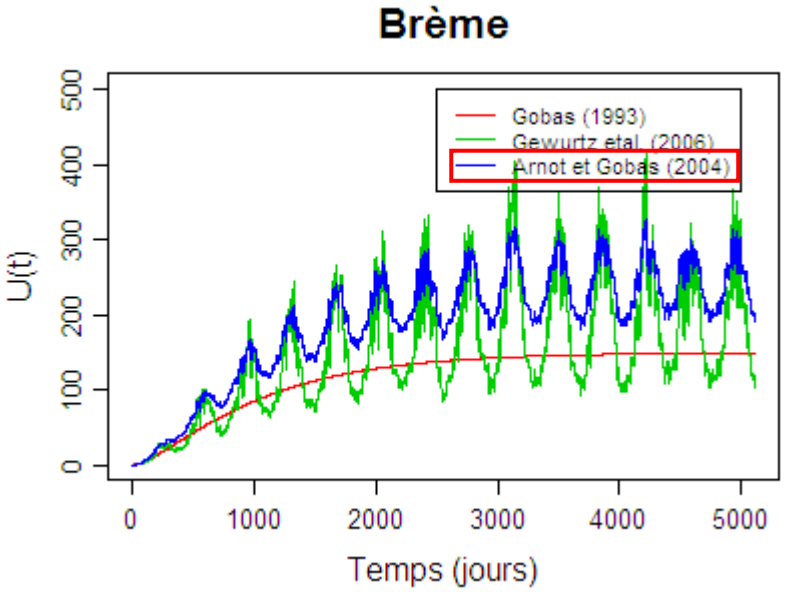
- Gewurtz et al. (2006) : $U_{c,i}(t) = \frac{24 * M_i(t)}{E_{ox}\ C_{ox}(t)}$

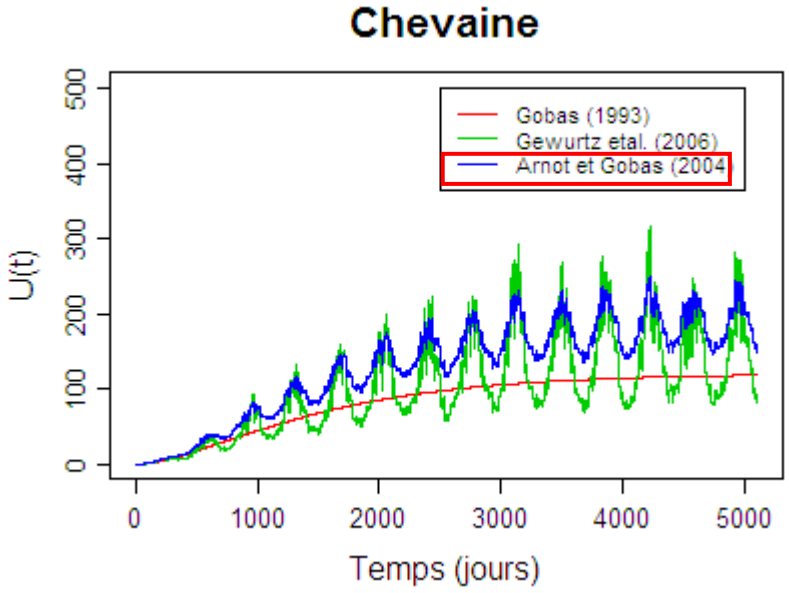
$M_i(t)$: métabolisme énergétique nécessaire pour une activité normale

$$\log\left(M_i(t)\right) = 0.67 * \log\left(W_i(t)\right) + 0.017 * T(t) - 0.77$$

Taux de filtration de l'eau (L/g/j)







Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t), T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

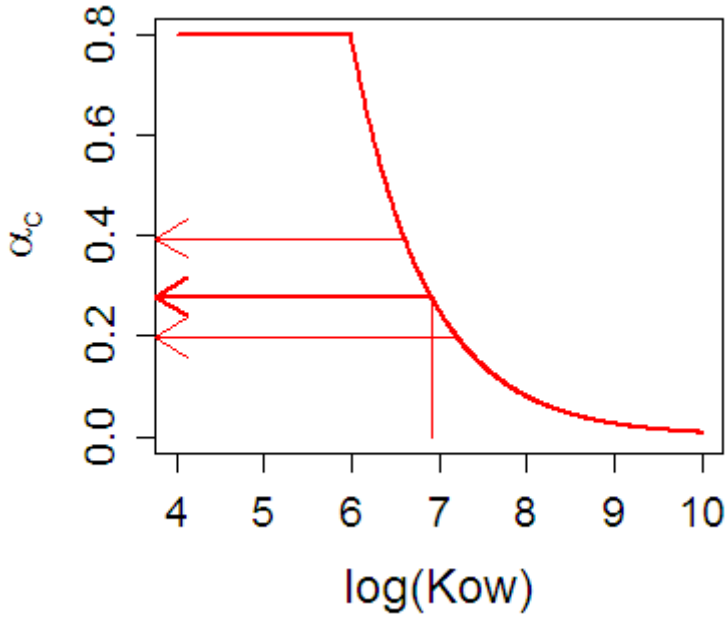
$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

Efficacité d'assimilation *via* l'eau : α_c

- Thomann et al. (1992) :

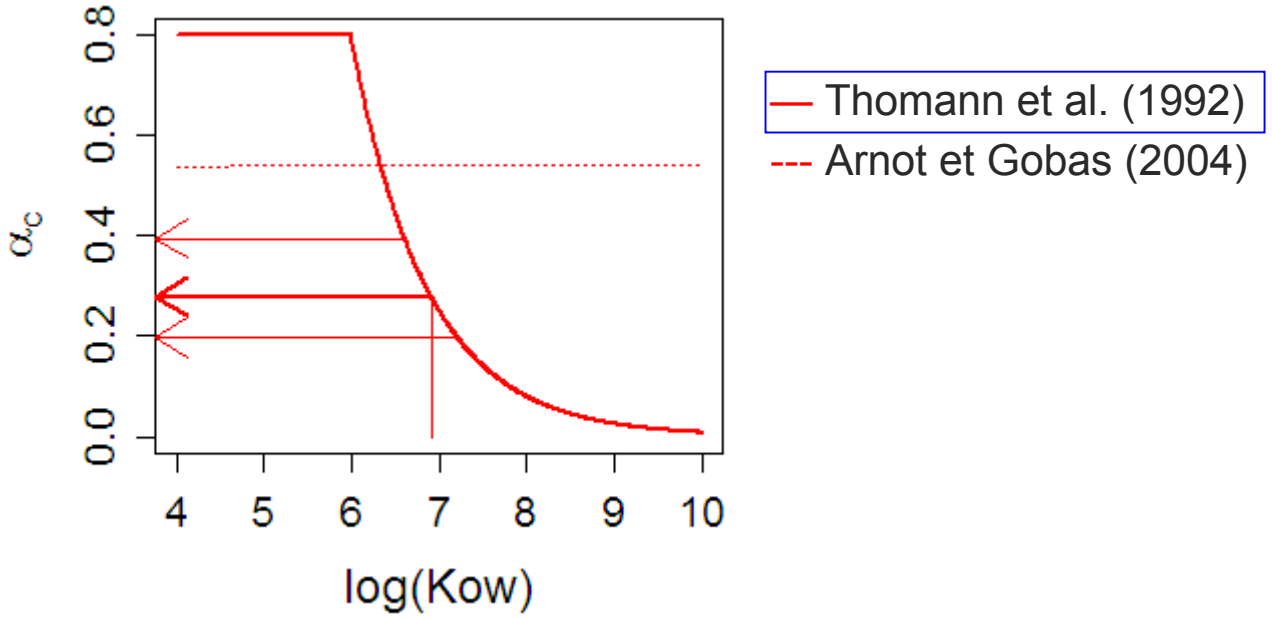
$$\log(\alpha_c) = \begin{cases} \log(\mathbf{0.8}) & \text{si } \log(K_{ow}) < \mathbf{6} \\ \mathbf{2.9} - \mathbf{0.5} * \log(K_{ow}) & \text{sinon} \end{cases}$$



Efficacité d'assimilation *via* l'eau : α_c

- Thomann et al. (1992) :

$$\log(\alpha_c) = \begin{cases} \log(\mathbf{0.8}) & \text{si } \log(K_{ow}) < \mathbf{6} \\ \mathbf{2.9} - \mathbf{0.5} * \log(K_{ow}) & \text{sinon} \end{cases}$$



- Arnot et Gobas (2004) : $\alpha_c = \left(1.85 + \frac{155}{K_{ow}(25°C)}\right)^{-1} \approx 0.54 \quad \forall K_{ow}$

Modèle de bioaccumulation

Poissons:

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

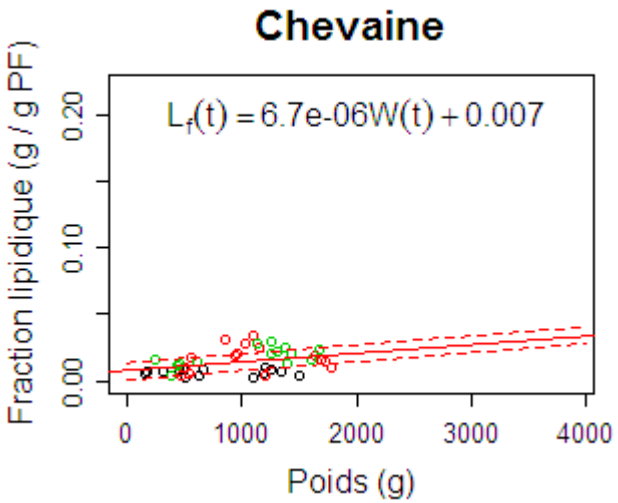
$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

