



HAL
open science

Estimation des coefficients de transfert de solutés en osmose inverse : vers un dimensionnement des procédés multi-étagés pour le recyclage d'effluents dans les agro-industries

Claire Fargues, Hedi Romdhana, Rachel Millot, Violaine Athès, Luidgi Residant, Eloïse Levrien, Sininth Rasasegaram, Kaouthare Ferhat, Jean Miniou, Nadine Leconte, et al.

► To cite this version:

Claire Fargues, Hedi Romdhana, Rachel Millot, Violaine Athès, Luidgi Residant, et al.. Estimation des coefficients de transfert de solutés en osmose inverse : vers un dimensionnement des procédés multi-étagés pour le recyclage d'effluents dans les agro-industries. 19eme congrès Société Française de Génie des Procédés, SFGP, Oct 2024, Deauville, France. hal-04746234

HAL Id: hal-04746234

<https://hal.inrae.fr/hal-04746234v1>

Submitted on 21 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



19^{ème} CONGRÈS | SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS
Deauville 15-17 OCTOBRE



Projet DIMEMPRO

Estimation des coefficients de transfert de solutés en osmose inverse : vers un dimensionnement des procédés multi-étagés pour le recyclage d'effluents dans les agro-industries

Claire Fargues

H. Romdhana, R. Millot, J. Miniou, S. Zemmouri, V. Athès, L. Residant, E. Levrien, S. Rasasegaram, K. Ferhat
UMR SayFood, INRAE– AgroParisTech– Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

N. Leconte, F. Garnier-Lambrouin, G. Gesan-Guiziu
UMR STLO, INRAE – Institut Agro, Rennes, France

- **Minimisation des consommations d’eau dans les IAA + assouplissement des conditions de Reuse des effluents**
Décrets janv. et juillet 2024 ouvrent de nouvelles perspectives aux industriels des IAA
=> Besoin de connaissances sur les performances de traitement et d’optimisation du dimensionnement

- **Remise à plat des règles de conception des architectures multi-étagées**

Reconsidérer

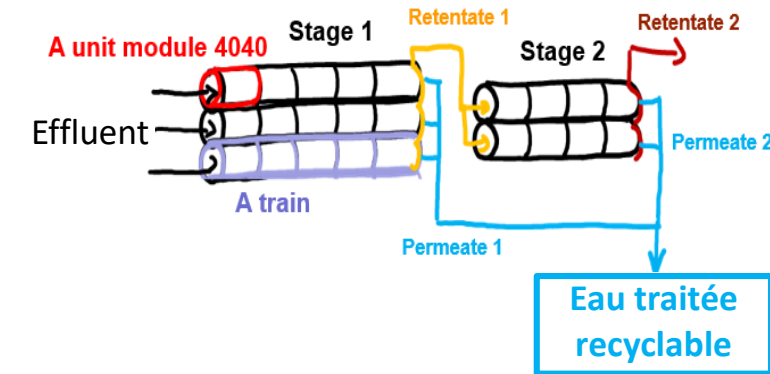
- Répartition Smb par étage et par train
- Influence de l’hydraulique et PTM / étage



Optimisation multi-objectifs

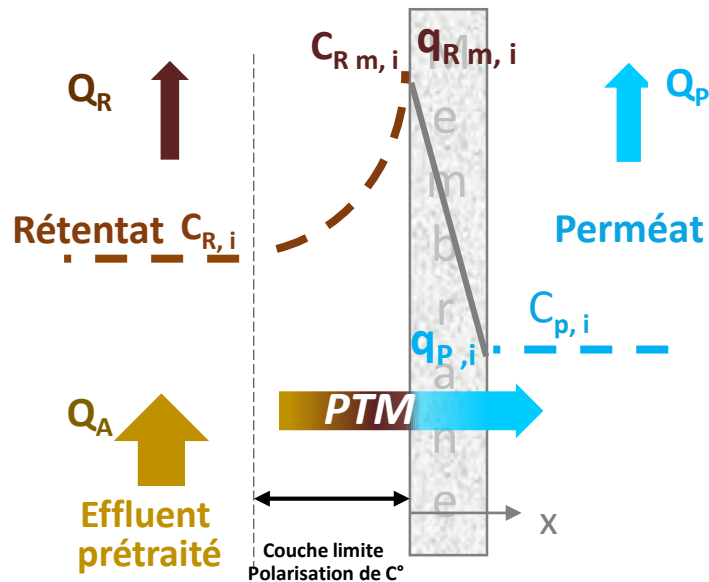
- Qualité/quantité d’eau
- Coût et consommation énergétique
- Impact environnemental

Installation d’osmose inverse



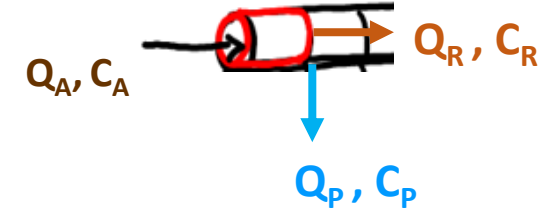
- **Cas d’étude : traitement par osmose inverse des effluents « rinçage après pelage » de carottes**
(Usine en Bretagne) - Concentration : 2 g/L < DCO < 10 g/L

➤ Modèle de solubilisation-diffusion (SD) avec polarisation de concentration (PC)



- Eau $J_P = A \times [PTM_{eff} - \Delta\pi]$ (L/h.m² ou m/s)
- Soluté i $J_i = B_i \times [C_{r m,i} - C_{p,i}]$ (mol/L.h.m² ou mol/s.m²)
- PC $C_{r m,i} = C_{p,i} + [C_{r,i} - C_{p,i}] \times \exp J_P/k_i$ (mol/L)

PTM : Pression TransMembranaire (Pa)
 $\Delta\pi$: Différence de pressions osmotiques (Pa)



➤ Outil de simulation : système d'équations différentielles résolu sous Python (solveur BDF)

