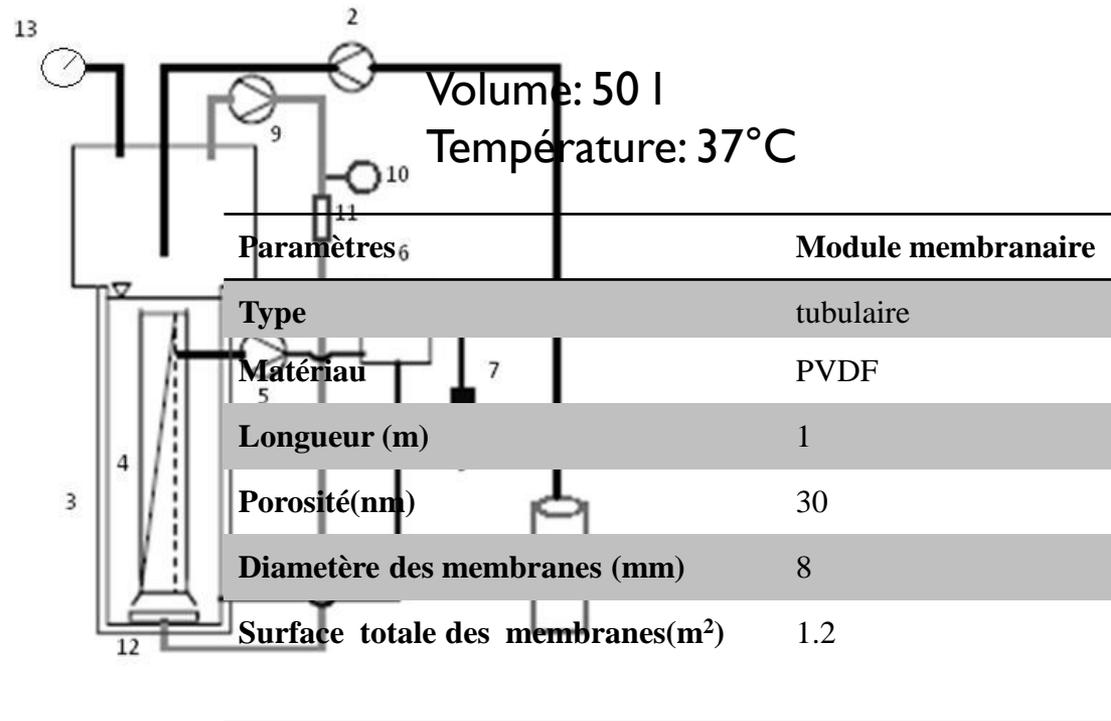




Modélisation d'un bioréacteur anaérobie à membrane submergée pour le traitement des eaux usées

Amal ZAYEN, Hatem KSIBI, Sami SAYADI

Description du processus



Effluent à traiter:

Hautement chargé en matière organique  Plusieurs transformations possibles.

Chaque transformation peut être accomplie par une des différentes voies métaboliques possibles

 Plusieurs essais de modélisation sont possibles

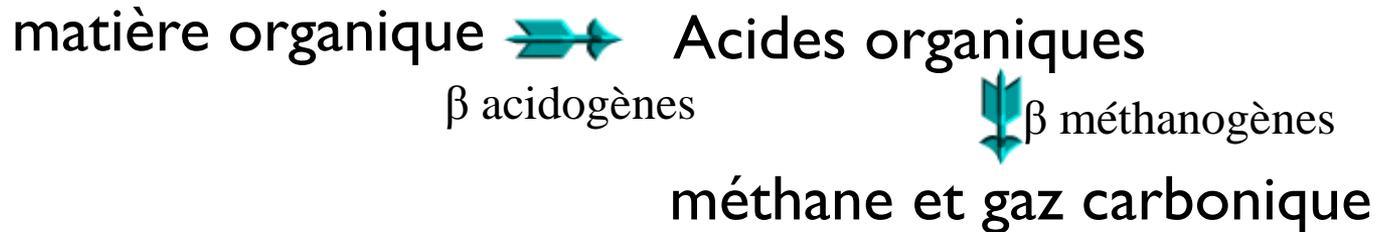
Modélisation de la phase biologique

- ▶ Modélisation de l'étape limitante: méthanogenèse de l'acétate (Andrews, 1968)

C'est cette étape qui limite la vitesse de la réaction globale.

- ▶ Modélisation des surcharges organiques: (Hill and Bath, 1977), (Moletta et al., 1986)

Représentation de la méthanogenèse en deux étapes :



-  permet de simuler les surcharges organiques qui se traduisent par une accumulation des AGV et une inhibition plus ou moins importante de la méthanogenèse.