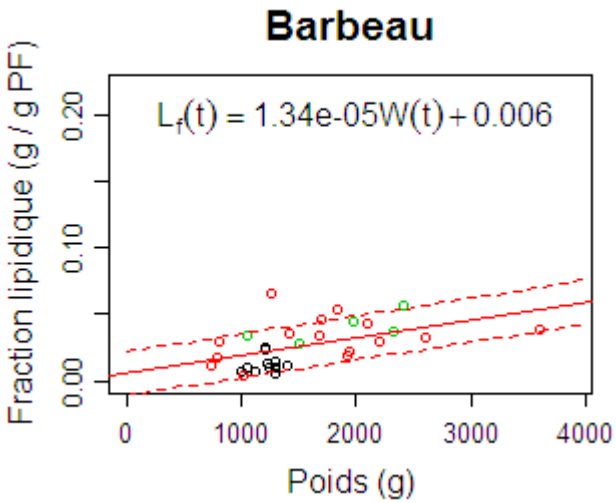
$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

$M_i(t)$: Taux de métabolisation

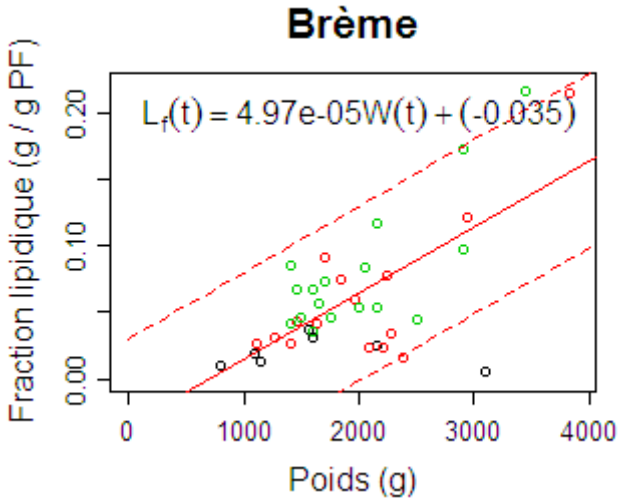
$R_i(t)$: Taux de reproduction

Fraction lipidique



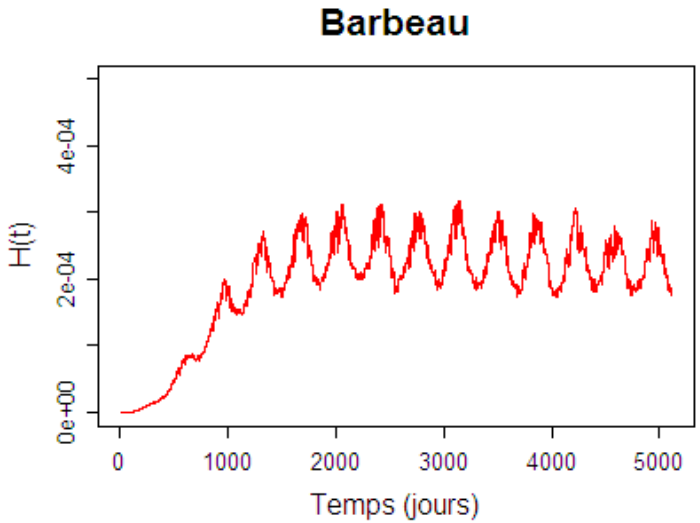


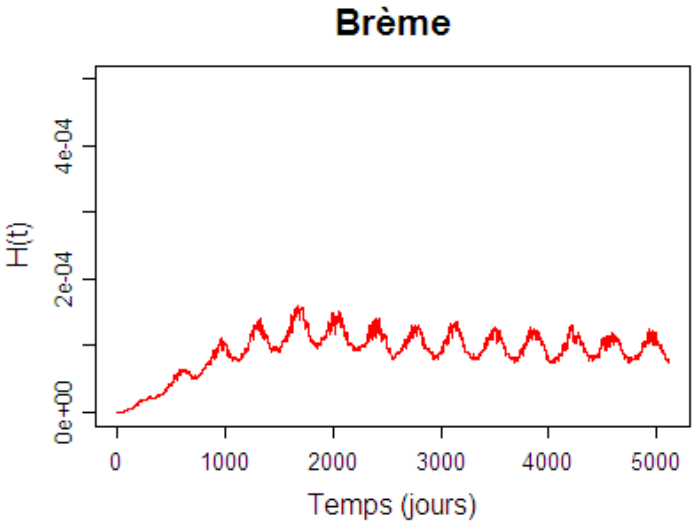
o MTE
o GDL
o BRE

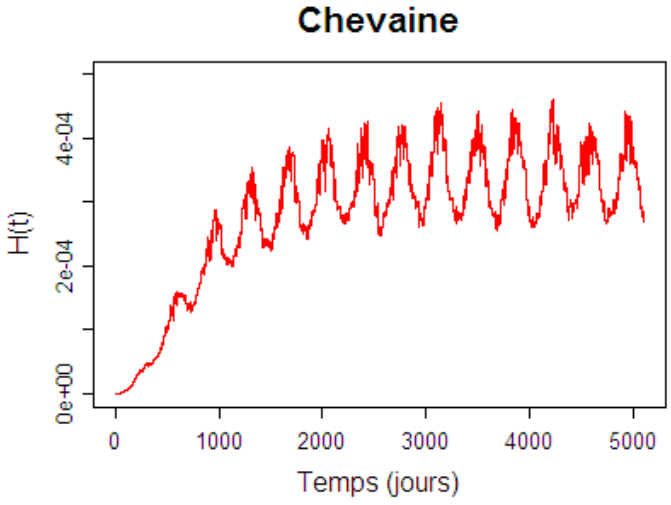


Taux d'élimination par les branchies (j^{-1})

- Gobas (1993) : $$H_{c,i}(t) = \frac{\alpha_c \, U_{c,i}(t)}{L_{f\,i}(t) * Kow_c}$$







Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

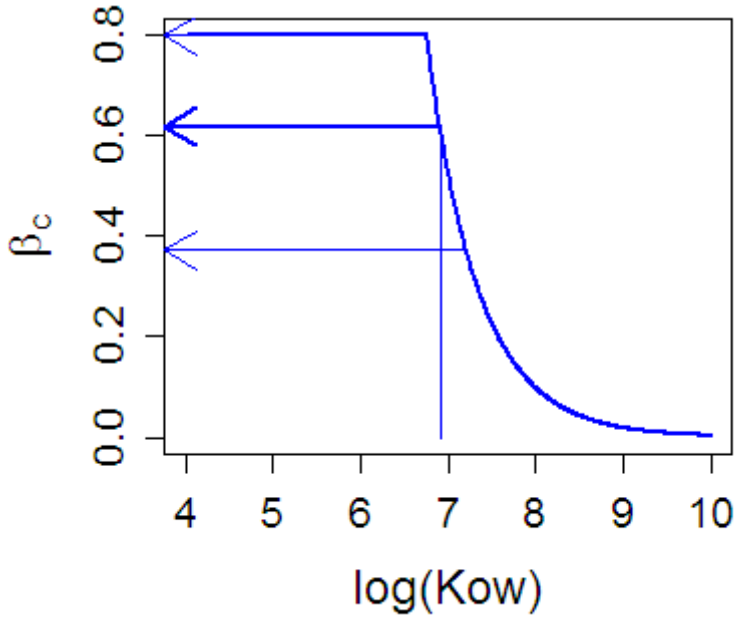
$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

Efficacité d'assimilation *via* l'alimentation : β_c

- Thomann et al. (1992) :