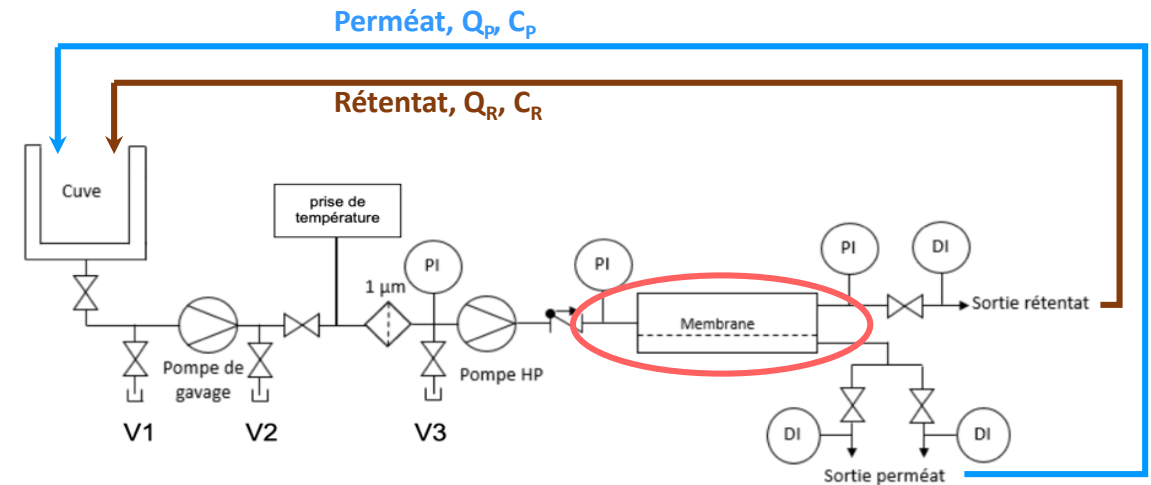
- Analyse de sensibilité sur les paramètres du modèle (analyse Monte Carlo)
- Ajuster les paramètres sur les expériences à l'échelle pilote - Perméabilité au soluté clef i, B_i
À FRV 1 mais aussi lors de l'augmentation du FRV - Coefficient de transfert dans la couche limite, k_i
- Brique pour prédire les résultats de différentes architectures de modules sur cas d'études industriel

Effluent rinçage après pelage de carottes
Prétraitement par UF 15kDa

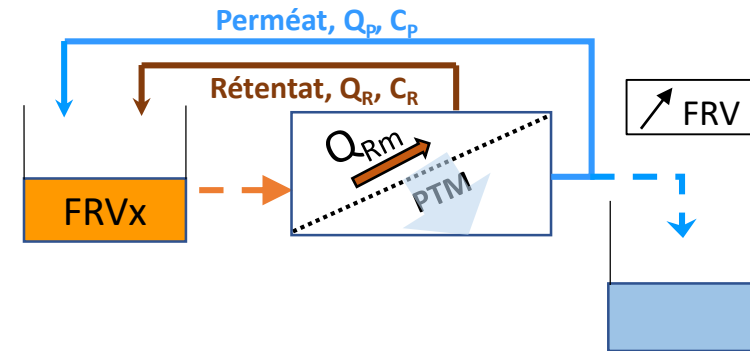


- 1 Q_{Rm} , 1 concentration (FRV = 1)
- 6 valeurs de PTM par Q_{Rm}** → $A, B_i,$ et k_i
(2 à 12 bar)
- 12 valeurs de Q_{Rm}** → Loi $k_i = f(u)$?
(0,2 à 1,1 m³/h)

Echelle pilote Module spiralé ESPA4 LD- 2540 ; S = 1,86 m²



- 1 Q_{Rm} , 1 PTM, ↗ concentration (↗ FRV)
- 7 niveaux de concentration**
(FC 1 à 20)
- 2 valeurs de PTM** → Rôle colmatage
(5 et 10 bar)
- 3 valeurs de Q_{Rm}**
(0,28; 0,53; 0,89 m³/h)



Analyses des Alimentation/Rétentat/Perméat :
Conductivité, pH
Turbidité, couleur, DCO
HPLC et HPIC => **Sucres, acides organiques, autres...**

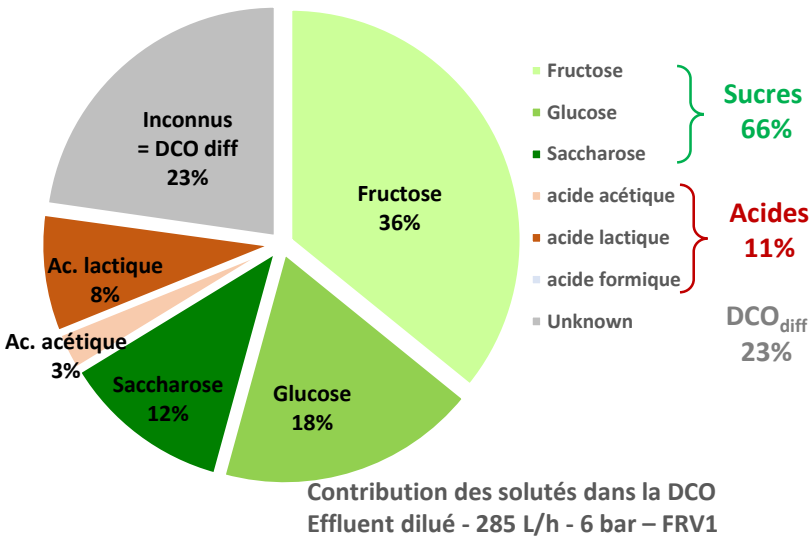


➤ Composition et variabilité des effluents prétraités par UF

2 lots étudiés

« Dilué »
10/2023

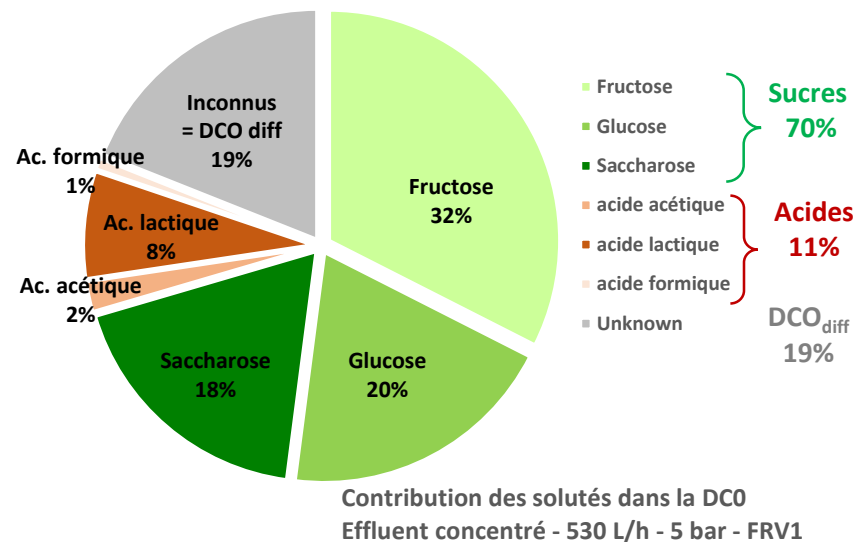
DCO = 1230 - 1500 mg/L
pH = 5,4
Conductivité = 0,45 – 0,55 mS/cm