▶ Modélisation de l'inhibition par l'hydrogène (Mosey, 1983)

4 populations bactériennes et 7 réactions:

↪ Population acidogène

↪ Population acétogène

↪ Population méthanogène acétotrophe

↪ Population méthanogène hydrogénotrophe

👉 Rendre compte de l'inhibition de certaines populations bactériennes par l'hydrogène

▶ Modèle générique ADMI (IWA Task Group for Mathematical Modelling of anaerobic Digestion Processes, 2002)

7 espèces bactériennes et de nombreux substrats

↪ Malgré l'exhaustivité des phénomènes qu'il peut décrire, il est très complexe: 26 équations et plus de 80 paramètres

👉 Frein à l'analyse mathématique du modèle et son utilisation pour des stratégies de contrôle



Savoir comment choisir un modèle est une question cruciale.



compromis entre la complexité du modèle permettant de représenter tous les phénomènes connus et son adéquation avec les informations expérimentales disponibles.



Deux modèles de la littérature ont été choisis et adaptés à un procédé de bioréacteur à membrane:

➡ Le modèle à un seul étage: 1 seule substrat et une seule population bactérienne

➡ Le modèle à 3 étages (Hill and Barth (1977), Simeonov (1996)): 3 substrats et 2 populations bactériennes

Modèle à un seul étage

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \mu X - DA_x X \\ \frac{ds}{dt} = -K_1 \mu X + DA_s (S_{in} - S) \\ Q = K_2 \mu X \end{array} \right.$$

Avec

$$\mu(S) = \mu_{max} \frac{S}{S + K_s + \frac{S^2}{K_I}}$$

Modèle à 3 étages

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_0}{dt} = -DA_{S_0}S_0 - \beta X_1 S_0 + DY_p S_{0in} \\ \frac{dX_1}{dt} = (\mu_1 - k_1 - DA_x)X_1 \\ \frac{dS_1}{dt} = -DA_{S_1}S_1 + \beta X_1 S_0 - K_1 \mu_1 X_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = (\mu_2 - k_2 - DA_x)X_2 \\ \frac{dS_2}{dt} = -DA_{S_2}S_2 + Y_b \mu_1 X_1 - K_2 \mu_2 X_2 \\ Q = Y_g \mu_2 X_2 \end{array} \right.$$

Avec $\mu_1(S_1) = \mu_{1max} \frac{S_1}{S_1 + K_{s1}}$ et $\mu_2(S_2) = \mu_{2max} \frac{S_2}{S_2 + K_{s2} + \frac{S_2^2}{K_I}}$

Résolution

Modèle à un seul étage

Paramètre	Dimension	Interprétation
S_{0i}	g/l	concentration de la matière organique dans l'influent
A_x, A_s		coefficient de rétention des bactéries et du substrat
D	j^{-1}	Taux de dilution
K_1	gS/gX	taux de consommation du substrat
K_2	l/g X	coefficient de rendement de biogaz
K_s	g/l	constante de demi-saturation des bactéries
K_I	g/l	constante d'inhibition des bactéries
μ_{max}	j^{-1}	taux de croissance spécifique maximal des bactéries

Modèle à trois étages

Paramètre	Dimension	Interprétation
S_{0i}	g/l	matière volatile dans l'influent
S_0, S_1, S_2	g/l	concentration de la matière volatile, la matière volatile soluble, et les AGV
X_1, X_2	g/l	concentration des bactéries acidogènes et méthanogènes
A_x		coefficient de la rétention des bactéries par la membrane
A_{s0}, A_{s1}, A_{s2}		coefficients de la sélectivité de la membrane vis-à-vis de S_0, S_1, S_2
D	j^{-1}	taux de dilution
k_1, k_2	j^{-1}	coefficient de mortalité pour les bactéries acidogènes et methanogènes
k_{s1}, k_{s2}	g/l	constantes de demi- saturation pour les bactéries acidogènes et méthanogènes
k_i	g/l	coefficient d'inhibition pour les bactéries methanogènes
Q	l/l.j	taux de production de biogaz
K_1, K_2	gS_1/gX_1 gS_2/gX_2	coefficient de rendement pour les bactéries acidogènes et méthanogènes
Y_b	gS_2/gX_1	coefficient de rendement des AGV à partir de la matière organique soluble
Y_g	l/g X_2	coefficient de rendement de biogaz
Y_p	g/g	fraction solubilisable de la matière volatile dans l'influent
β	l/g $X_{1,j}$	taux de solubilisation par unité de biomasse acidogène
μ_1, μ_2	j^{-1}	taux de croissance spécifique des bactéries acidogènes and méthanogènes
μ_{1max}, μ_{2max}	j^{-1}	taux de croissance spécifique maximum des bactéries acidogènes et méthanogènes

Hypothèses

↻ Réacteur parfaitement mélangé

↻ Pas de formation de gâteau sur la membrane de filtration

➡ Filtration idéale

➡ coefficients de sélectivité de la membrane vis-à-vis des différents substances constants

Méthode de résolution: pas à pas, explicite et ou implicite.