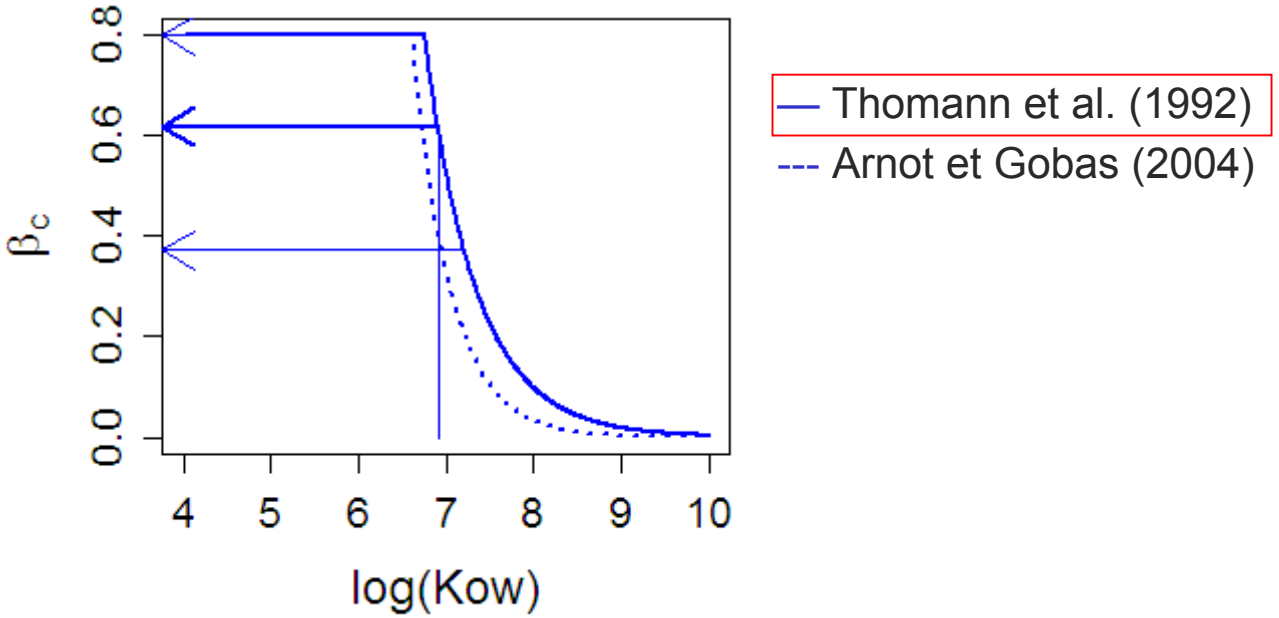
$$\log(\beta_c) = \begin{cases} \log(\mathbf{0.8}) & \text{si } \log(K_{ow}) < \mathbf{6.5} \\ \mathbf{4.84 - 0.731} * \log(K_{ow}) & \text{sinon} \end{cases}$$



Efficacité d'assimilation *via* l'alimentation : β_c

- Thomann et al. (1992) :

$$\log(\beta_c) = \begin{cases} \log(\mathbf{0.8}) & \text{si } \log(K_{ow}) < \mathbf{6.5} \\ \mathbf{4.84 - 0.731} * \log(K_{ow}) & \text{sinon} \end{cases}$$



- Arnot et Gobas (2004) : $\beta_c = \left(3.10^{-7} * K_{ow}(25°C) + 2\right)^{-1}$

Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

Taux d'ingestion des proies (j^{-1})

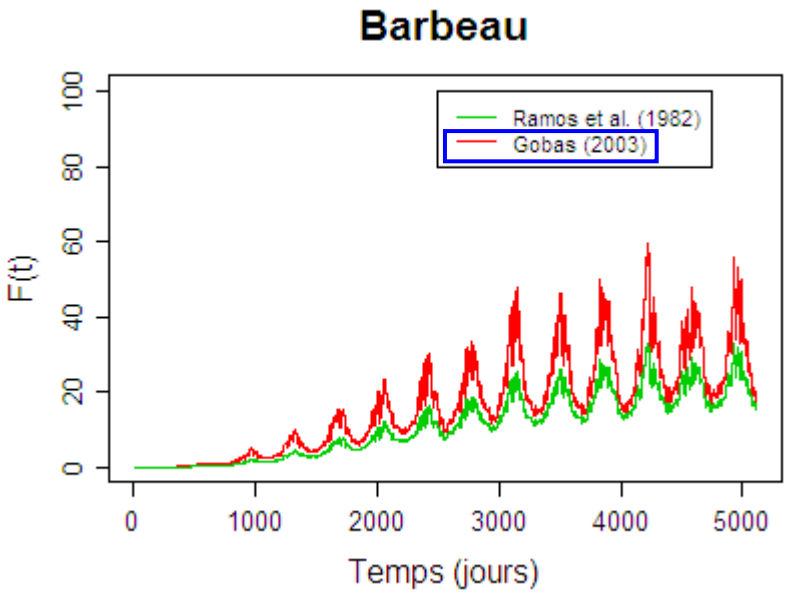
- Ramos et al. (1982)

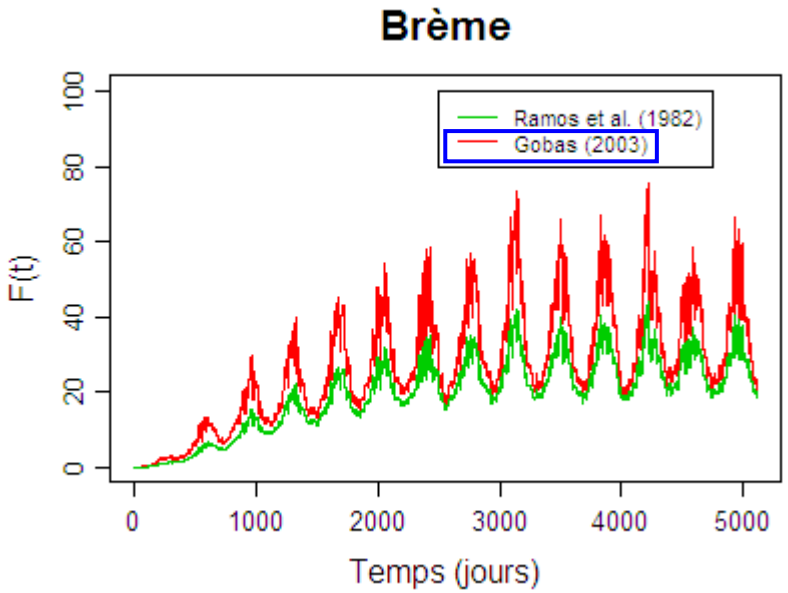
$$F_i(t) = 5.83 * 10^{-2} * W_i(t) * \exp(0.04 * T(t) - 2.17)$$

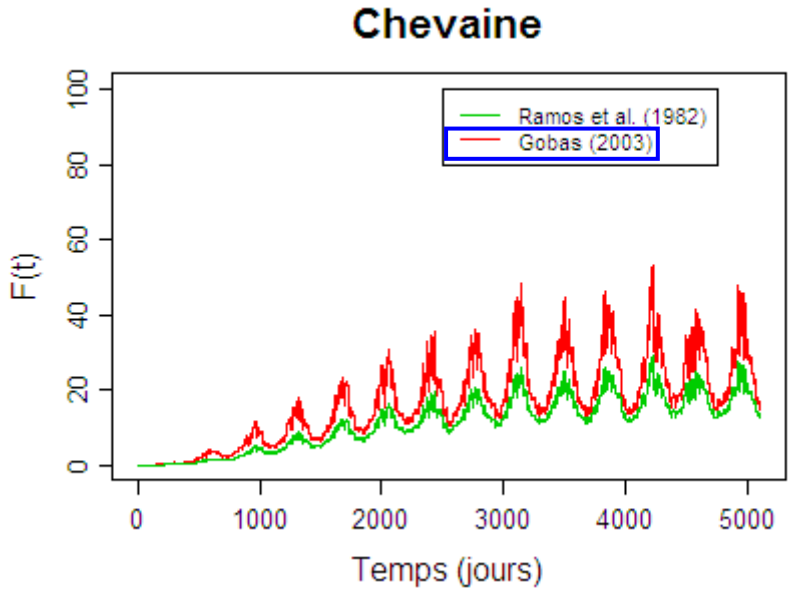
- Gobas (2003) :

$$F_i(t) = 0.022 * W_i(t)^{0.85} * \exp(0.06 * T(t))$$

Taux d'ingestion des proies (j^{-1})







Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_{c,i}(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce *i* envers la proie *j* (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

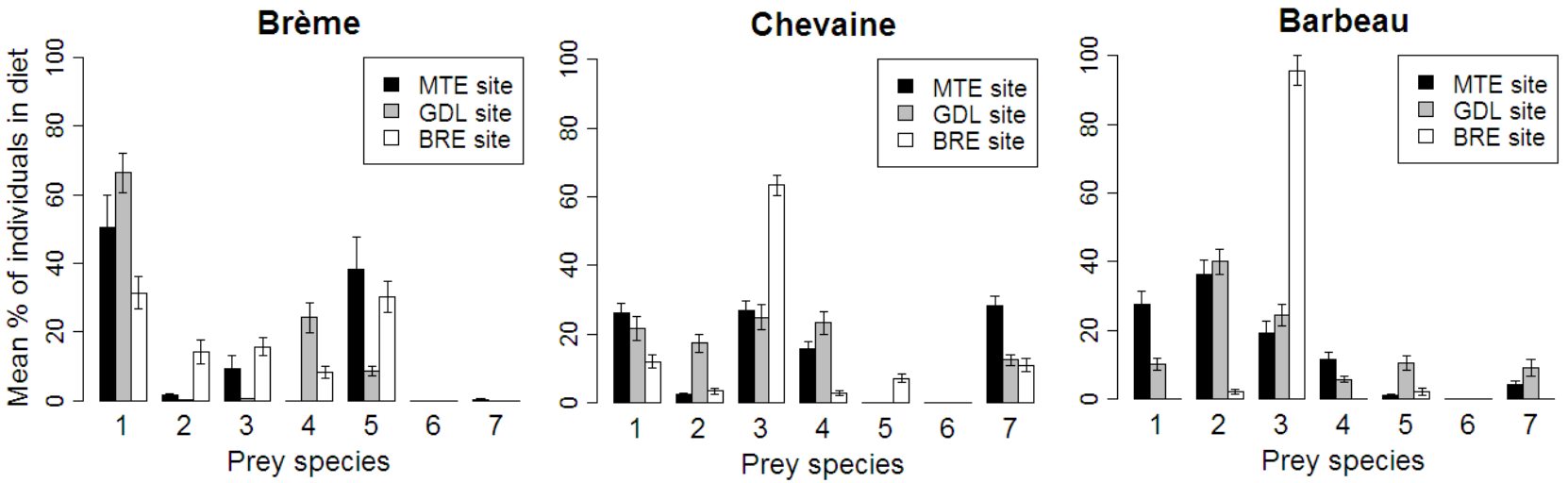
$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