« Concentré »
03/2024

DCO = 5500 - 6100 mg/L
pH = 4,4
Conductivité = 1,26 – 1,60 mS/cm

x 4,5 plus concentré



➔ Variabilité de la concentration
➔ Stabilité de la composition

➤ Détermination de la perméabilité à l'eau, A

$$J_P = A \times [PTM - \Delta\pi]$$

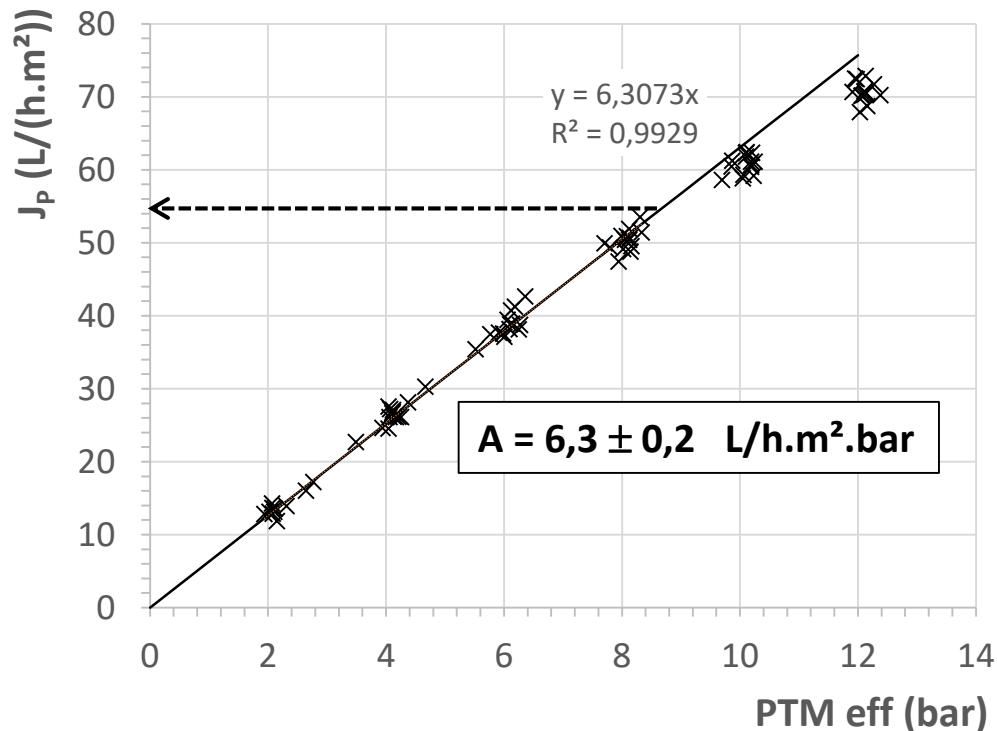
Estimation de $\Delta\pi$:

comparaison $\pi_R, \pi_P, \Delta\pi$ mesurés \leftrightarrow $\pi_R, \pi_P, \Delta\pi$ calculés (Van't Hoff)

➔ Attribution de Masse Molaire : $M_{DCO} = 140 \text{ g/mol}$

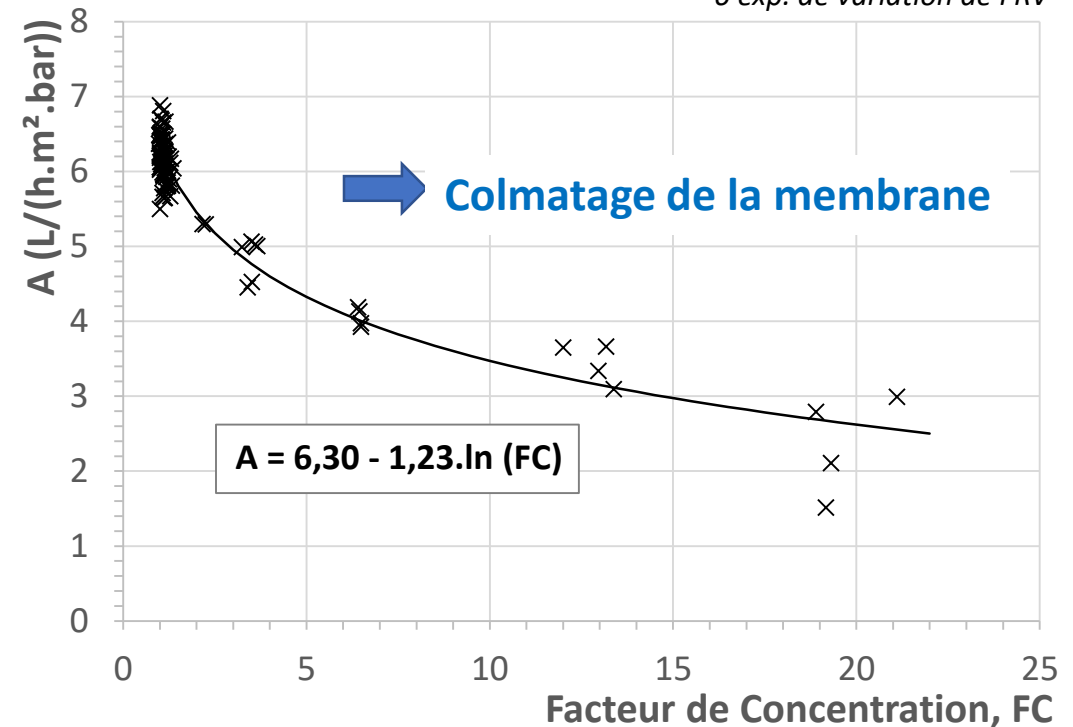
$M_{DCO \text{ diff}} = 80 \text{ g/mol}$