Utilisant le FORTRAN et la méthode de Runge Kutta du 4^{ème} ordre

Si on a $y' = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0$

La méthode RK4 est donnée par l'équation

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

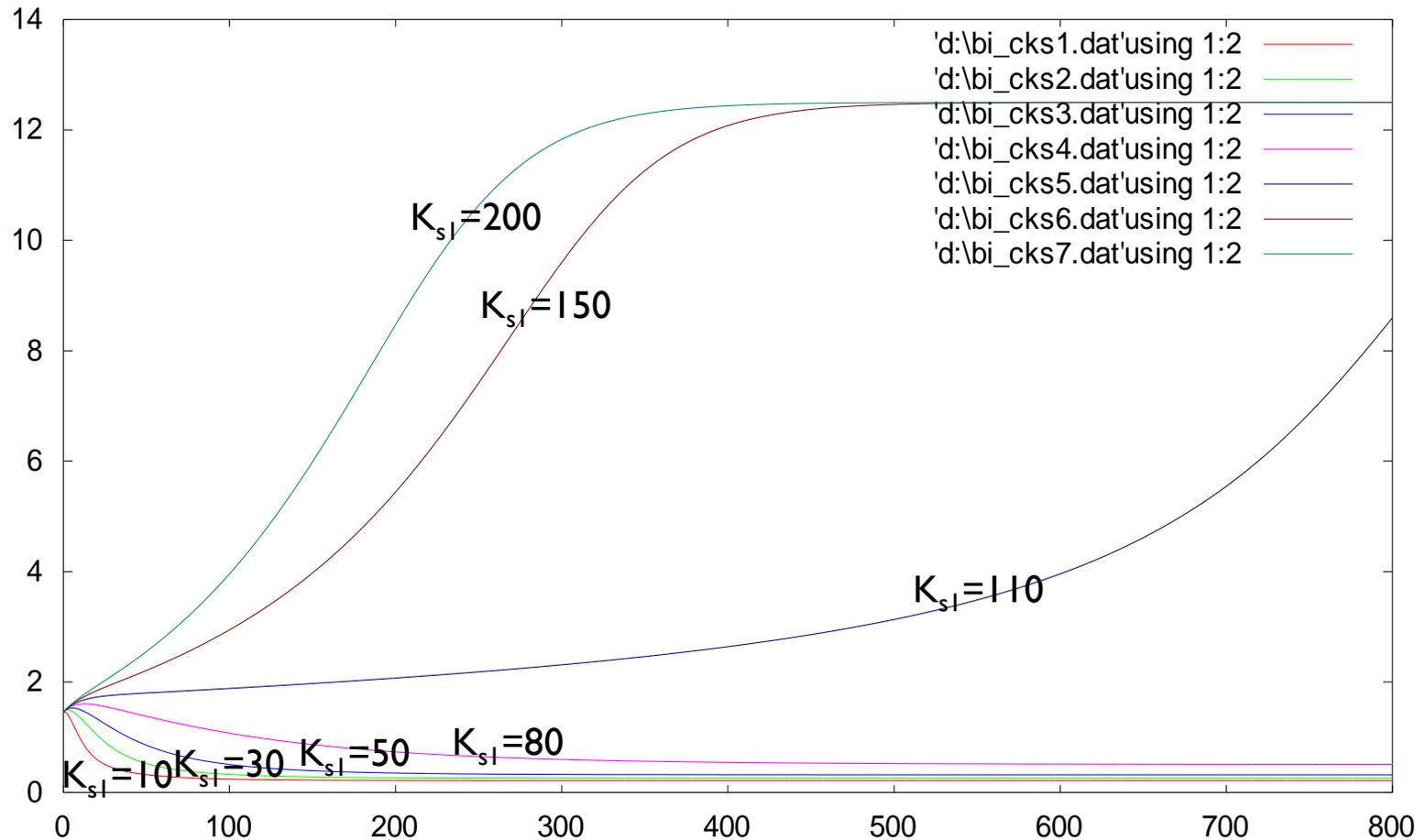
où

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = f(t_n, y_n) \\ k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right) \\ k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right) \\ k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3) \end{array} \right.$$

Etude paramétrique:
Cas test « modèle à 3 étages »