Préférences alimentaires

- Analyses des contenus stomacaux



1- Diptères; 2- Autres Insectes aquatiques; 3- Crustacés; 4- Gastéropodes; 5- Bivalves; 6- Macrophytes; 7- Autres (algues, annélides…)

Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\boxed{E_i(t)} + G_i(t) + M_{c,i}(t)\big)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_i(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

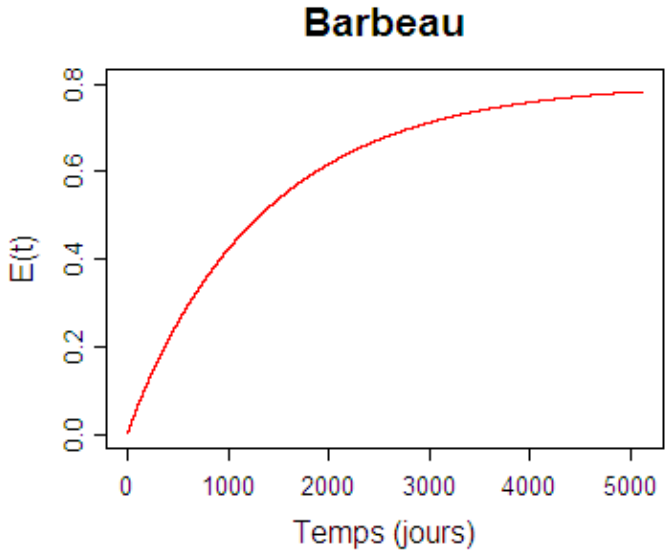
$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

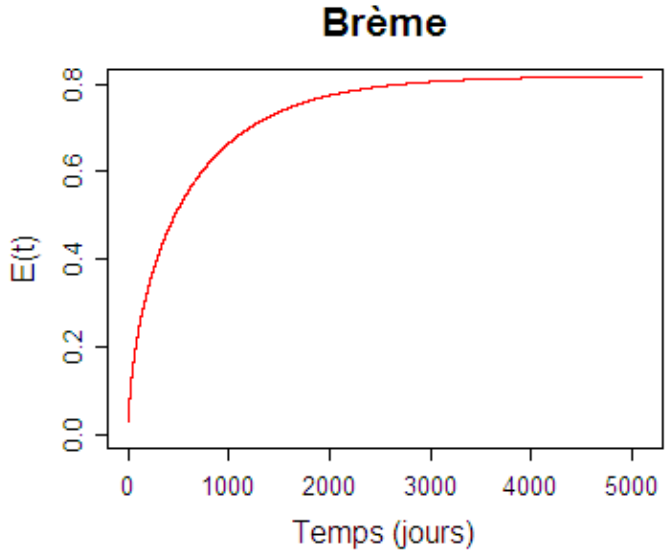
$M_i(t)$: Taux de métabolisation

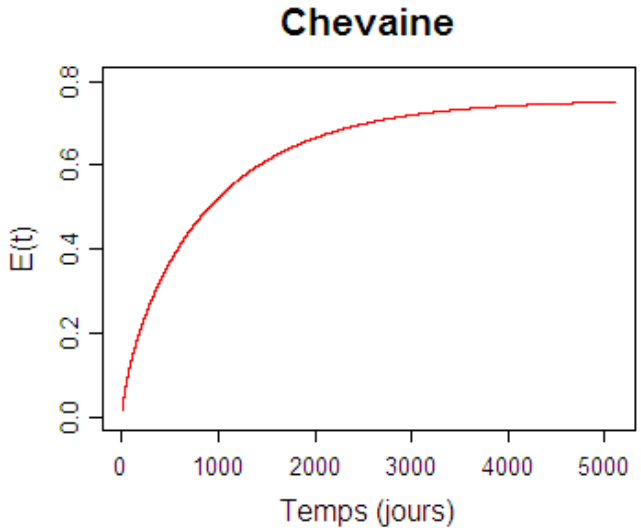
$R_i(t)$: Taux de reproduction

Taux d'excrétion (j^{-1})

- Ballestrazzi et Lanari (1996) : $\ln(E(t)) = -1.92 + 0.221 * \ln(W(t))$







Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t) + G_i(t) + M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_i(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

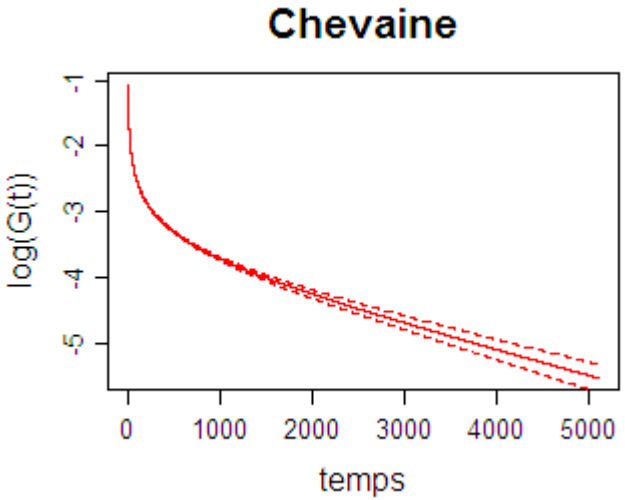
$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

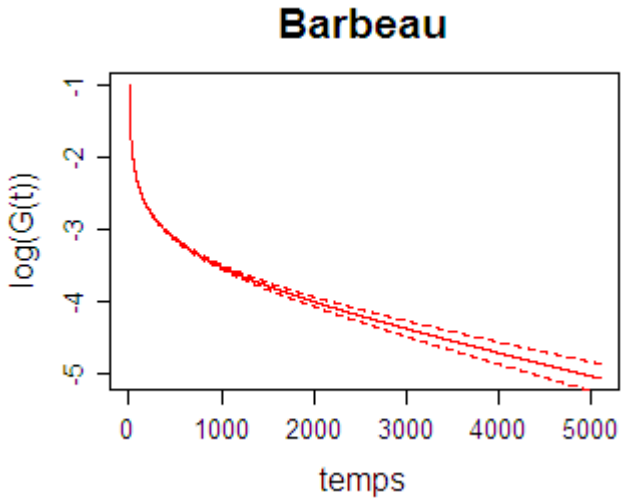
$M_i(t)$: Taux de métabolisation

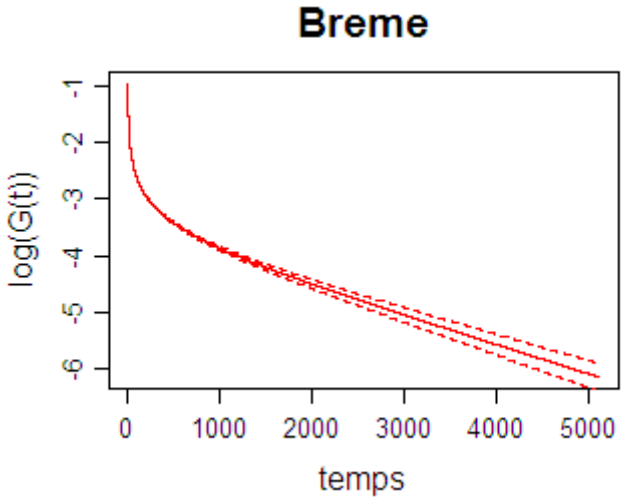
$R_i(t)$: Taux de reproduction

Taux de croissance journalier

$$g(t) = \ln\left(\frac{W(t+1)}{W(t)}\right) \quad \Rightarrow \quad G(t) = \exp(g(t)) - 1$$







Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}}$$

$$\underbrace{-\left(E_i(t) + G_i(t) + \cancel{M_{c,i}(t)}\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} \underbrace{-\cancel{R_i(t)}\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_i(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

Modèle de bioaccumulation

Poissons :

$$\frac{dC_{c,i}(t)}{dt} = \overbrace{U_{c,i}(t)\,\alpha_c\,C_{c,w}(t) - H_{c,i}(t)\,C_{c,i}(t)}^{\text{Voie respiratoire}} + \overbrace{\beta_c\,F_i(t)\sum_j Q_{i,j}\,C_{c,j}(t)}^{\text{Voie trophique}} - \underbrace{\left(E_i(t)+G_i(t)+M_{c,i}(t)\right)C_{c,i}(t)}_{\text{Voie métabolique}} - \underbrace{R_i(t)\,C_{c,i}(t)}_{\text{Voie reproductive}}$$

$U_i(t)$: Taux de filtration de l'eau → $U(W(t), T(t), K_{ow})$

α_c : Efficacité d'assimilation des particules dissoutes en congénère c → $\alpha(K_{ow})$

$H_{c,i}(t)$: Taux d'élimination par les branchies → $H(W(t), T(t), K_{ow}, L_f(t))$

β_c : Efficacité d'assimilation des particules ingérées → $\beta(K_{ow})$

$Q_{i,j}$: Préférence alimentaire de l'espèce i envers la proie j (contenus stomacaux)

$F_i(t)$: Taux d'ingestion → $F(W(t),T(t))$

$E_i(t)$: Taux d'excrétion → $E(W(t))$

$G_i(t)$: Taux de croissance → $G(W(t))$

$M_i(t)$: Taux de métabolisation

$R_i(t)$: Taux de reproduction

Concentration dans l'eau : $C_{c,w}(t)$

- Supposée constante au cours du temps
- Valeur utilisée provenant des valeurs discutées dans le rapport de l'usine TREDI en juillet 2010 (différentes sources)

  - Mesures réalisées systématiquement inférieures à la limite de quantification
  - Valeur moyenne dans le Haut-Rhône : $\sum PCB_i = 0.2\ \mathrm{ng/L}$

Concentration dans les proies

- Concentrations constantes : celles mesurées lors de notre campagne

- Modèle cinétique :

Invertébrés :

$$\frac{dC_{j,c}(t)}{dt} = \underbrace{\boxed{\varepsilon_{j,s}}\, C_s(t)}_{\text{Voie trophique}}$$

Isotopes

$\varepsilon_{j,s}$: contribution du carbone d'origine sédimentaire

↳ $\varepsilon_{j,s}$ (t) ?