Perméabilité à l'effluent lot "dilué" – FRV1

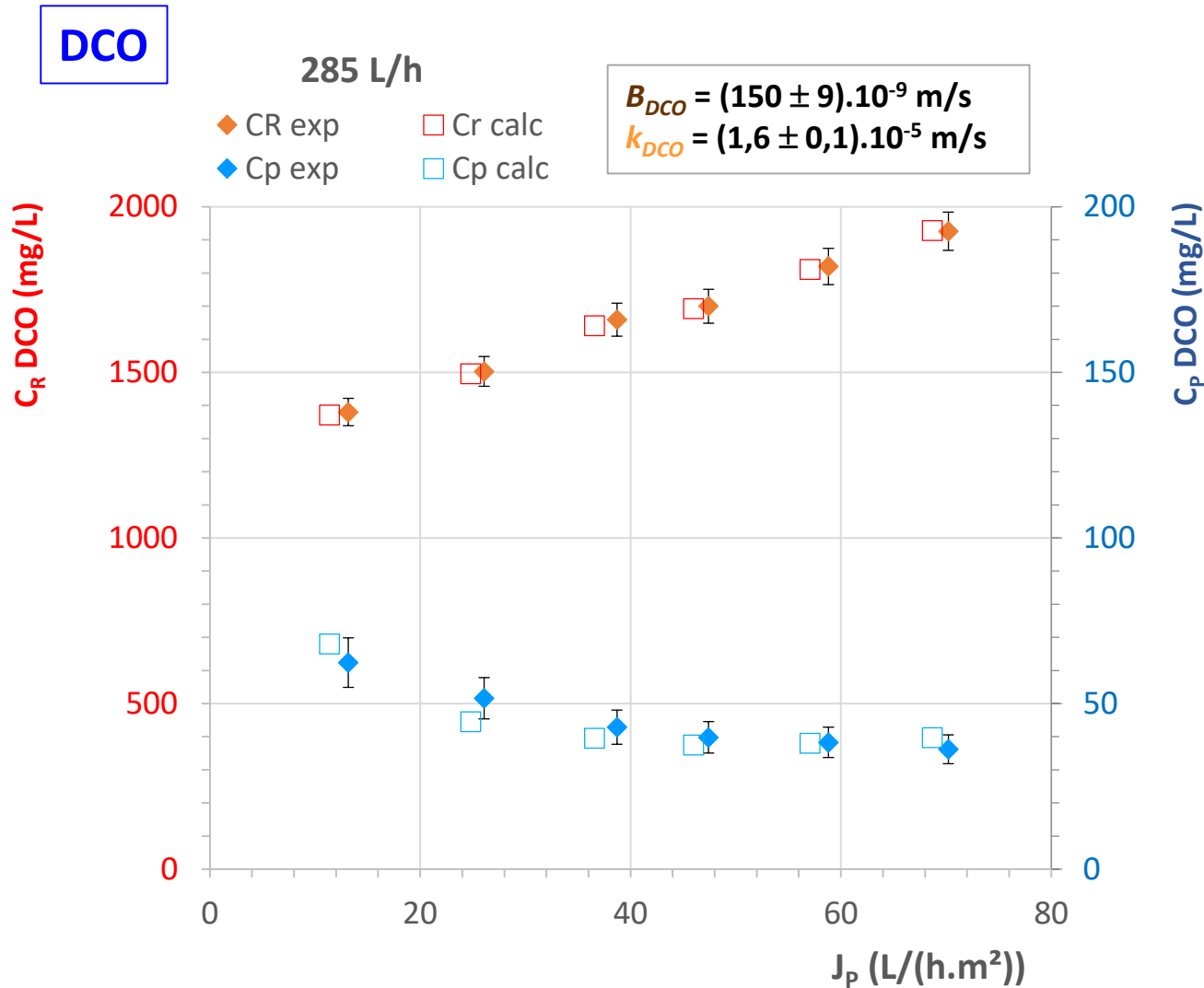


Influence du facteur de concentration FC sur A

Evolution de A - Tous essais confondus 12 exp. de variation de Q_{Rm} à FRV1
6 exp. de variation de FRV



➤ Ajustement des paramètres sur les concentrations dans le rétentat et le perméat (Effluent « dilué » - FRV 1)