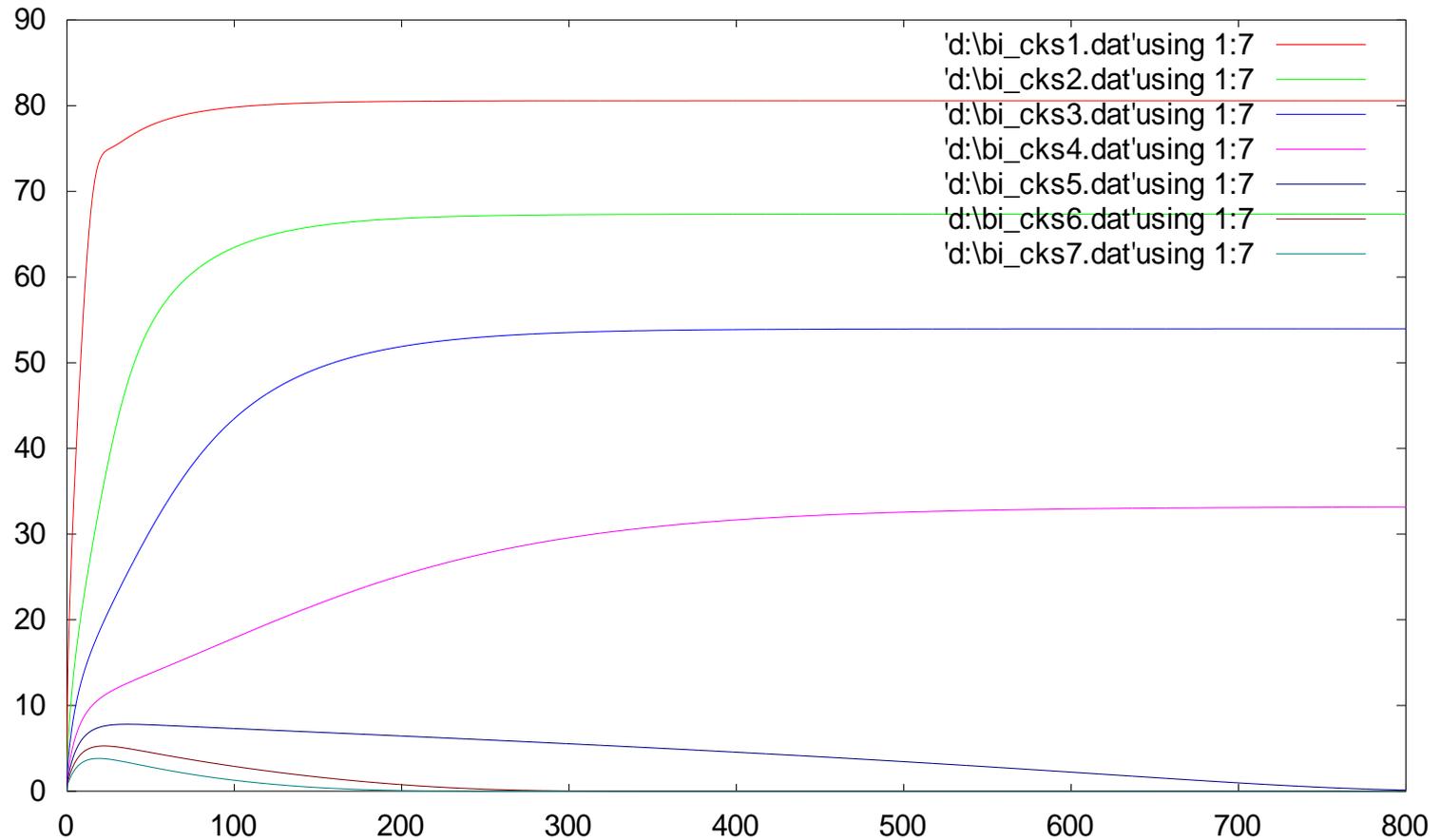
Effet de K_{s1}

► Sur S_0



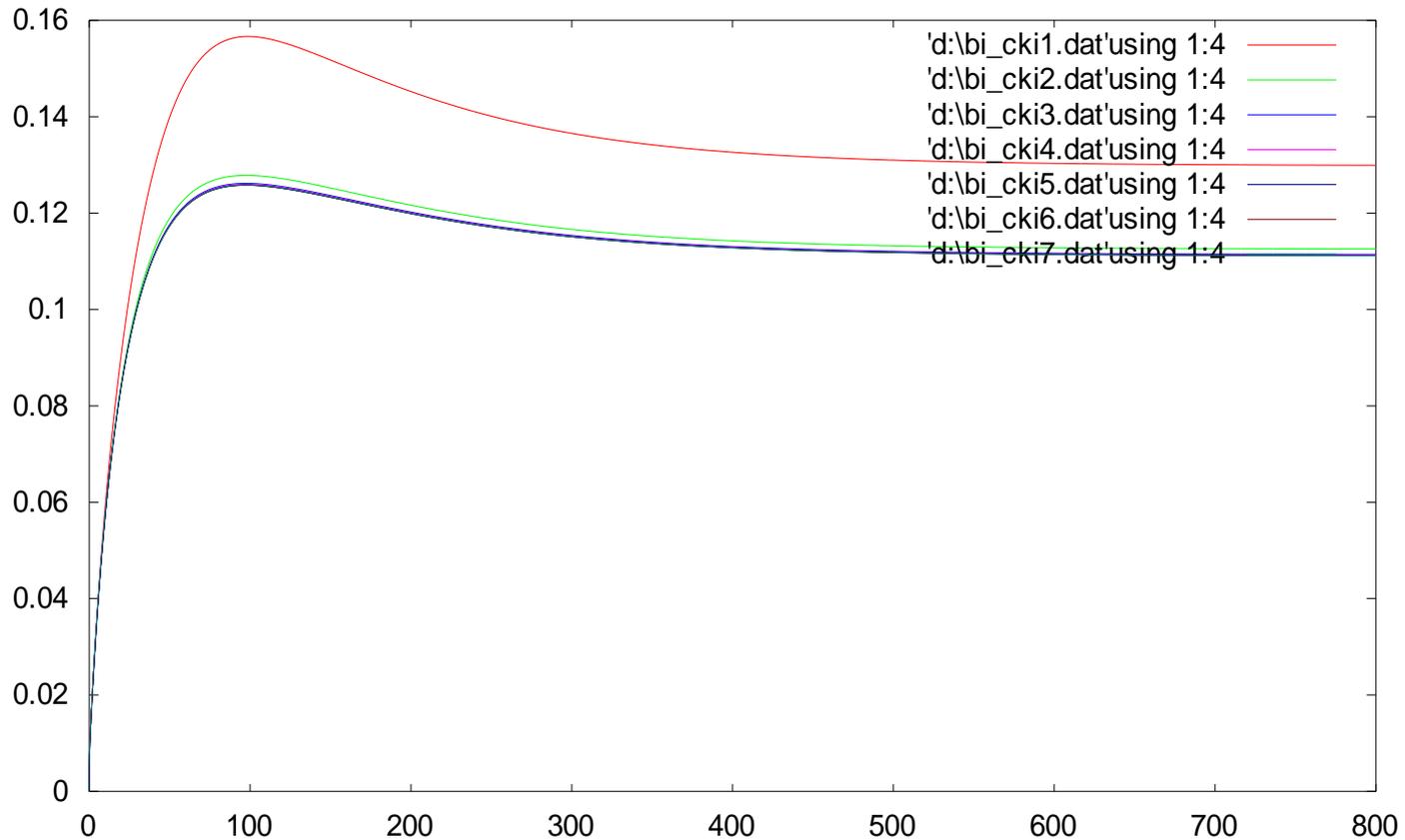
Effet de K_{s1}