Méthode de simulation

- Modèle implémenté dans R (code disponible et facilement réutilisable)

- 10000 tirages aléatoires dans $W(t)$ et $T(t)$ → estimation de $U(t)$, $H(t)$, $F(t)$, $E(t)$ et $G(t)$ et intervalle de crédibilité

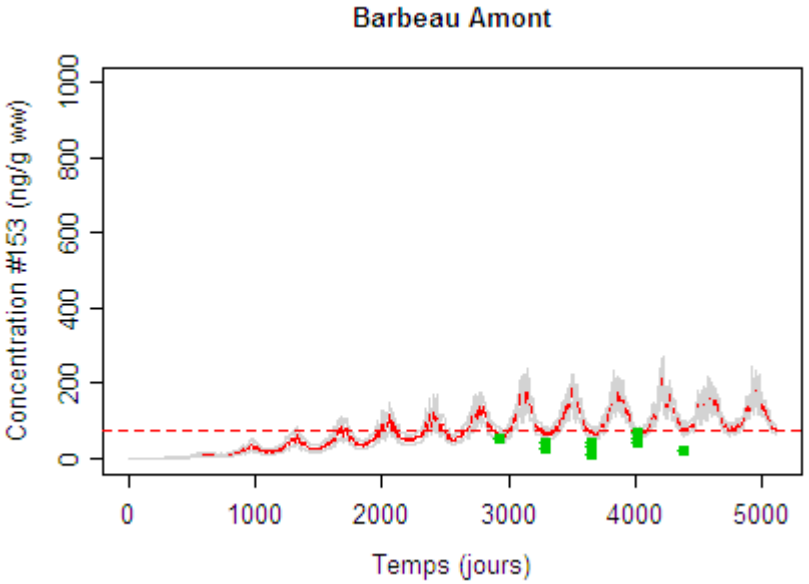
→ moyenne et intervalle de crédibilité autour de $C_c(t)$

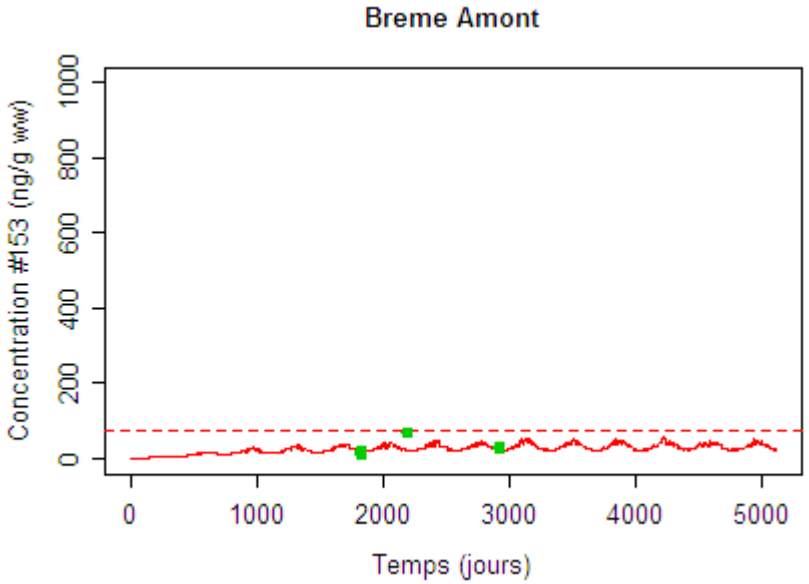
- Concentration constante chez invertébrés (MTE/GDL-BRE) :
  - Chironomes : 1 / 30 ng/g PF
  - Gammares : 8 / 15 ng/g PF
  - Ephémères : 6 / 15 ng/g PF
  - Bivalves : 0.4 / 7 ng/g PF

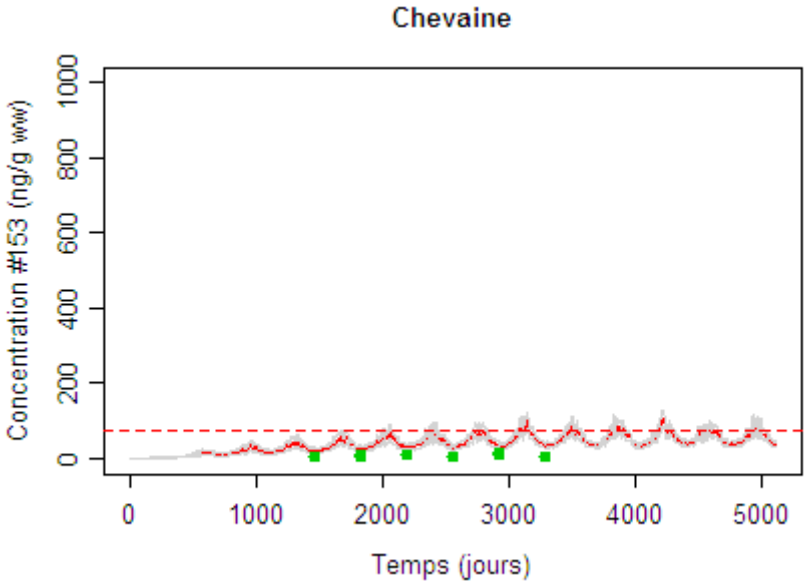
- $C_c(0) = 0$: poissons non contaminés à la naissance