Bonne adéquation entre C_R et C_p calculés et exp^{taux} quelle que soit la PTM

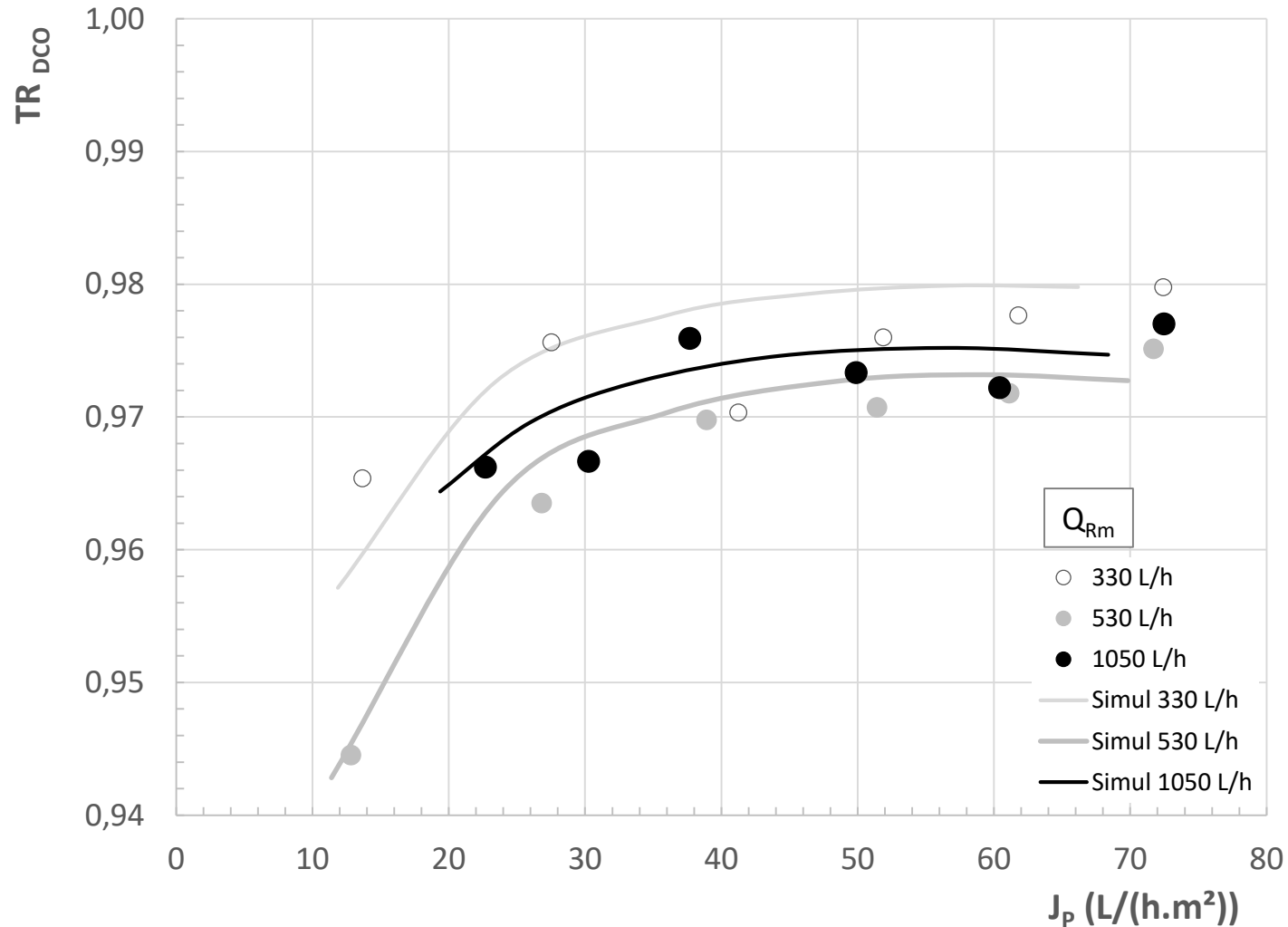
Pour $240 < Q_{Rm} < 1100 \text{ L/h}$

$B_{DCO} = (160 \pm 30) \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$
 $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} < k_{DCO} < 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

➤ Rôle du débit sur les taux de rétention (Effluent « dilué » - FRV 1)

Taux de rétention $TR = \frac{C_R - C_P}{C_R}$

DCO



94,5% < TR_{DCO} < 98%

Bonne adéquation TR calc et exp.



Influence de Q_{Rm} non visible sur C_{P DCO}, C_{R DCO} et TR_{DCO}
Evolution de k non logique avec Q_{Rm}

➤ Rôle du débit sur les taux de rétention (Effluent « dilué » - FRV 1)

Sucres

99,8% < TR_{fructose} < 100%

99,9% < TR_{Glucose} < 100%

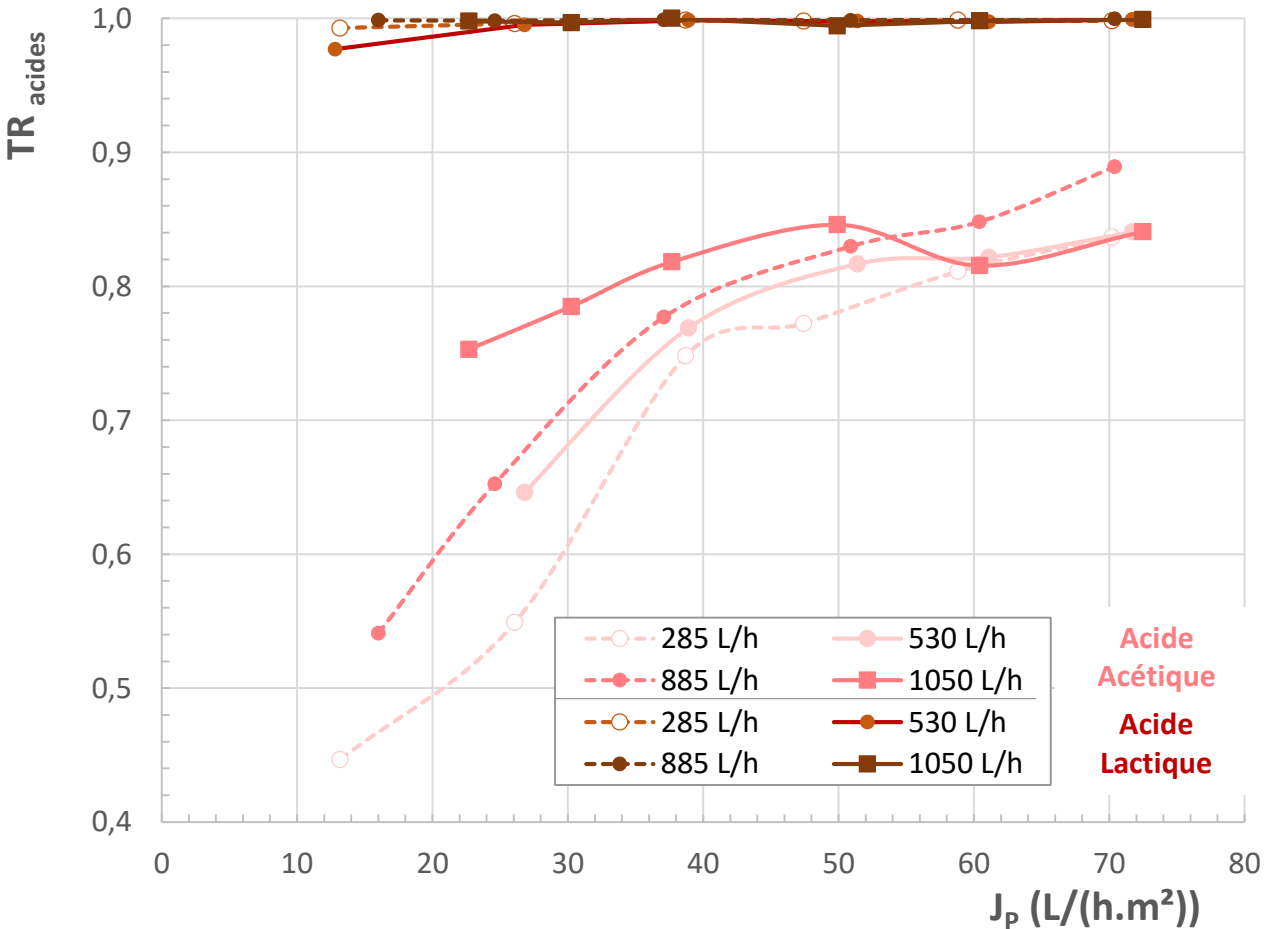
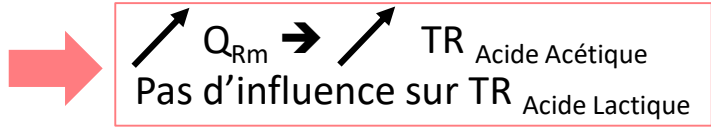
TR_{Saccharose} = 100%

