



HAL
open science

Dimensionnement et optimisation du fonctionnement d'un système de filtration-fractionnement multi-étagé continu : exemple de la microfiltration de lait

Geneviève Gésan-Guiziou, Maksym Loginov, Juliette Cany, Mariana Brause Correa, Nadine Leconte, Fabienne Garnier-Lambrouin, Ibra Sall, Claire Fargues, Hedi Romdhana, Violaine Athes-Dutour

► To cite this version:

Geneviève Gésan-Guiziou, Maksym Loginov, Juliette Cany, Mariana Brause Correa, Nadine Leconte, et al.. Dimensionnement et optimisation du fonctionnement d'un système de filtration-fractionnement multi-étagé continu : exemple de la microfiltration de lait. 19ème Congrès Français de Génie des Procédés (SFGP), Société Française de Génie des Procédés, Oct 2024, Deauville, France. hal-04740911

HAL Id: hal-04740911

<https://hal.inrae.fr/hal-04740911v1>

Submitted on 17 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.



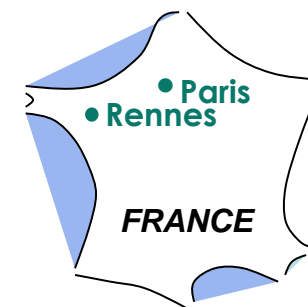
Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Dimensionnement et optimisation du fonctionnement d'un système de filtration-fractionnement multi-étagé continu : exemple de la microfiltration de lait

Geneviève Gésan-Guiziou

M. Loginov, J. Cany, M. Brause Correa, N. Leconte, F. Garnier-Lambrouin, I. Sall
UMR STLO, INRAE – Institut Agro, Rennes, France

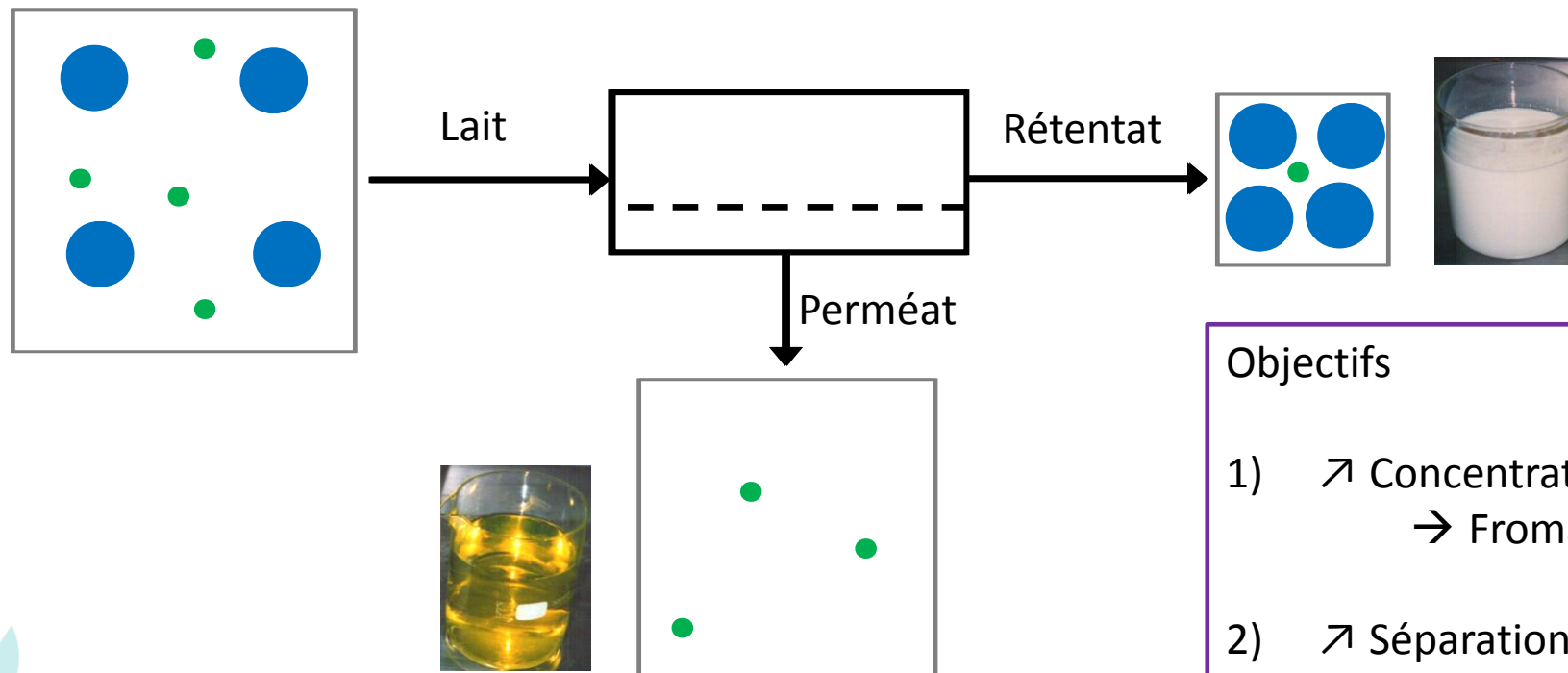
C. Fargues, H. Romdhana, V. Athès-Dutour
UMR SayFood, INRAE – AgroParisTech – Université Paris-Saclay, Palaiseau, France






Concentration-séparation: exemple de la microfiltration (0.1 μm) de lait écrémé

- Microfiltration / Ultrafiltration dans le secteur alimentaire → concentration et séparation de colloïdes
- Exemple: MF 0.1 μm de lait écrémé: Concentration des micelles de caséines et séparation des protéines de lactosérum

Micelles de caséines CM ● $\approx 150 \text{ nm}$ Protéines de lactosérum SP ● $\approx 5 \text{ nm}$