► Sur Q



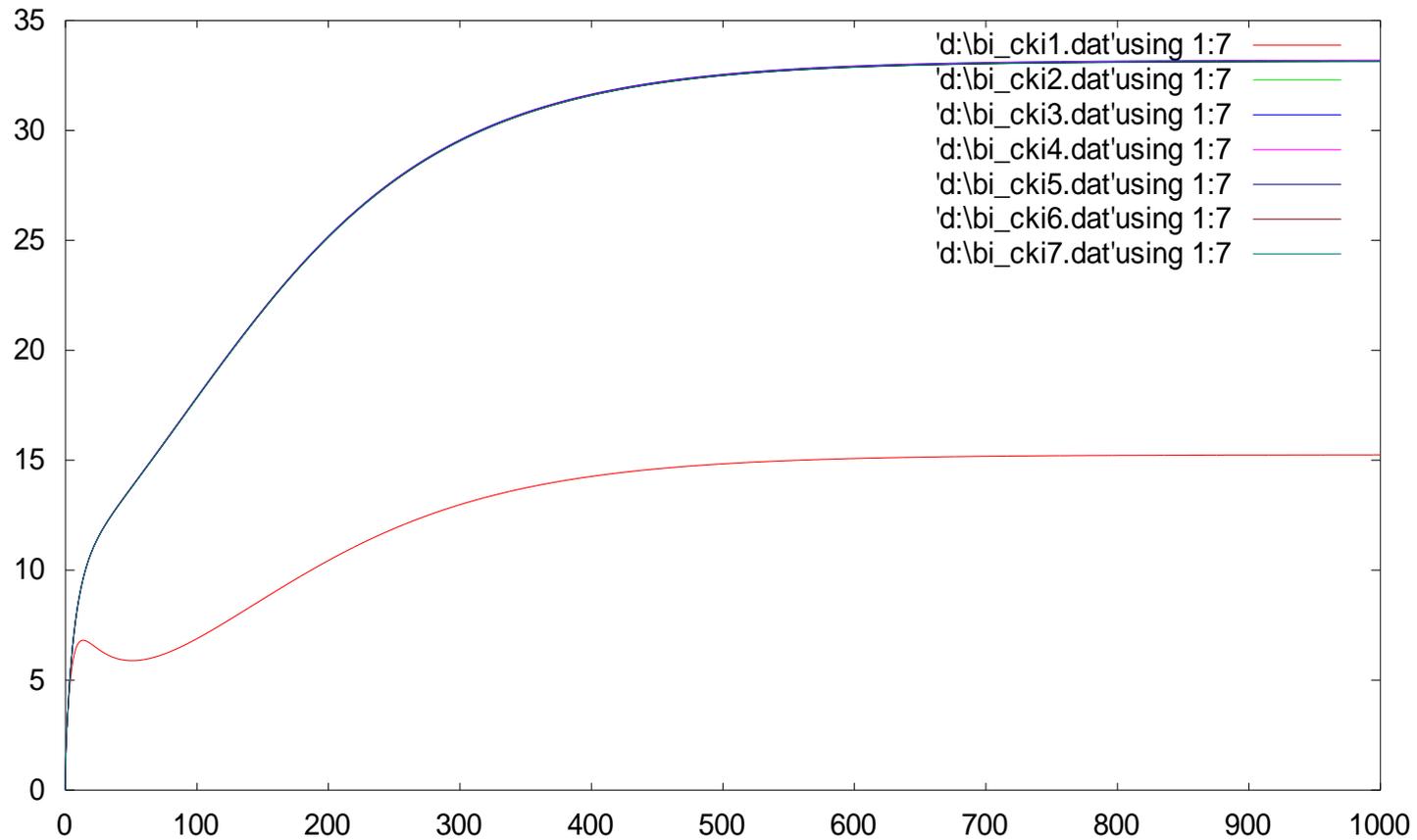
Effet de K_I

► Sur S_2



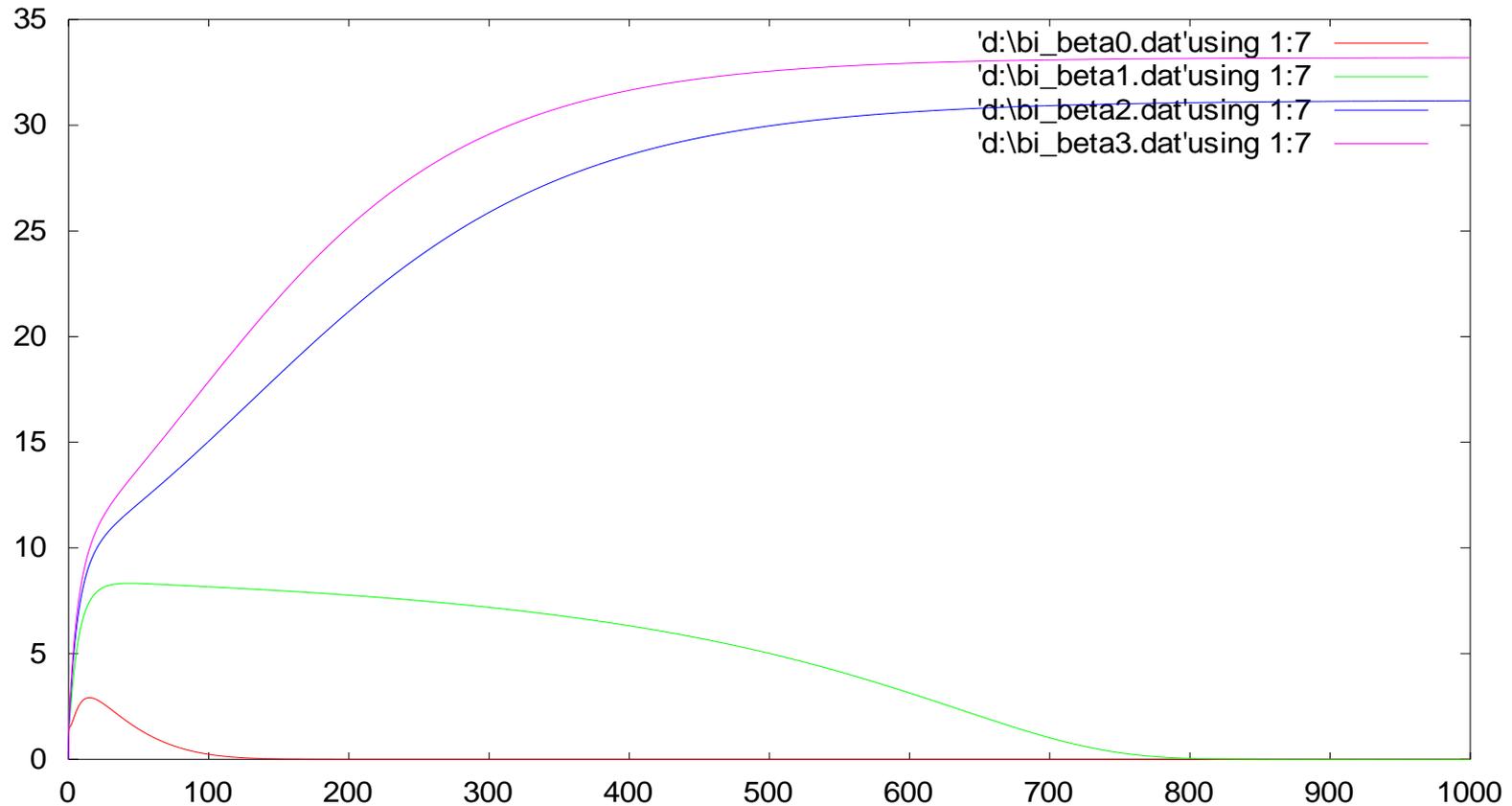