Pas d'influence de Q_{Rm} sur TR ~ 100% !

Acides

98% < TR_{AL} < 100%

45% < TR_{AA} < 89%



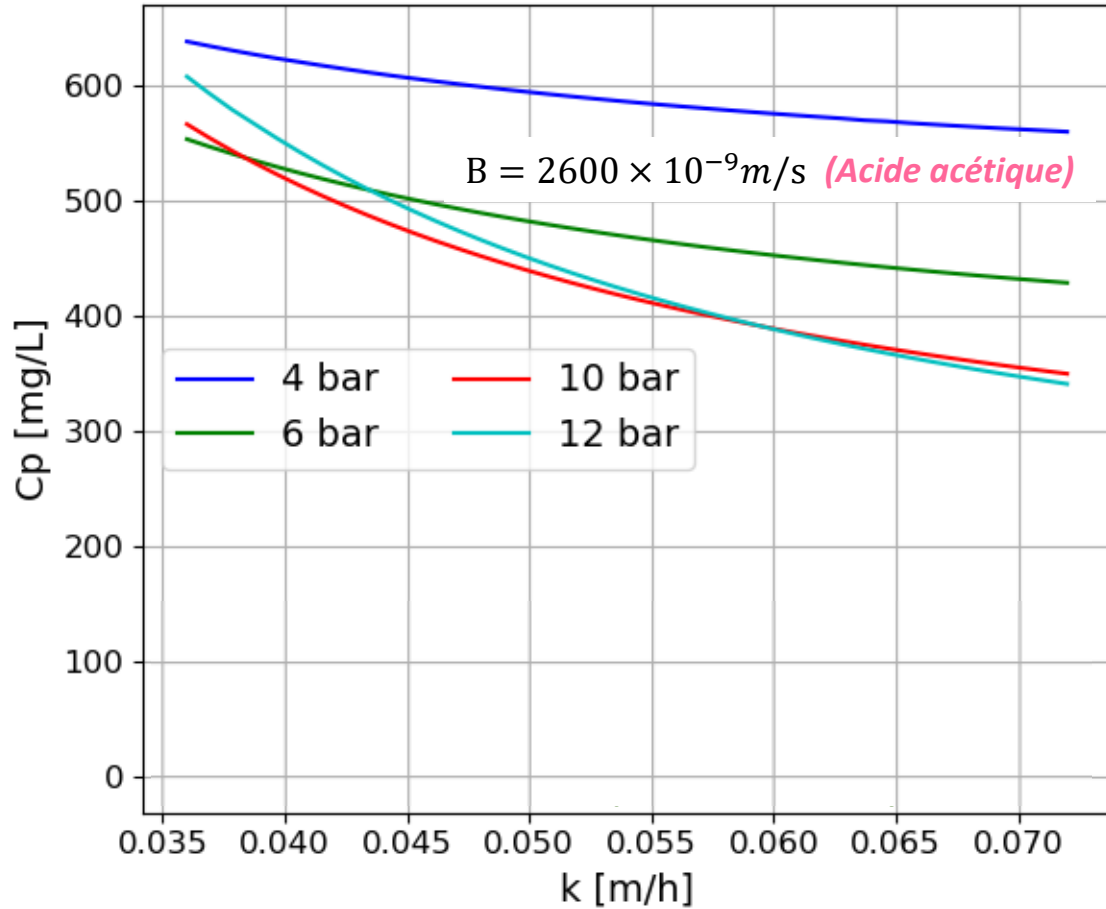
➤ Récapitulatif pour effluent « dilué » - FRV1

Solutés	DCO	Saccharose	Fructose/ glucose	Acide lactique	Acide acétique	DCO _{diff}
B_i ($\times 10^{-9}$ m s ⁻¹)	160 (± 30)	0,02 ($\pm 0,007$)	2,6 ($\pm 0,6$)	~ 10	2600 (± 1700)	600 (± 200)
k_i ($\times 10^{-5}$ m s ⁻¹)	1 - 2	0,8 – 1,7	1,2 – 4,9	0,6 - 4	0 - 16	0,7 – 1,7

➔ B_i : utilisables dans logiciel de simulation

k_i : Ordre de grandeur, mais pas d'évolution logique avec le débit Q_{Rm}

➤ Influence théorique de k_i sur qualité du perméat



Pour l'acide acétique de TR faible

Baisse du C_p quand k augmente

Plus grande influence du k sur C_p quand PTM ↗

Pour les solutés bien retenus (TR > 90%) :