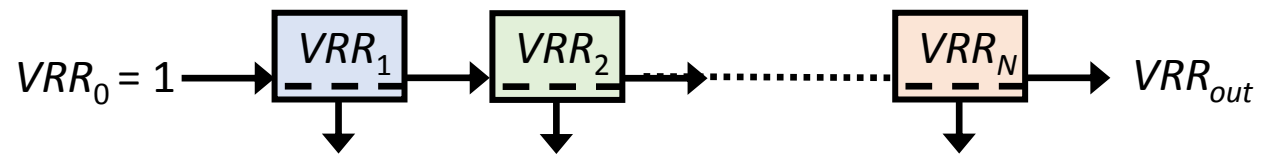
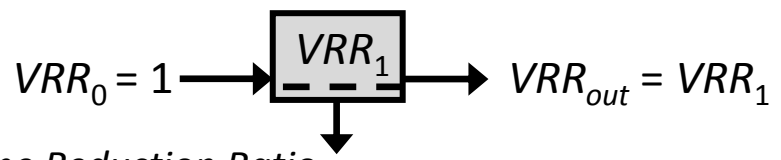
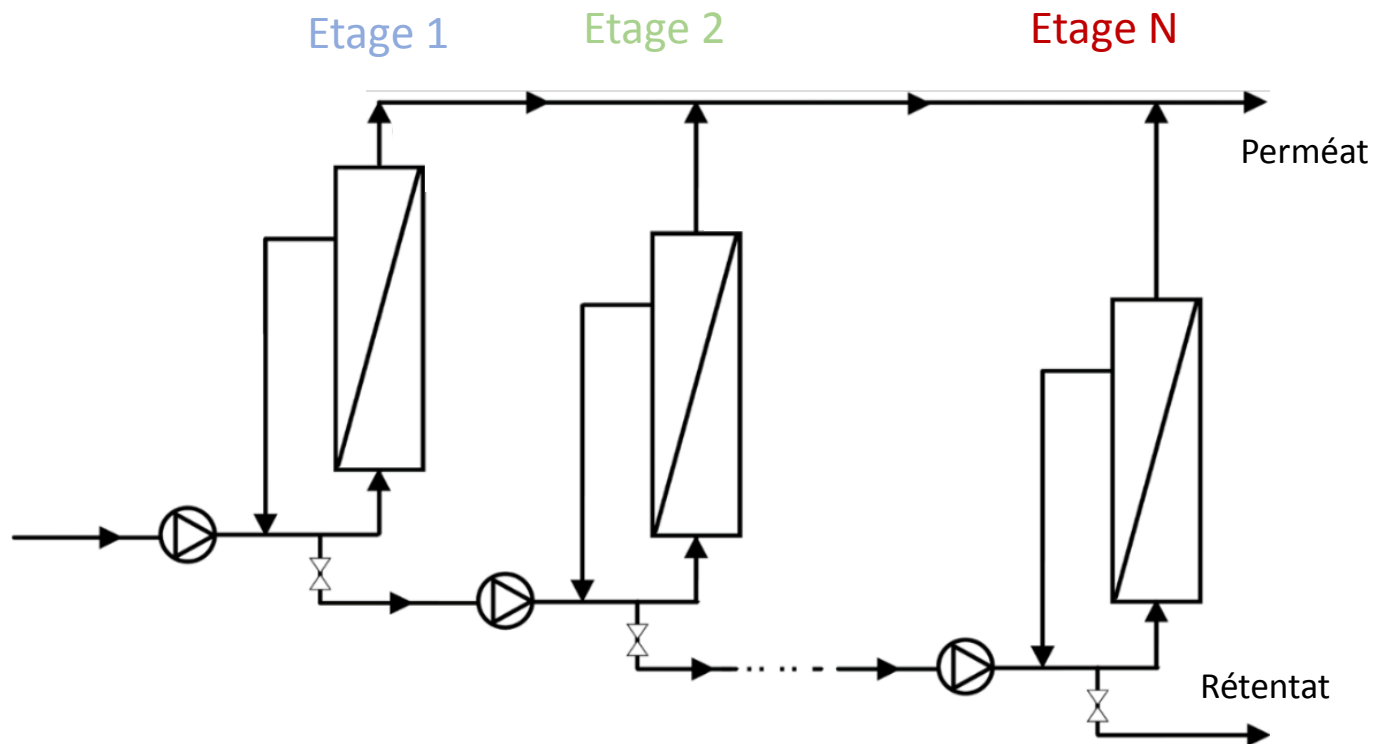
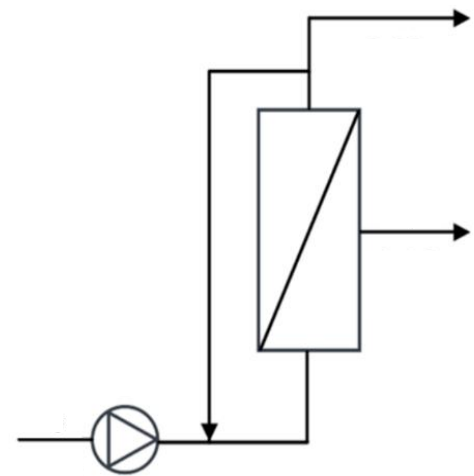


Objectifs

- 1) ↗ Concentration en CM (haut VRR)
→ Fromages 
- 2) ↗ Séparation des SP
→ Ingrédients  

Conception industrielle de MF et UF dans le secteur alimentaire

- Système continu
- N étages successifs



VRR : Volume Reduction Ratio

MF de lait écrémé (membrane céramique; $VRR_{out} \approx 3.5$)
 3-5 étages
 Mêmes conditions opératoires sur les étages
 Même surface membranaire sur les étages

Avantages:



- Réduction de la surface membranaire
- Réduction du temps de séjour du produit
 ↘ dénaturation; ↘ risque bactériologique

Conception de systèmes de filtration multi-étagés / Objectif

- Les règles de conception ne sont pas entièrement établies et partagées
 - La conception est réalisée par les équipementiers et repose principalement sur des données et un savoir-faire confidentiels.
- Des améliorations de conception sont encore possibles
 - La conception est basée sur des hypothèses simplificatrices
- On a besoin de formaliser les règles de conception de systèmes de filtration multi-étagés
 - Pour comparer différentes configurations
 - Pour intégrer de nouveaux objectifs d'optimisation



Proposer une méthodologie *générale* pour concevoir les systèmes de filtration multi-étagés

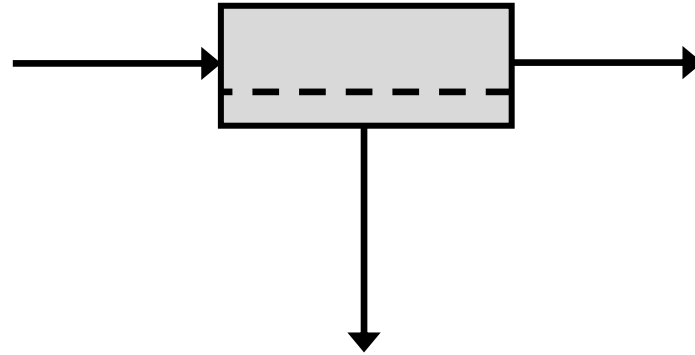
Objectif 1: Minimiser la surface membranaire pour une concentration de rétentat finale (CM) (VRR_{out})

Objectif 2: Maximiser le rendement de récupération du soluté (SP) dans le perméat

Objectif 1 : Minimiser la surface membranaire, S : Bilan matière

Débit alimentation Q_{in}
Concentration entrée $[CM]_{in}$

 $VRR_{in} = 1$



Débit rétentat sortie Q_{out}
Concentration rétentat sortie $[CM]_{out}$

Facteur de réduction volumique VRR
 $VRR_{out} \equiv Q_{in}/Q_{out} = [CM]_{out}/[CM]_{in}$

Concentration perméat $[CM]_p = 0$ (hyp : Rétention des CM = 100%)

Débit perméat Q_p

Flux de perméat J_p

Surface membranaire S

$$S = Q_p/J_p$$

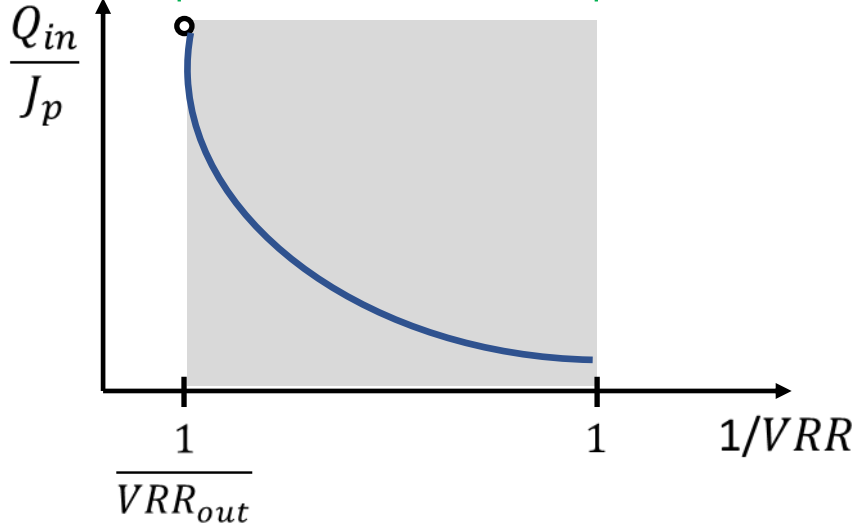
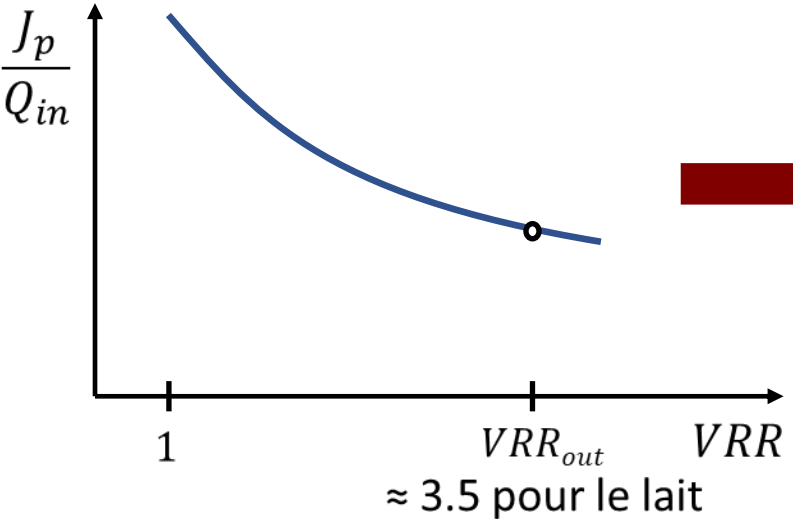
$$S = \frac{Q_{in}}{J_p} \left(\frac{1}{VRR_{in}} - \frac{1}{VRR_{out}} \right)$$