- $\log(K_{ow}) = 6.92$

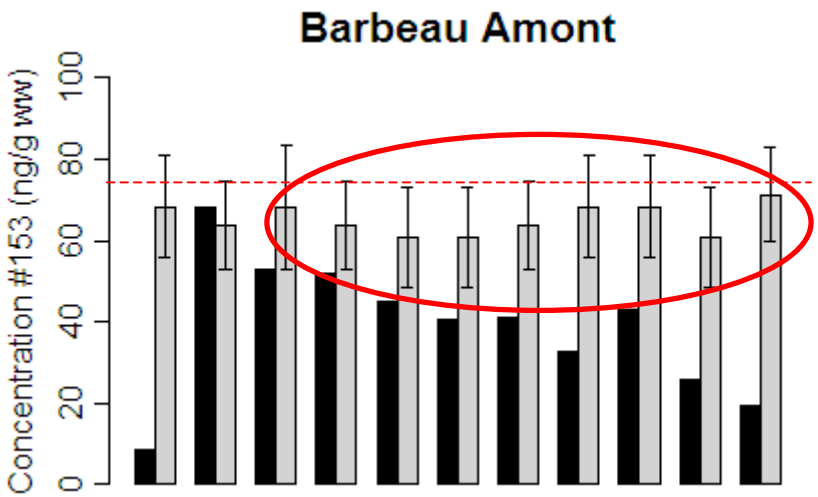
Résultats Amont

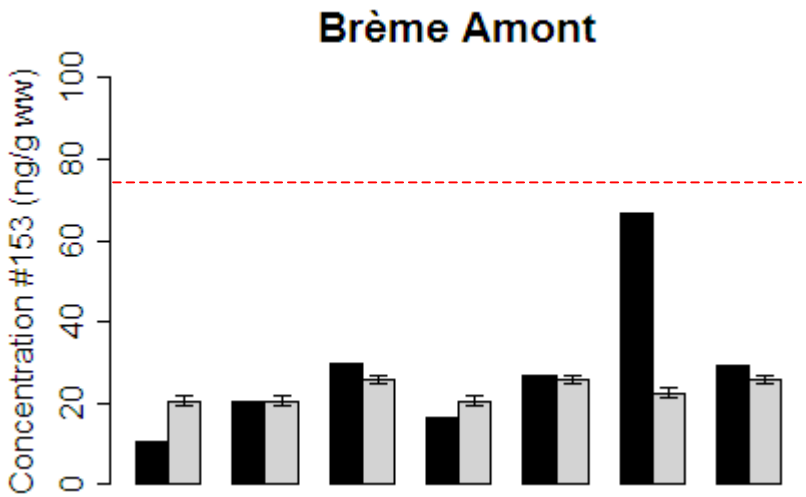


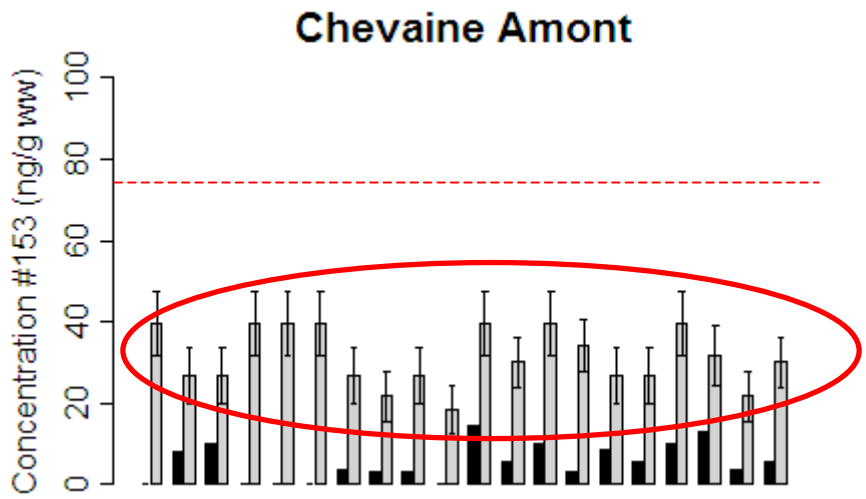




Comparaison Prédictions / Observations

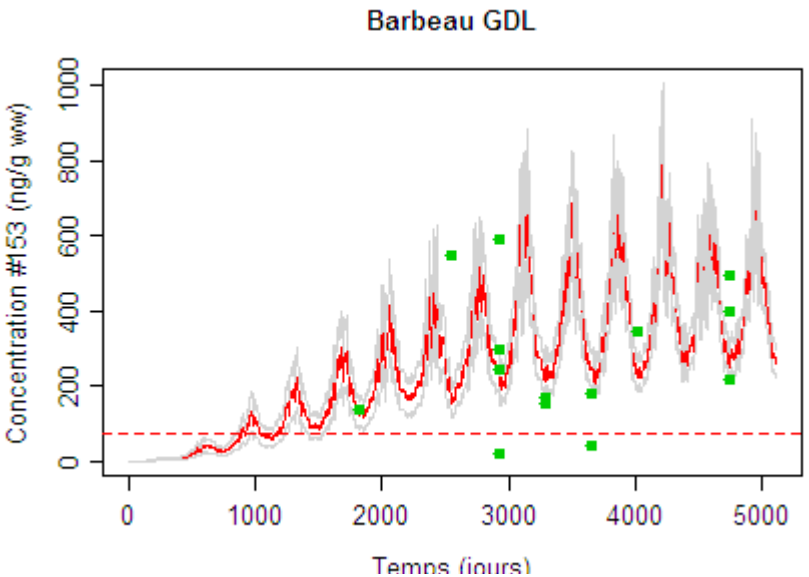


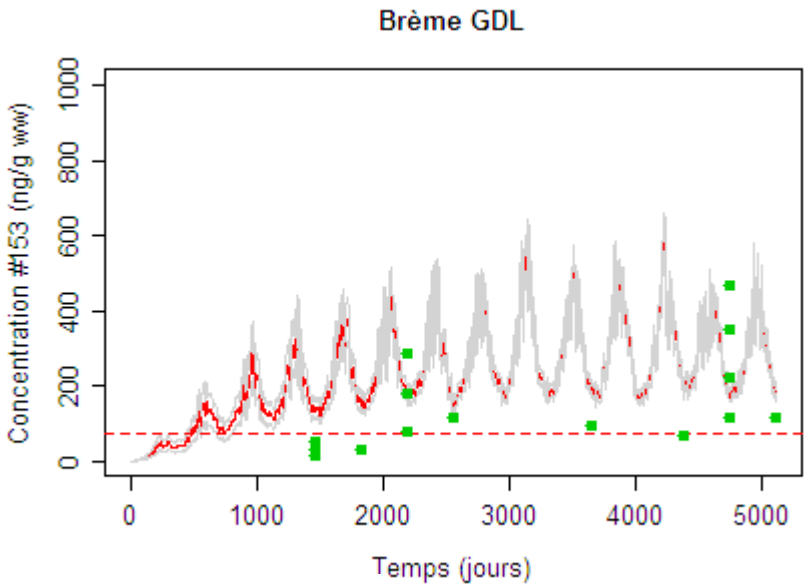


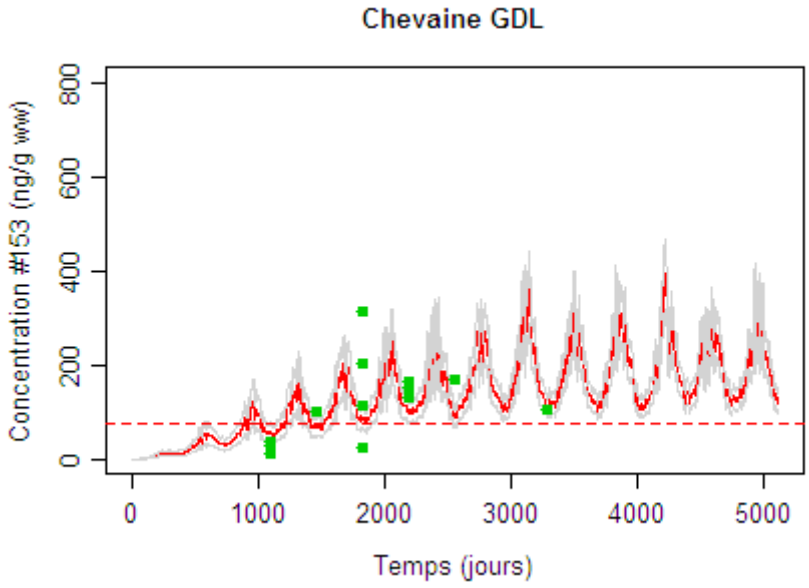


Observations
Prédictions

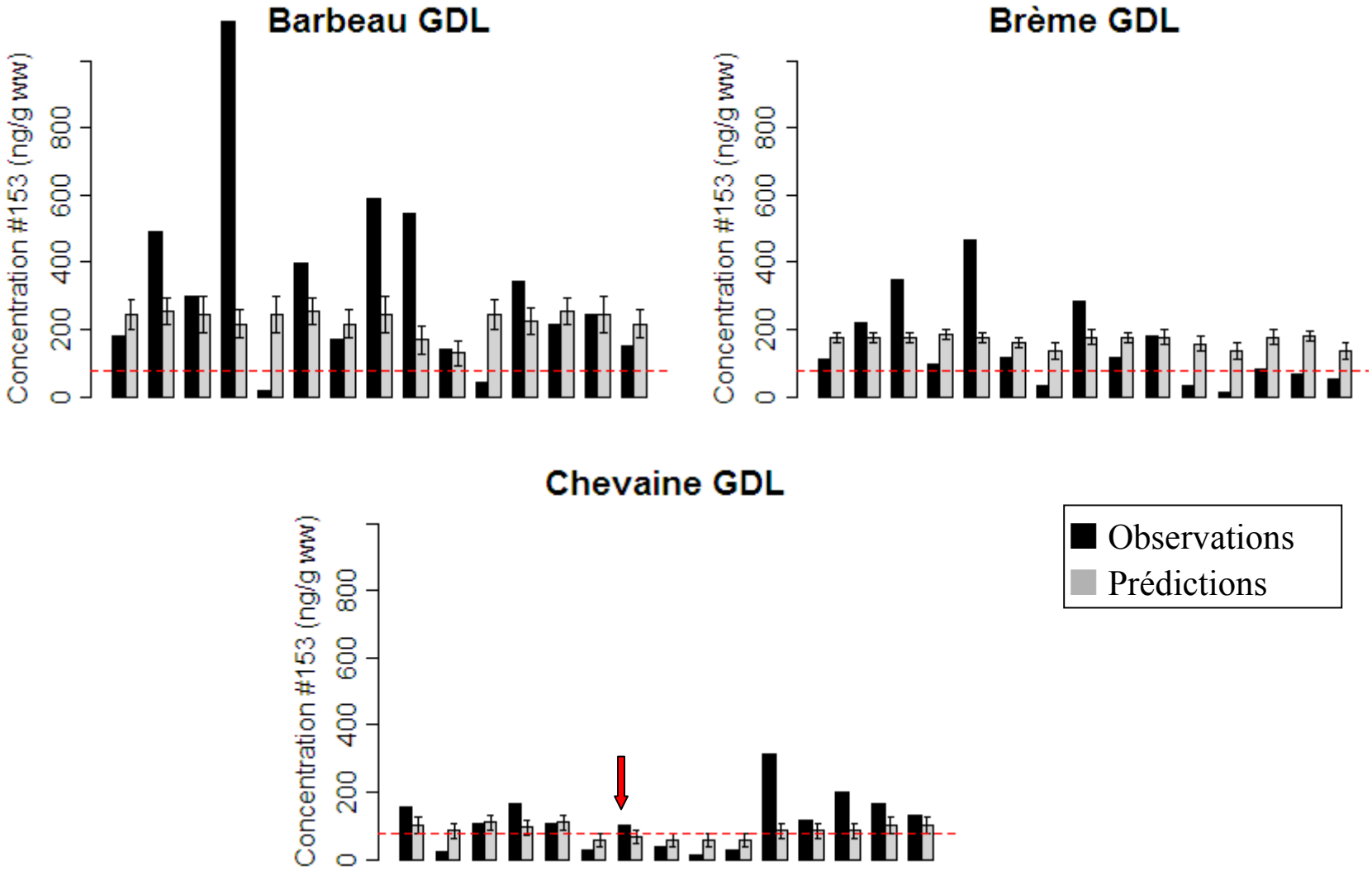
Résultats Grand Large



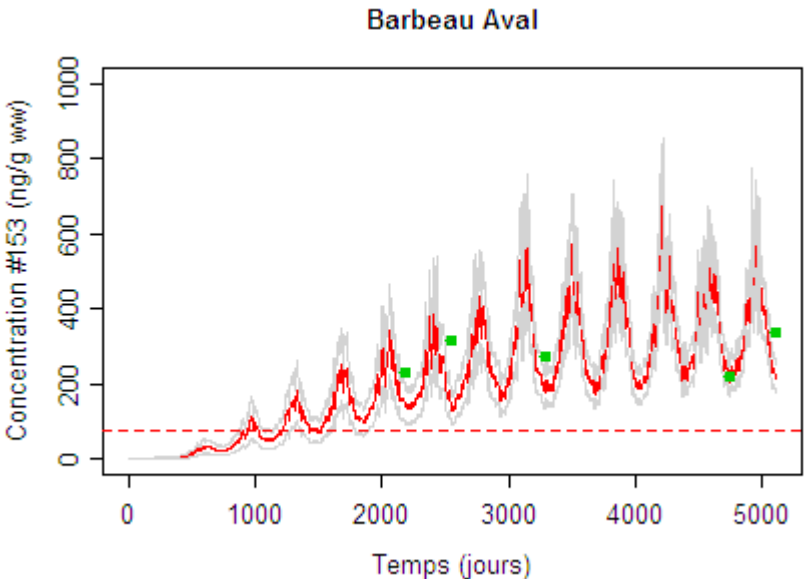


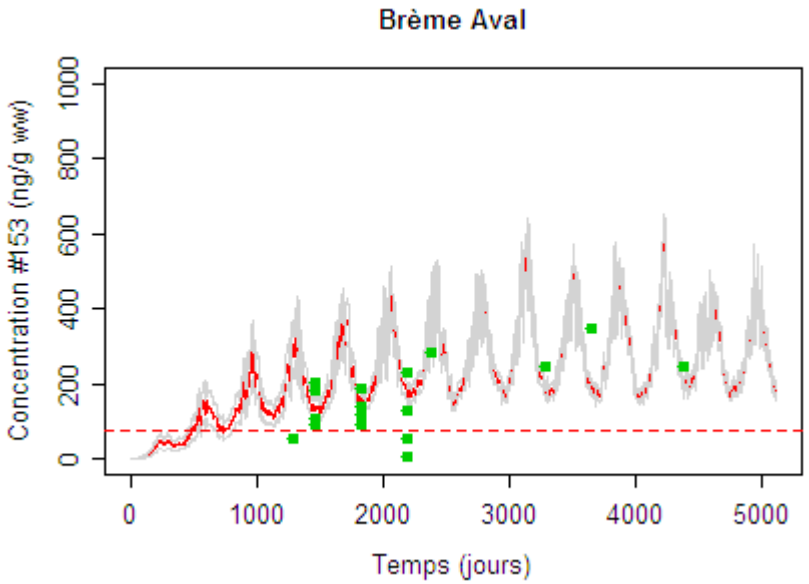