Effet de K_I

► Sur Q



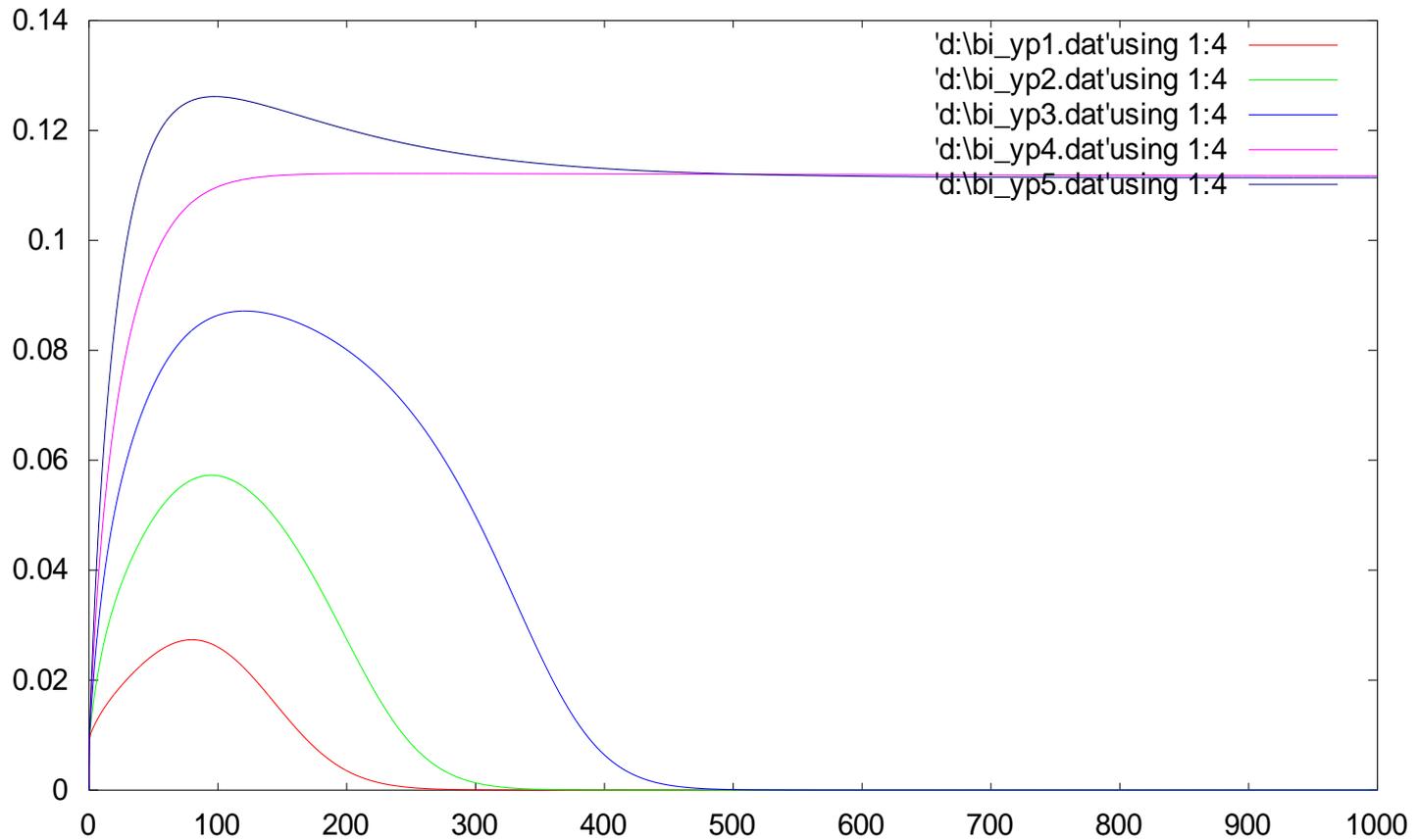
Effet de β

► Sur Q



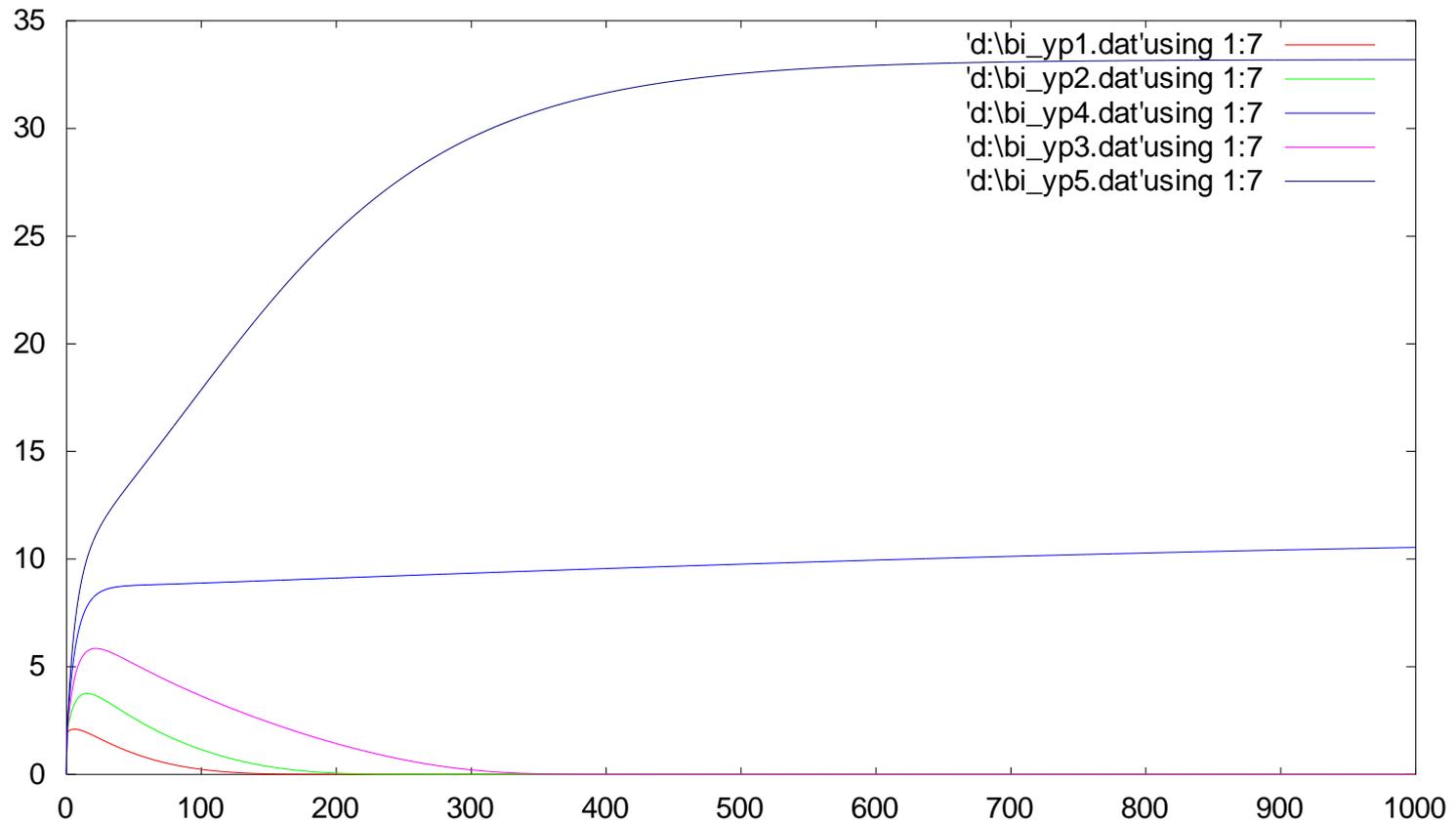
Effet de Y_p

► Sur S_2



Effet de Y_p

► Sur Q



Perspectives

- ▶ **Après simulation de ces deux modèles, les données expérimentales vont permettre:**
 - ❑ L'optimisation des paramètres les plus significatifs
 - ❑ Validation des modèles.