(Jeantet, Brulé, et Delaplace 2011)



Objectif 1 : Surface membranaire requise, S

$$S = \frac{Q_{in}}{J_p} \left(\frac{1}{VRR_{in}} - \frac{1}{VRR_{out}} \right)$$



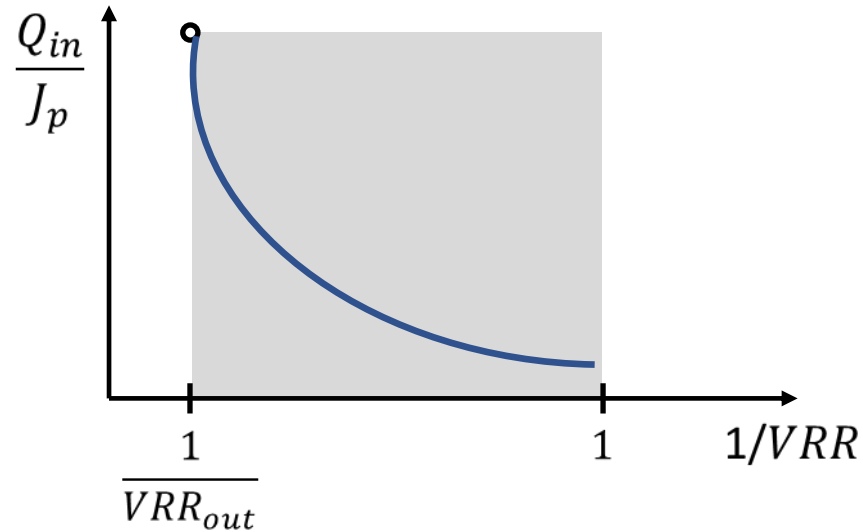
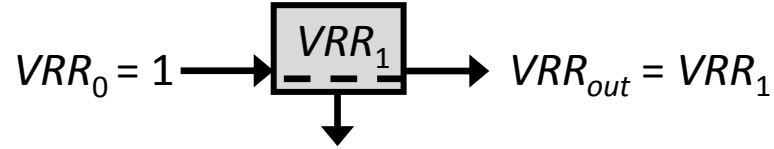
Haut VRR_{out} → faible J_p → grande S
 $S = \$!$

S = surface du rectangle grisé
 (Jeantet, Brulé, et Delaplace 2011)

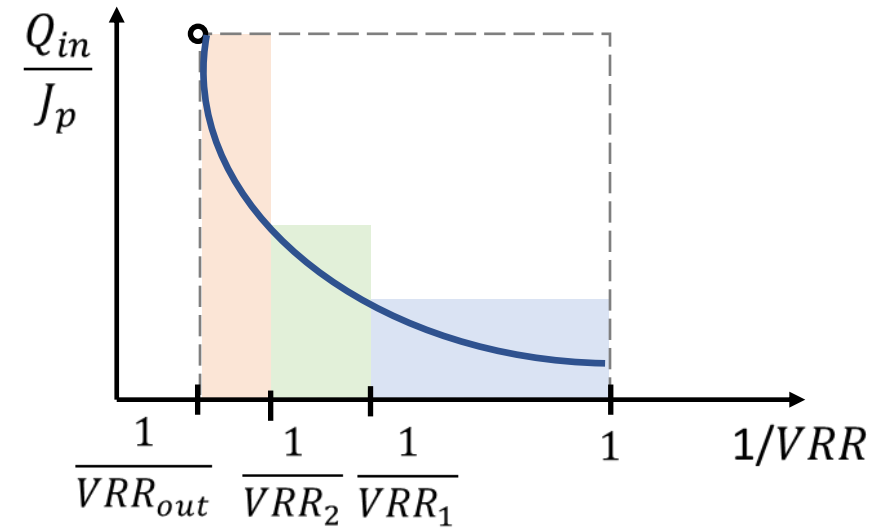
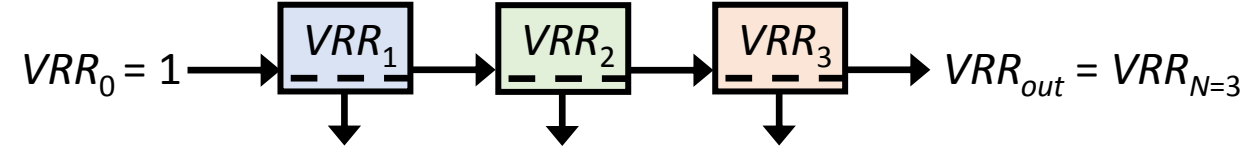


Objectif 1: Intérêt du système de filtration multi-étagé

N=1



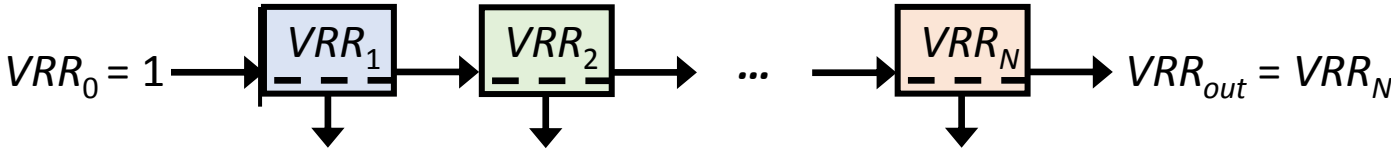
N=3



J_p diminue avec $VRR \rightarrow$ le système multi-étagé nécessite moins de surface S (S_Σ) qu'un système mono-étagé
Nombre d'étages (N) élevé \rightarrow plus faible surface membranaire requise S_Σ
Limitation par le coût des installations



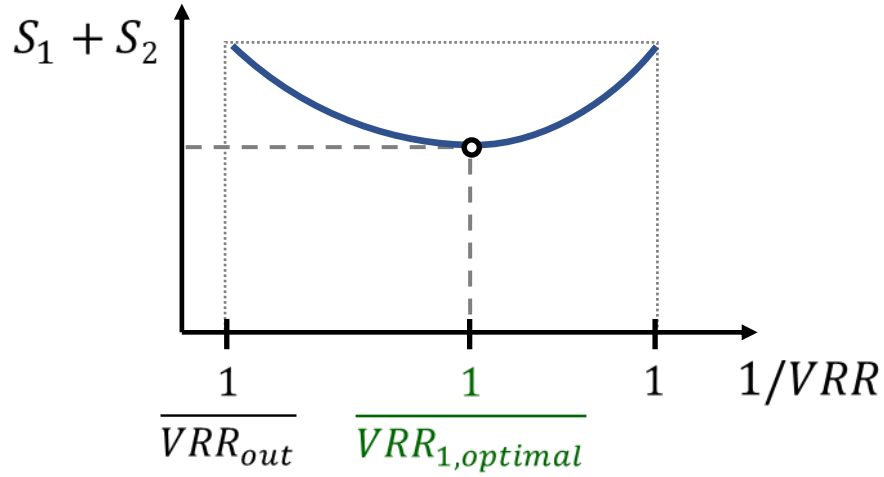
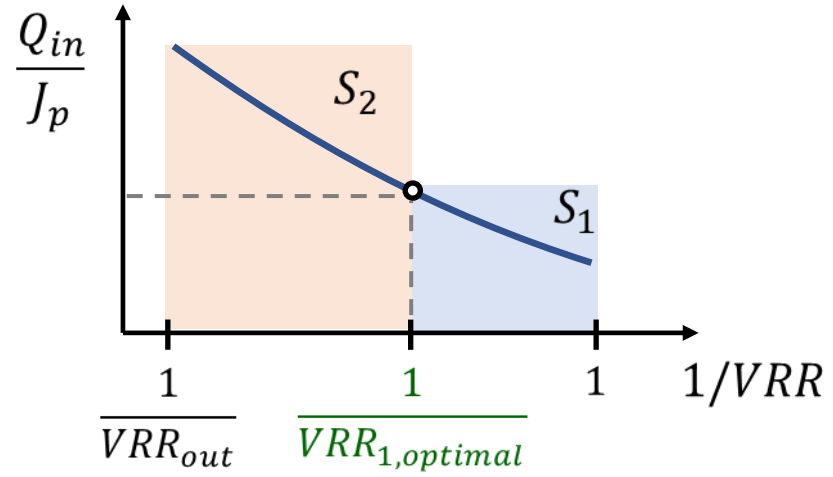
Objectif 1: Minimisation de la surface membranaire totale, S_{Σ}