Faible influence du k_i sur C_p



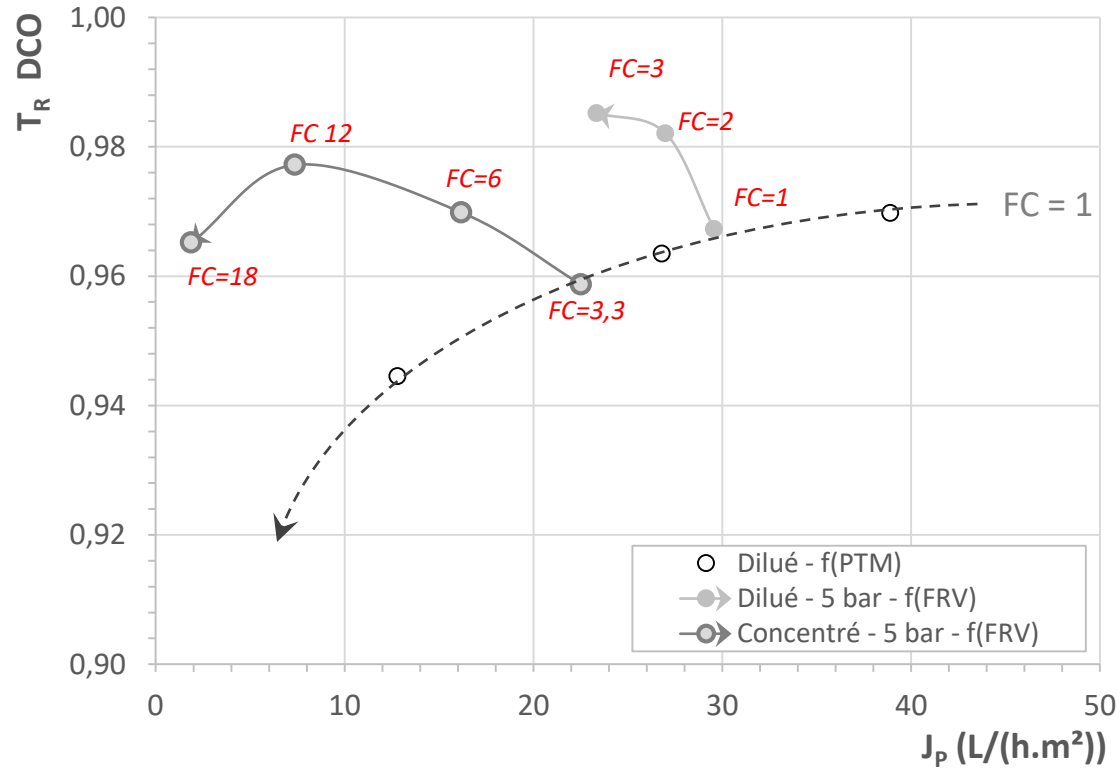
Difficulté expérimentale à mettre en évidence et à quantifier l'influence de k_i sur TR et la qualité de perméat

↘ Résistance au transfert dans la couche limite

➤ Sur les taux de rétention (FC : 1 => 18)