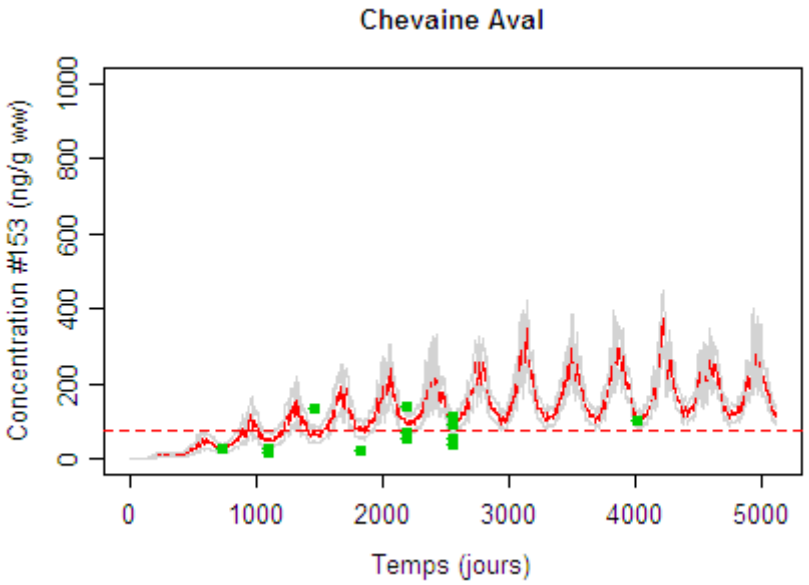
Comparaison Prédictions / Observations



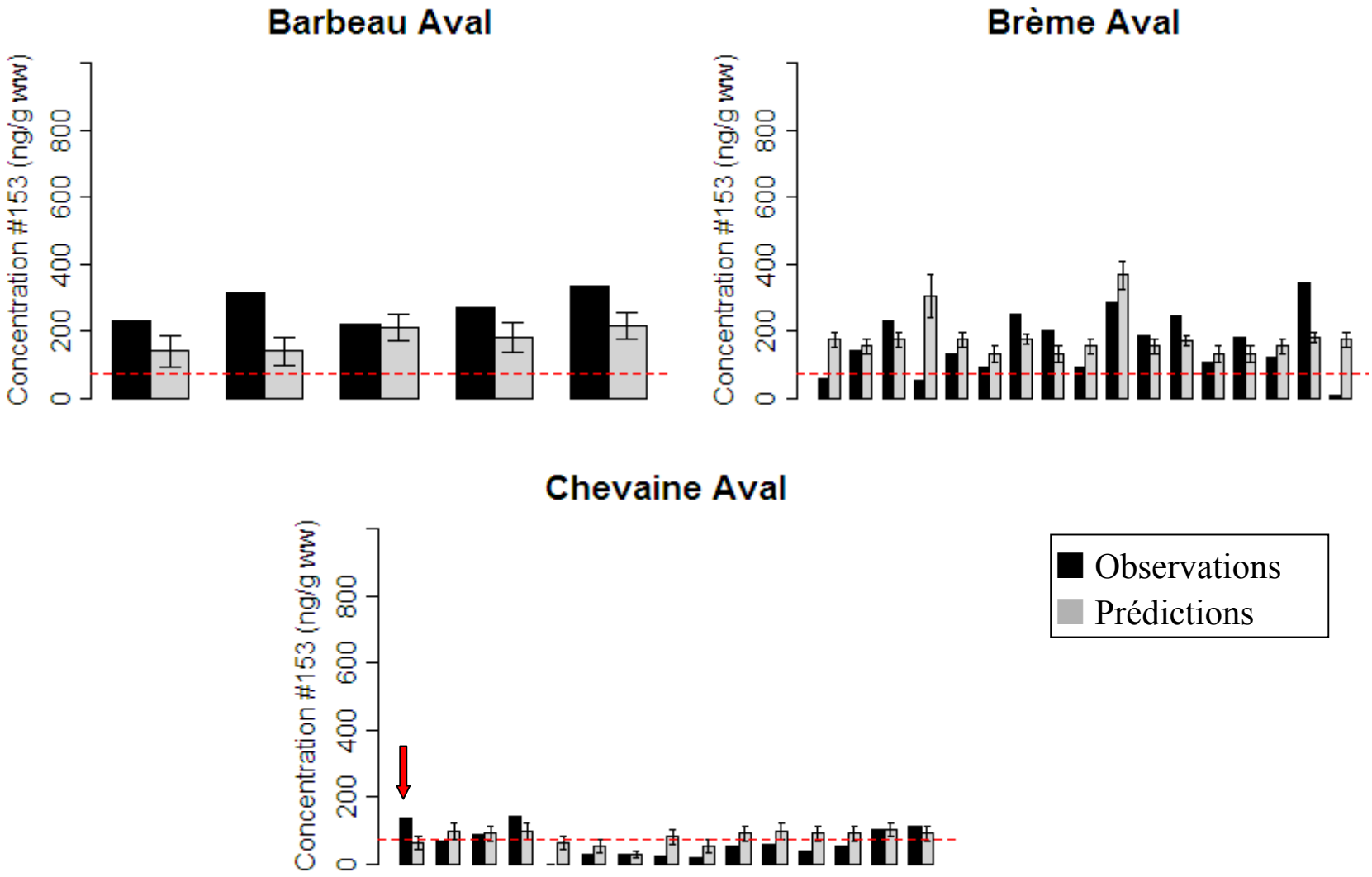
Résultats Aval



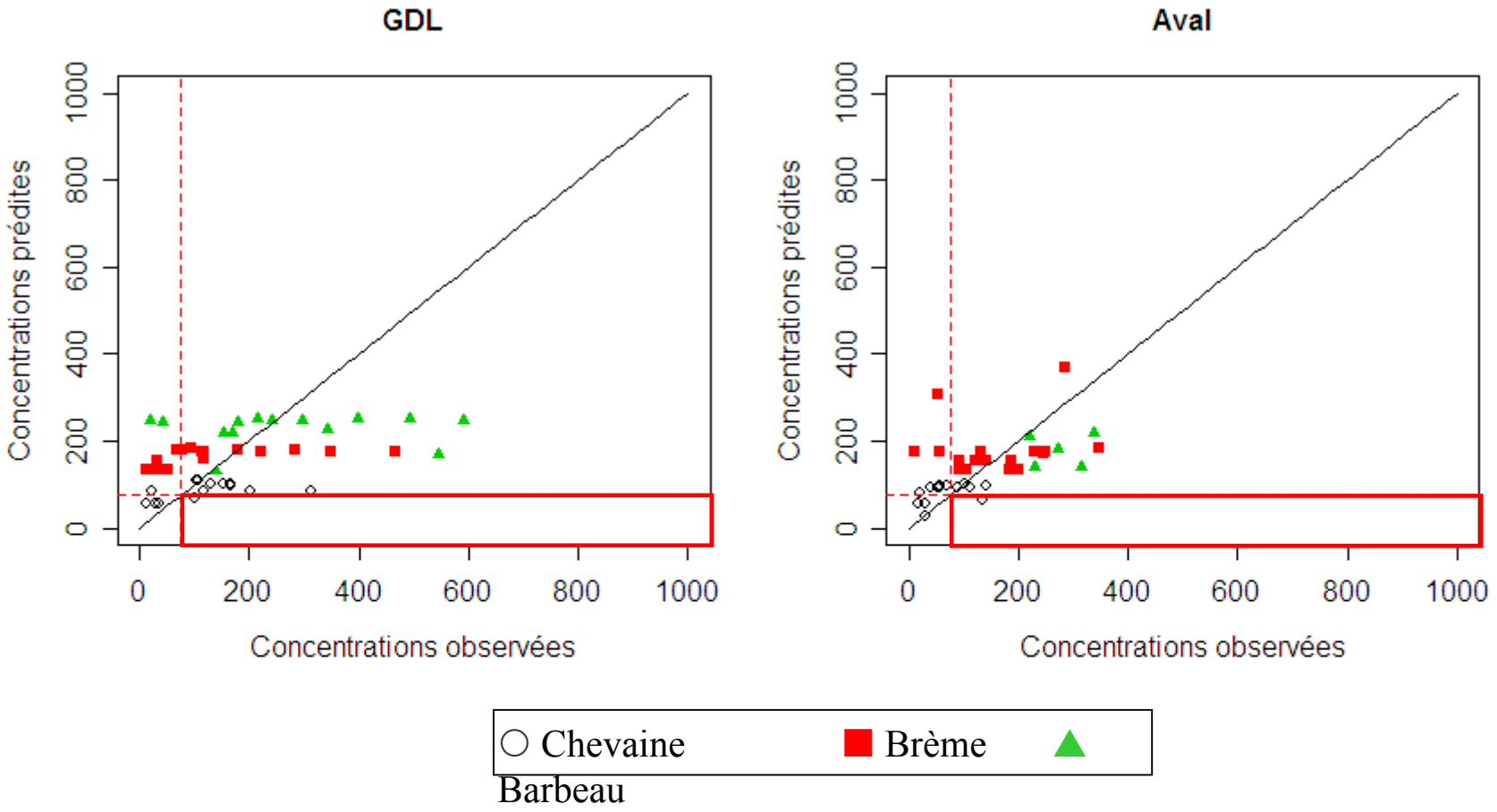




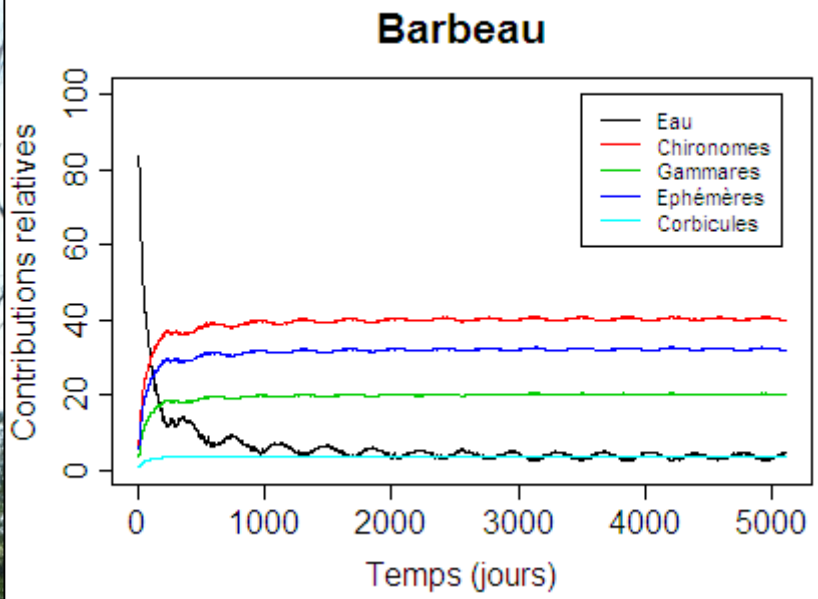
Comparaison Prédictions / Observations

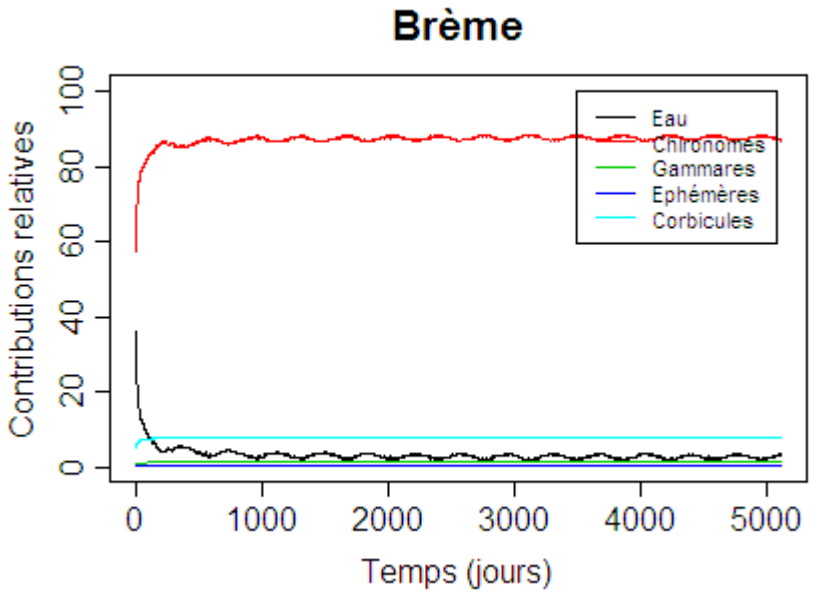


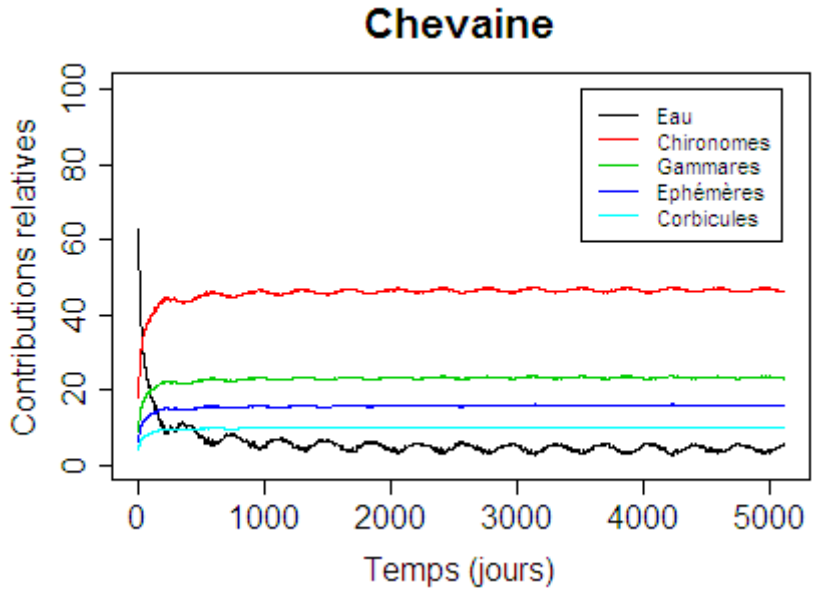
Comparaison Prédictions / Observations



Contributions relatives voies respiratoire / trophique







Conclusions - Perspectives

- « Amélioration » du modèle

  - •Étude du taux d'excrétion
  - •Tester la sensibilité du modèle aux différents paramètres
  - •Modèle de cinétique de contamination des invertébrés
  - •Inclure d'autres compartiments (phytoplancton et/ou macrophytes) ?
  - •Tester d'autres congénères (PCBi)
  - •Valider le modèle sur d'autres données disponibles

- Utilisation du modèle

  - •Prédictif : définir une concentration dans les sédiments compatible avec la norme sanitaire
  - •Rétrospectif : comparer les niveaux de contaminations passés aux présents

Barbeau

Barbeau

Merci

Brème

Chevaine