$$S_{\Sigma, min} = \min_{VRR_i} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{J_{p,i}} \left(\frac{1}{VRR_{i-1}} - \frac{1}{VRR_i} \right) \right)$$

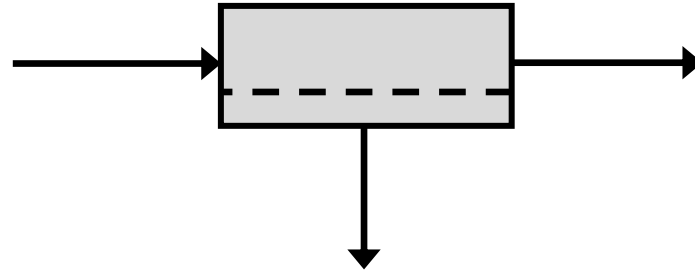
- Valeurs optimales de VRR_i ($i = 1.. N-1$) pour Q_{in} , $[CM]_{in}$ & N , VRR_{out} , connaissant $J_p = f(VRR)$;
- Valeurs de S_j ($i = 1..N$)

Illustration pour un système à 2 étages: détermination de VRR_1 optimal



Objectif 2: Maximiser le taux de récupération des protéines de lactosérum, Y

Débit alimentation Q_{in}
Concentration de SP $[SP]_{in}$



Débit rétentat Q_r
Concentration rétentat SP $[SP]_r$

Débit perméat Q_p
Concentration en SP $[SP]_p$

Transmission en SP TR

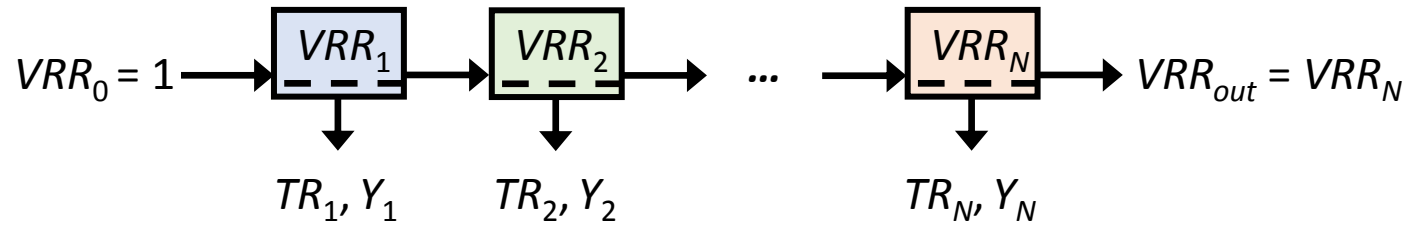
$$TR = [SP]_p / [SP]_r$$

Taux de récupération des SP dans le perméat Y

$$Y = [SP]_p Q_p / [SP]_{in} Q_{in}$$



Objectif 2: Taux de SP vs. configuration du système filtration multi-étagé: Bilan matière



Taux de récupération des SP dans le perméat, Y_{Σ}

$$Y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N Y_i \quad \text{où} \quad Y_i = \frac{1}{VRR_{i-1}} \prod_{j=0}^{i-1} b_j - \frac{1}{VRR_i} \prod_{j=0}^i b_j ;$$

$$\text{avec} \quad b_j = \frac{VRR_j}{TR_j(VRR_j - VRR_{j-1}) + VRR_{j-1}}$$

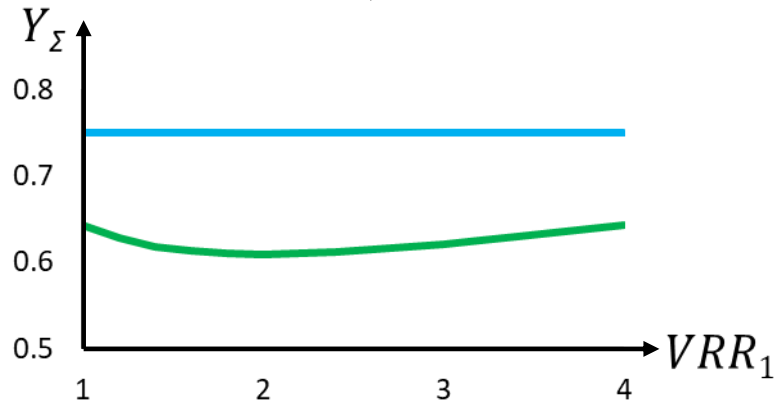
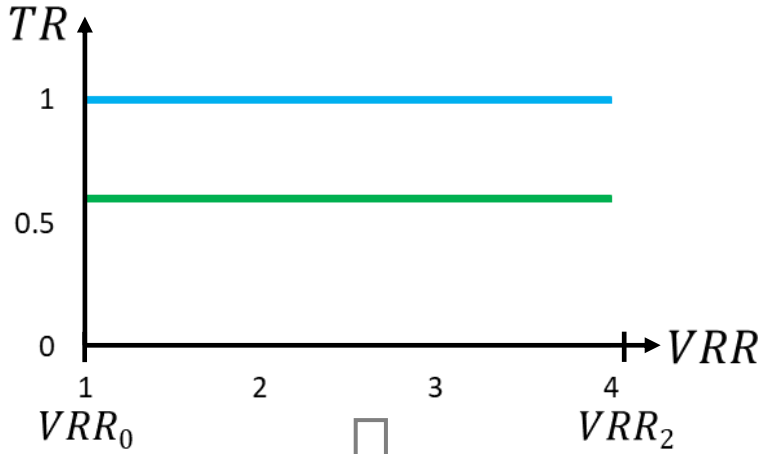
NB: (1) Y_i dépend de tous les VRR_j et de tous les TR_j ($j = 1..i$)