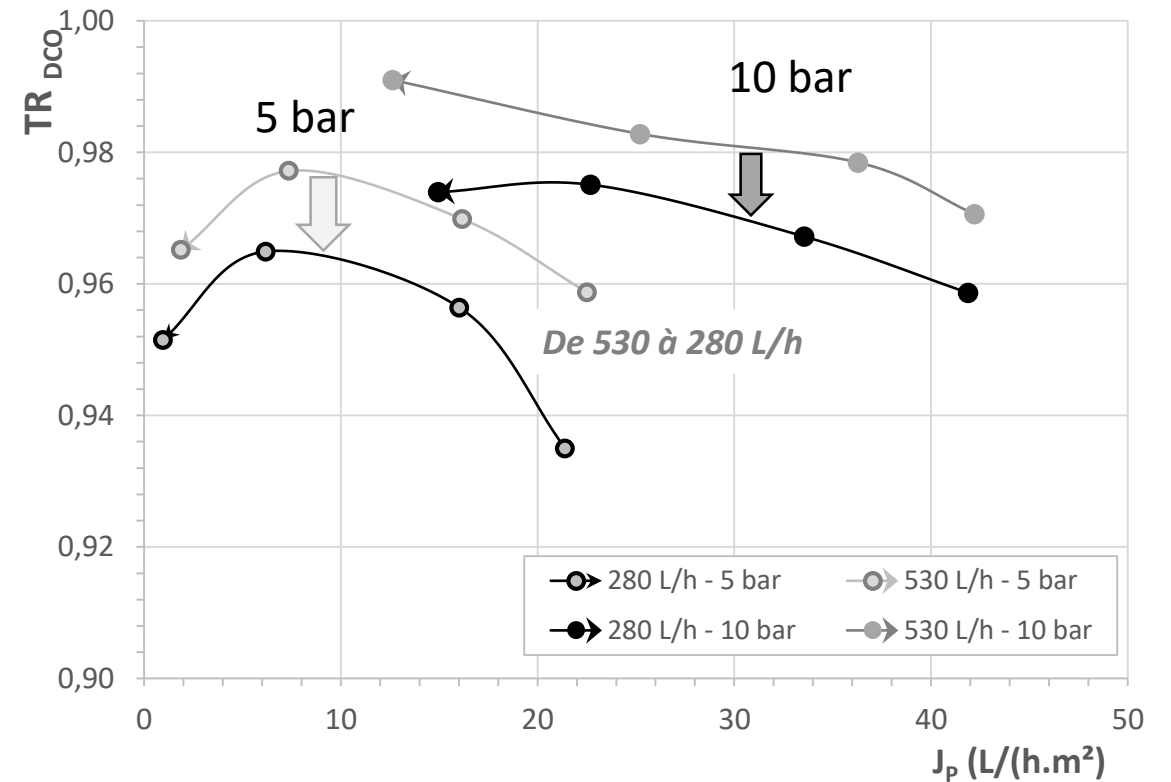
DCO

530 L/h - Influence de la concentration sur T_R DCO



➔ TR_{DCO} ↗ avec FC : Effet du colmatage

Effluent concentré - Influences FRV, Q_{Rm} , PTM

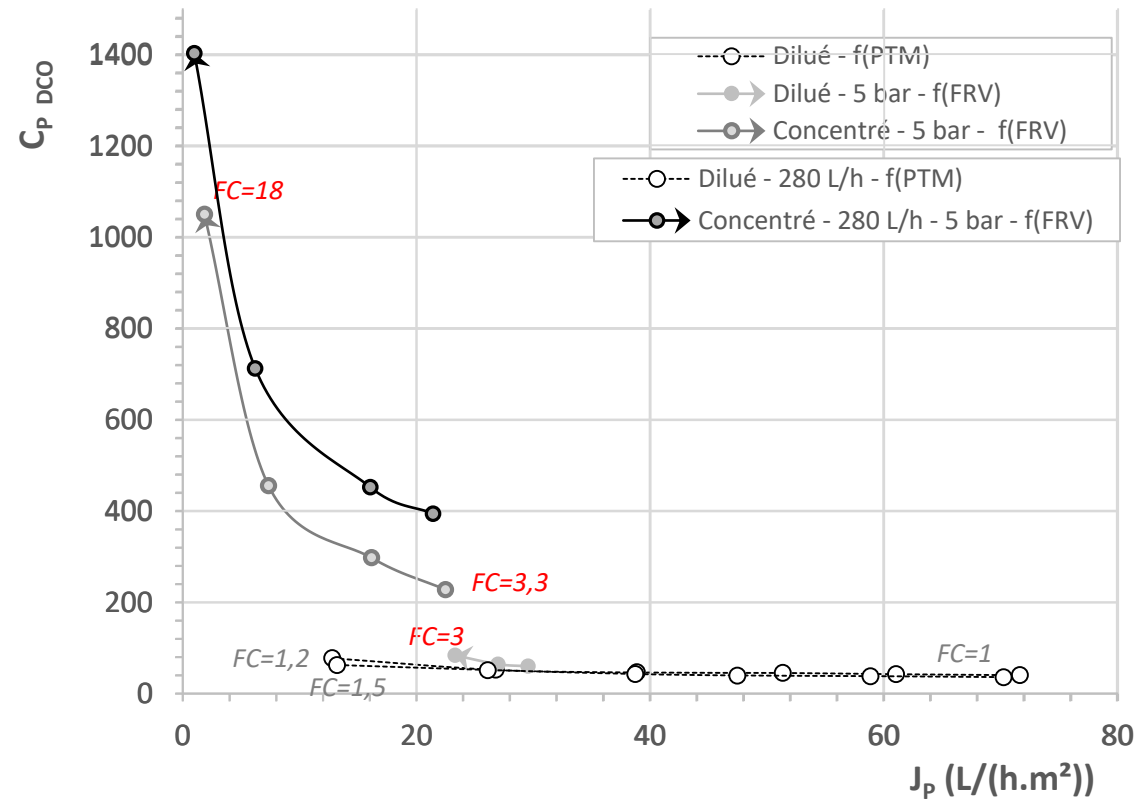


➔ à PTM donnée : TR_{DCO} ↘ quand Q_{Rm} ↘

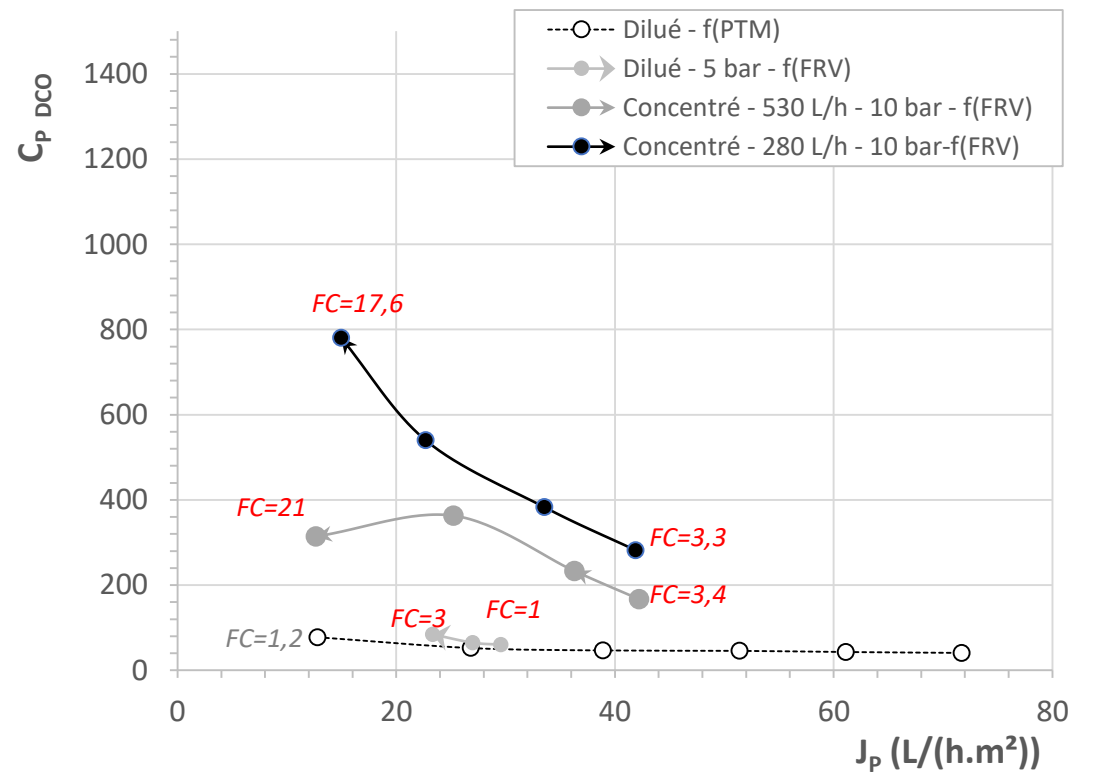
➤ Sur la qualité du perméat (FC : 1 => 18)

DCO

530 L/h - Influence de la concentration sur C_{P_DCO}



280 L/h - Influence de la concentration sur C_{P_DCO}



➔ Même si TR ↗ avec FC, qualité du perméat se dégrade : quand C_A ↗, quand FC ↗, quand Q_{Rm} ↘

- Estimation de A par évaluation de $\Delta\pi$ + obtention d'une loi $A = f(FC)$
- Estimation de B et k pour FRV 1 → prédiction des concentrations des solutés dans le perméat
- **Ajustements encore en cours pour estimer l'influence de FC sur B et k.**
- **Outil de simulation pour tester différentes options d'architecture des modules dans un outil d'optimisation multi-objectifs:**
 - Variabilité de l'effluent → différents scénarios de recyclage, de taux de conversion limite
 - modularité du traitement ?



Merci pour votre attention