(2) $TR = f(VRR)$



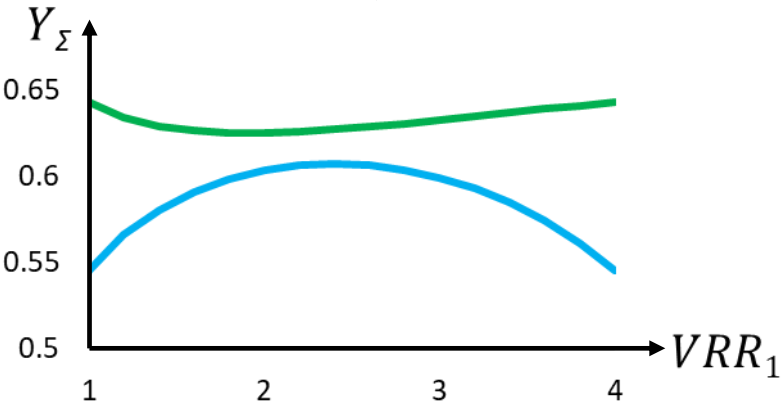
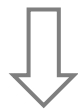
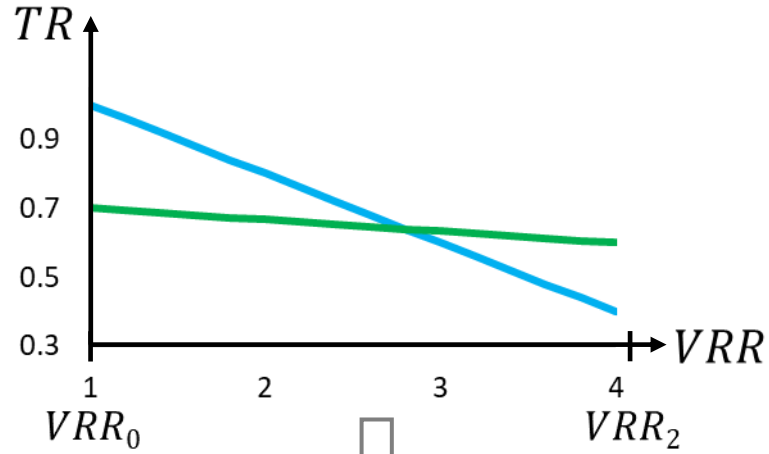
Objectif 2 : Taux de récupération total Y_{Σ} vs. $TR = f(VRR)$: Scenarios possibles (ex 2 étages)

1) TR est constant



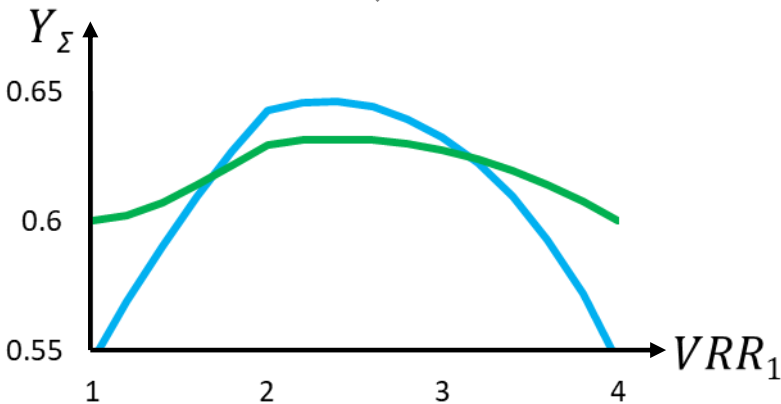
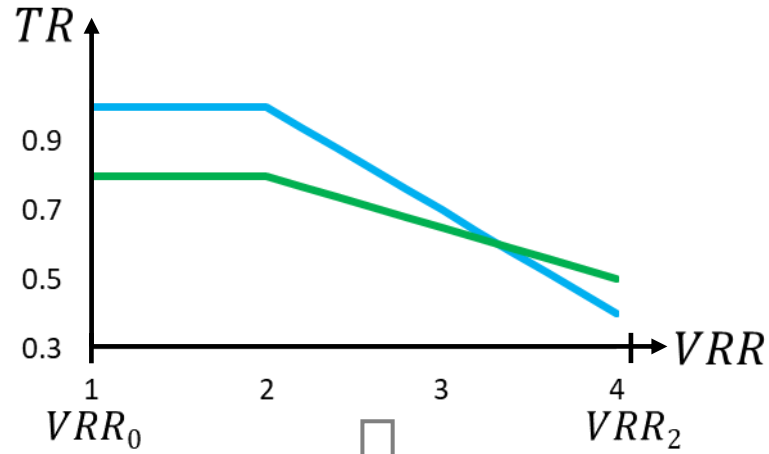
Y_{Σ} vs. VRR_1 peut passer par un minimum

2) TR décroît linéairement avec VRR



Maximum/minimum possible fort TR local \neq fort Y_{Σ}

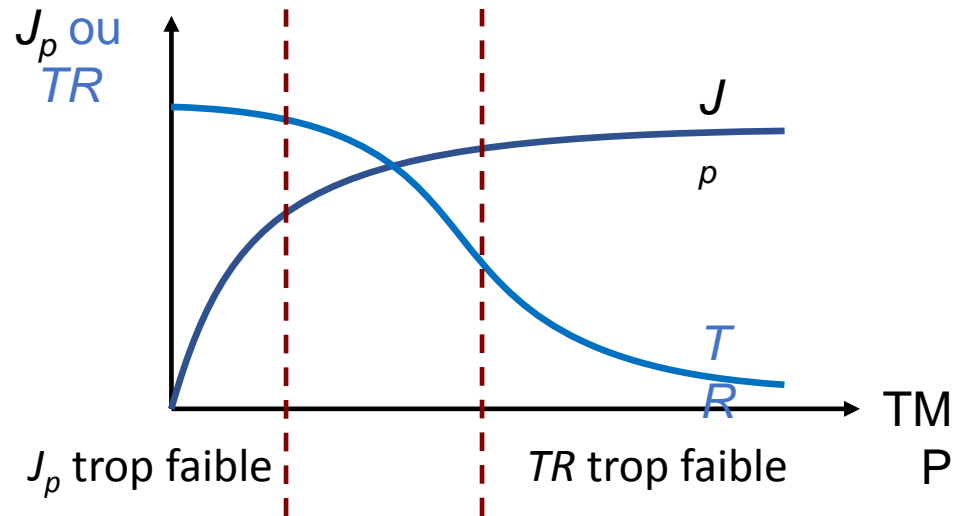
3) TR décroît à fort VRR



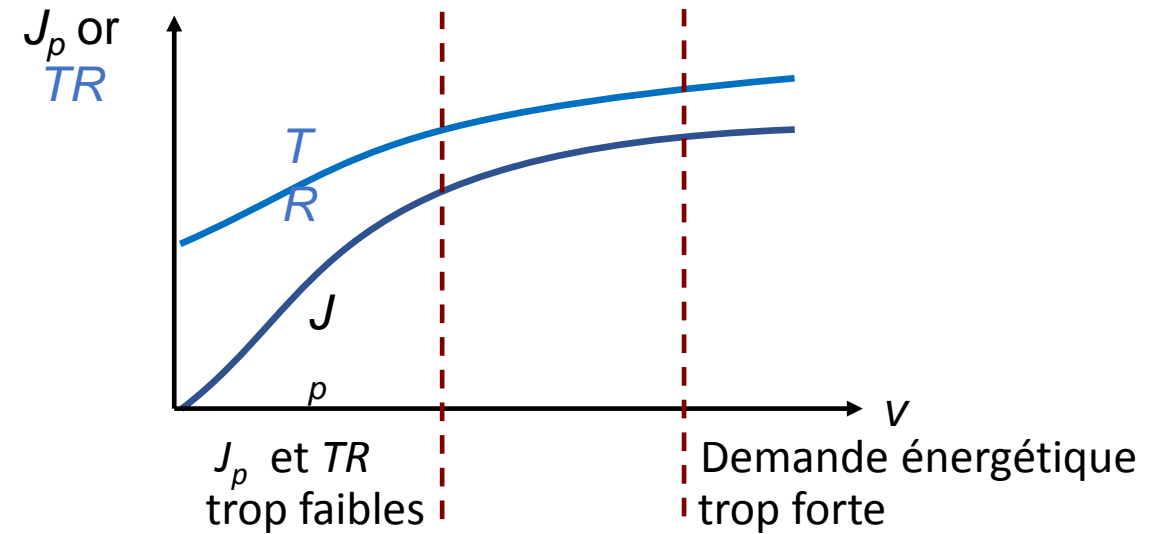
VRR_1 optimal observé au dessus du point de rupture

Quoi d'autre affecte J_p & $TR = f(VRR)$ et influence la conception ?

1) Pression transmembranaire, TMP



2) Vitesse d'écoulement tangentiel, v

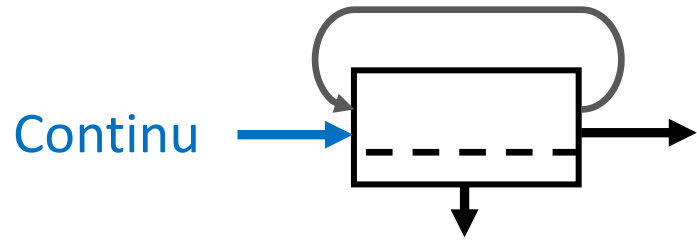


3) Concentration en SP dans les rétentats $[SP]_{r,i}$

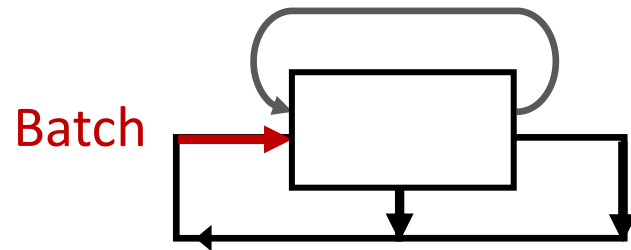
- $[SP]_{r,i}$ à VRR_i depend des $VRR_j, j = 1..i$
- Influence de $[SP]_r$ sur J_p et TR est pratiquement inconnue

- $J_p(VRR)$ et $TR(VRR)$ doivent être mesurés à différent TMP et v pour la membrane d'intérêt
- Une étude est nécessaire pour étudier l'influence de $[SP]_r$ sur J_p et TR

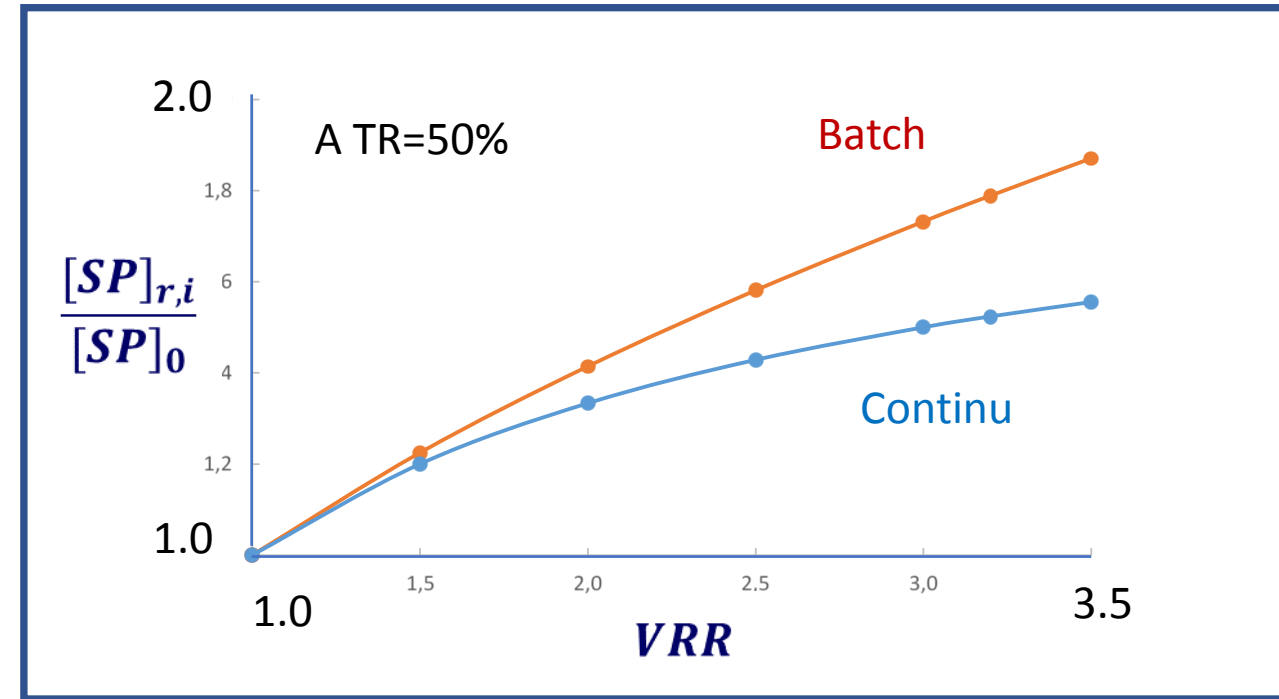
Filtration batch pour dimensionner une filtration continue ?



$$\frac{[SP]_{r,i}}{[SP]_0} = \prod_{j=0}^i \frac{VRR_j}{TR(VRR_j - VRR_{j-1}) + VRR_{j-1}}$$



$$\frac{[SP]_{r,i}}{[SP]_0} = VRR_i^{1-TR}$$



Un mode continu vs. mode batch conduit à des $[SP]_r$ différentes au même VRR

→ Potentielles différentes dépendances de J_p et TR sur VRR

Une raison supplémentaire de vérifier, si J_p et TR dépendent de $[SP]_r$

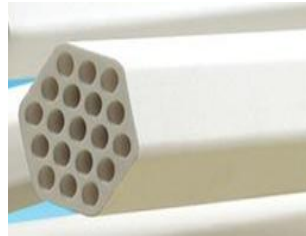


Exemple : Microfiltration de lait écrémé; Collecte de données empiriques

INRAE Plateforme Lait, STLO, Rennes

- **Microfiltration pilote** TetraLaval MFS7 équipé du système UTP (recirculation perméat)
- **Module membranaire** avec 7 membranes céramiques Pall 7P1940 GL

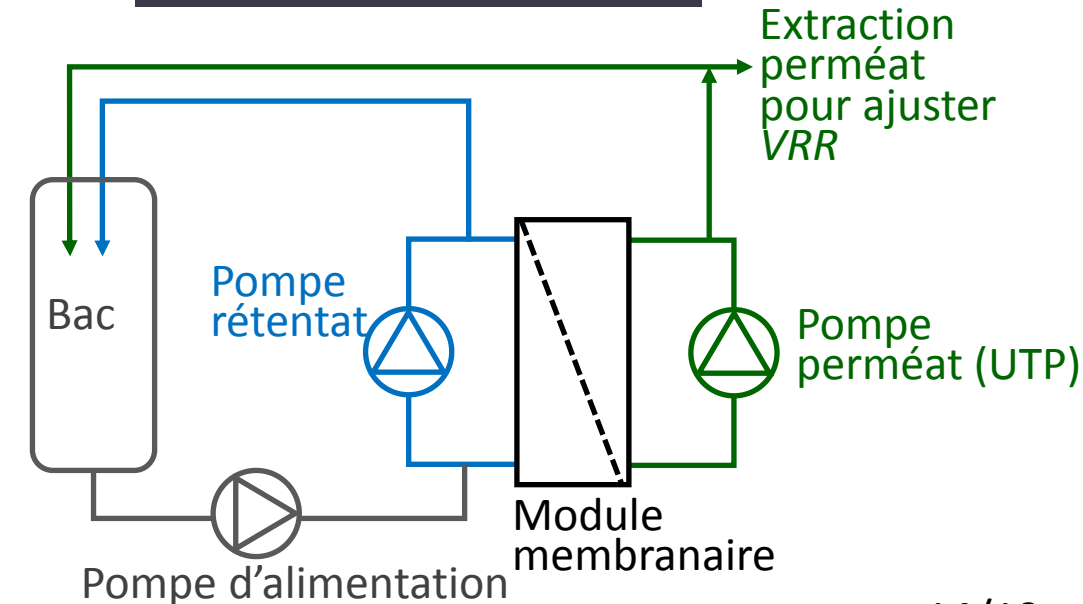
longueur	1.02 m
nombre de canaux	19
diameter canal	4 mm
surface membranaire	1.68 m ²



- **Lait** (écrémé, pasteurisé) fourni par Coralis, Cesson Sévigné (F-35)
- **Lait enrichi** avec protéines de lactosérum (+ concentré):

$$[SP]_{\text{lait enrichi}} = 2 \times [SP]_{\text{lait}}$$

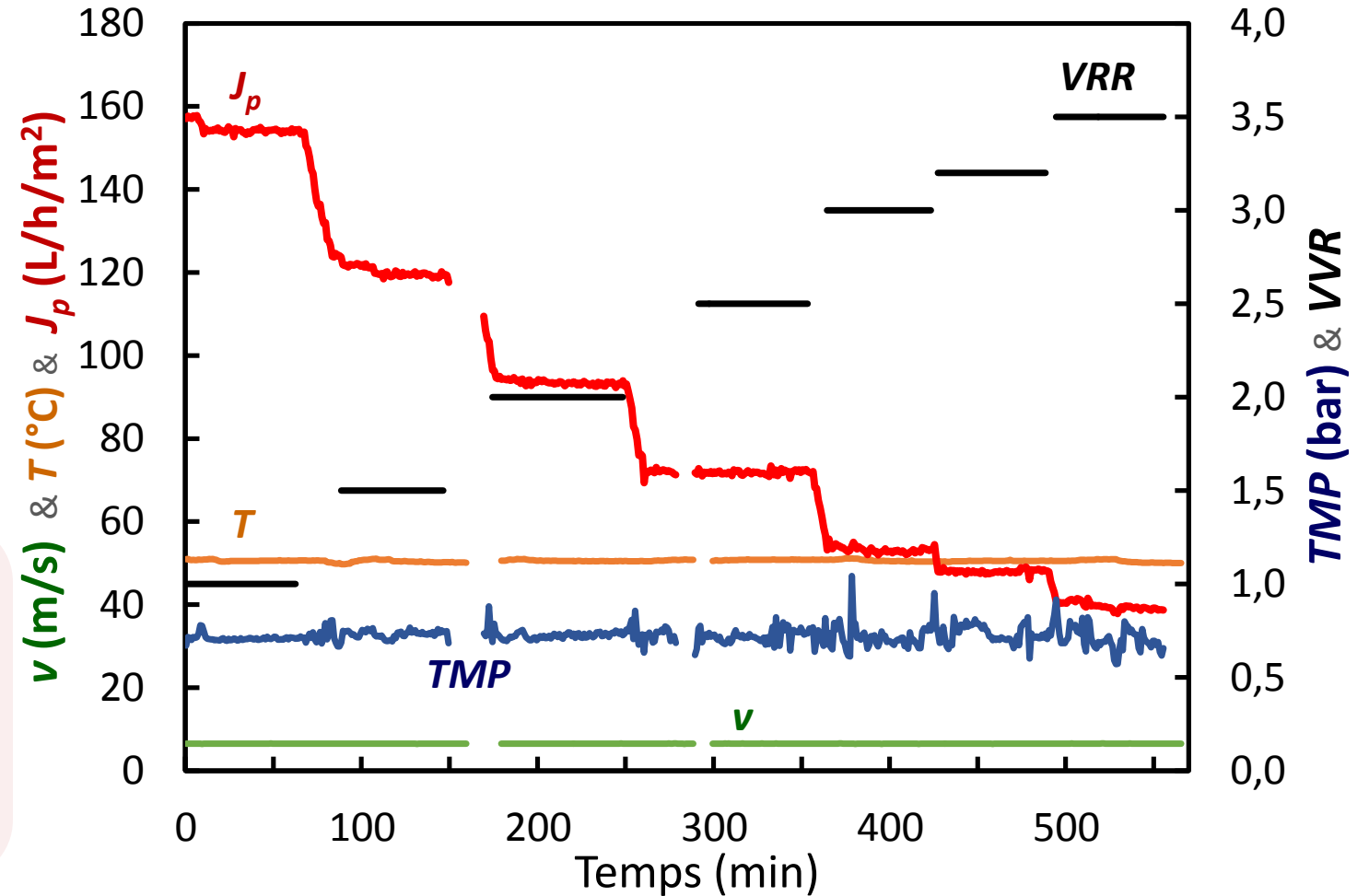
pour obtenir J_p et TR vs. VRR pour 2 valeurs de $[SP]_r$



Protocole expérimental

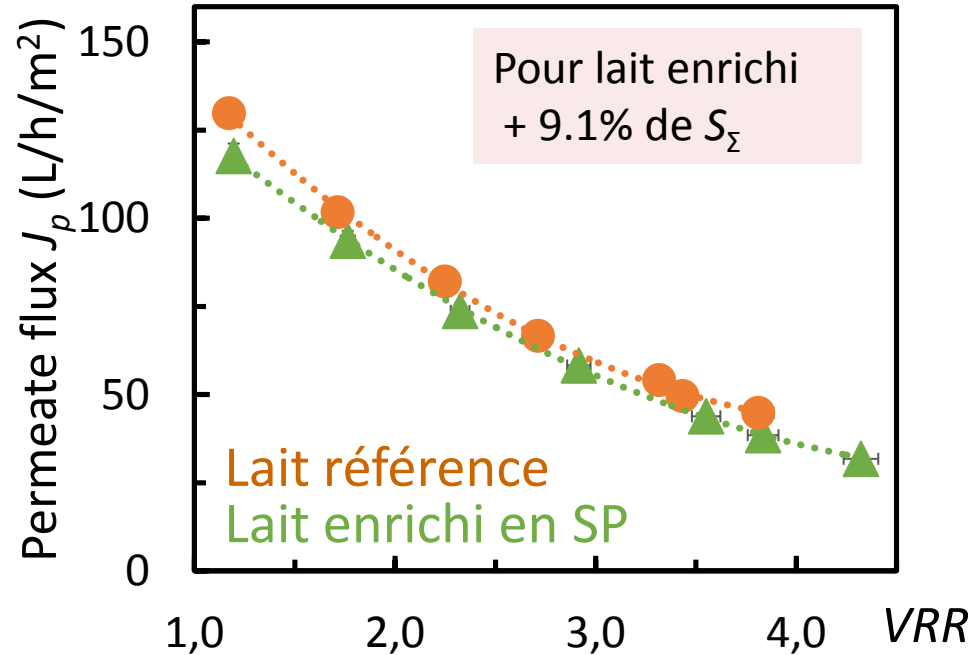
- VRR augmente étape par étape de 1 à 4.2
- Durée des étapes : 30 min (testé jusqu'à 4h)
- Experimentations avec différentes combinaisons de
 $TMP = 0.4, 0.7$ et 1.0 bar
 $v = 6.0, 6.5$ et 7.0 m/s
- Analyse de $[CN]$ et $[SP]$ dans les perméats et rétentats

- Détermination de
$$J_p = f(VRR)$$
$$[SP]_r = f(VRR)$$
$$TR = f(VRR)$$
pour le lait référence et le lait enrichi en SP

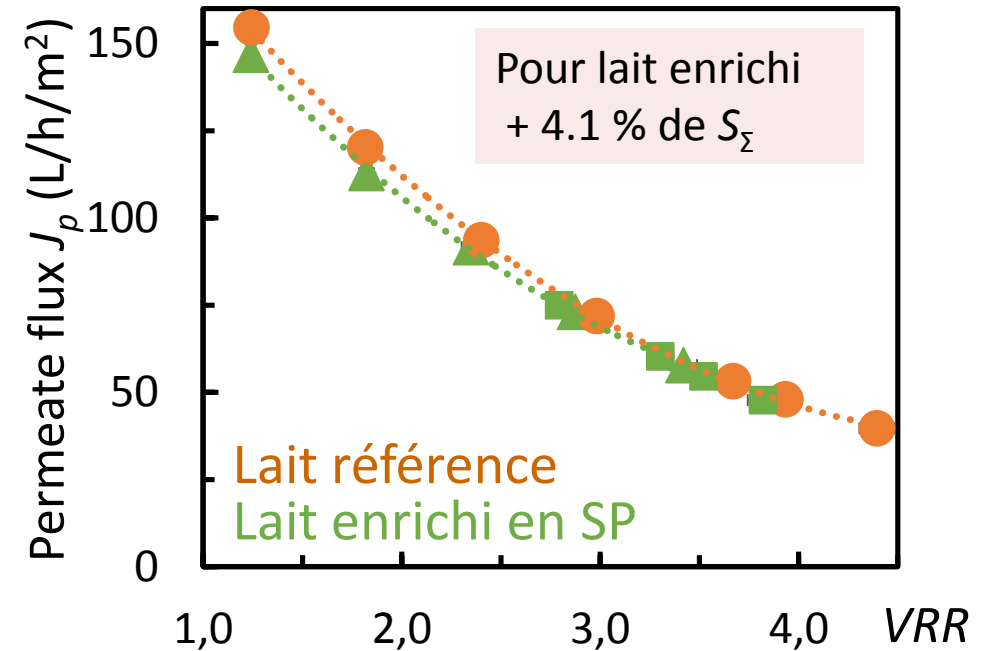


Résultats : $J_p = f(VRR)$ - Flux de perméation pour les laits référence et enrichi en SP

Faible vitesse et faible pression
 $v = 6.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $TMP = 0.4 \text{ bar}$



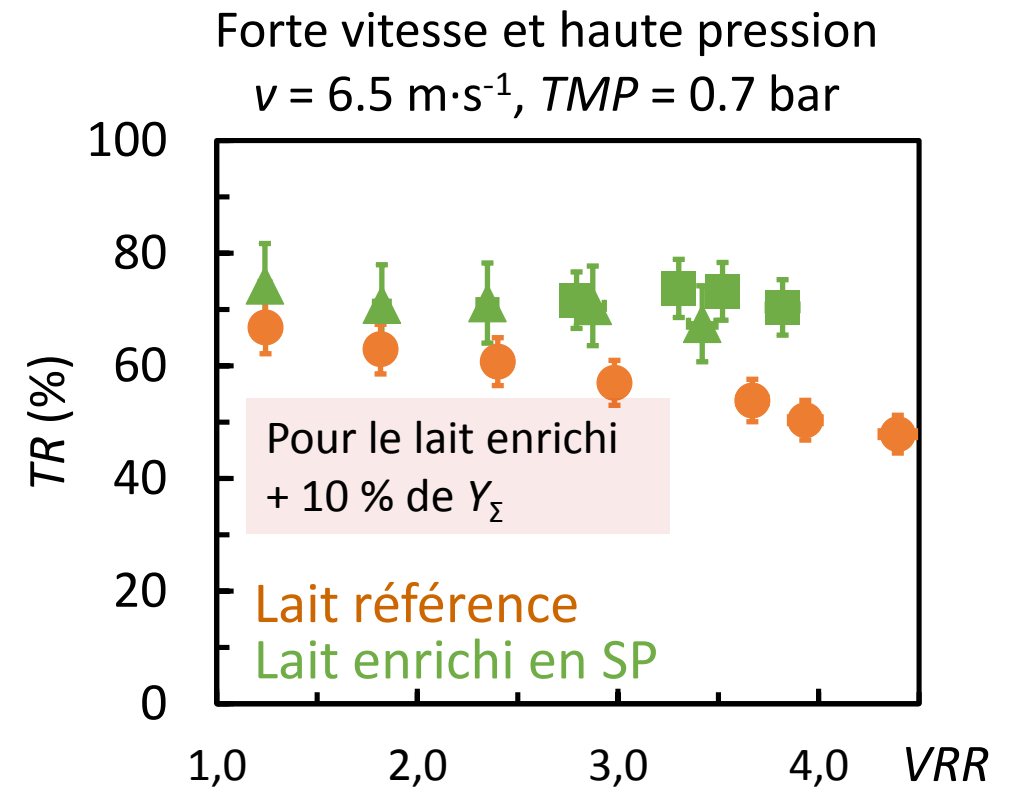
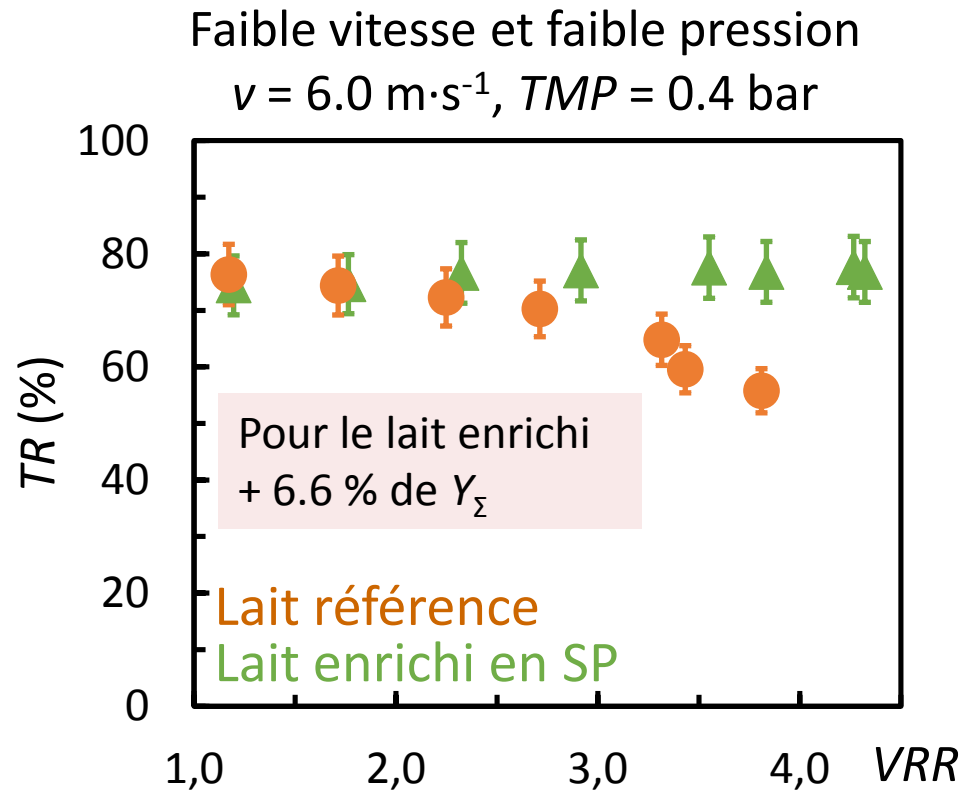
Forte vitesse et haute pression
 $v = 6.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $TMP = 0.7 \text{ bar}$



- Les augmentations de v et TMP augmentent J_p
- $J_p(VRR)$ du lait référence $>$ $J_p(VRR)$ du lait enrichi avec SP
- Pour le lait enrichi + 9.1% de S_z est nécessaire à faible vitesse / faible pression
- Et + 4.1% de S_z est nécessaire à forte vitesse et haute pression (Hyp: 3 étages, $VRR_{out}=3.5$)



Résultats: $TR=f(VRR)$ - Transmission des SP pour les laits référence et enrichi en SP



- A $VRR \leq 3.0$, $TR(VRR)$ du lait référence $\approx TR(VRR)$ du lait enrichi en SP
- A $VRR > 3.0$, $TR(VRR)$ du lait référence décroît fortement
L'augmentation de $[SP]_r$ avec VRR (lait enrichi) compense la diminution de TR (quand VRR augmente)
- TR diminue quand TMP augmente (en dépit de l'augmentation de v)
- Pour le lait enrichi + 6.6% de Y_{Σ} est obtenu à faibles vitesse et pression et + 10% de Y_{Σ} à fortes vitesse et pression.
Pour le lait référence : le gain de S_{Σ} conduit à une perte de Y_{Σ}

Résultats : conception de la MF 0.1 μm ($20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; $v = 6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $TMP = 0.7 \text{ bar}$)

$VRR_{out}=3$; 4 étages $\rightarrow Y_z = 0.512$

Numéro d'étage	S (m ²)	VRR
1	36	1,36
2	32	1,84
3	26	2,39
4	24	3,00
Total	119 (S_z)	

$VRR_{out}=3$; 4 étages identiques $\rightarrow Y_z = 0.512$

Numéro d'étage	S (m ²)	VRR
1	30	1.29
2	30	1.70
3	30	2.27
4	30	3.00
Total	119 (S_z)	

Cohérent avec conception industrielle

$VRR_{out}=3$; 3 étages $\rightarrow Y_z = 0.515$

Numéro d'étage	S (m ²)	VRR
1	54	1,51
2	40	2.20
3	34	3,00
Total	128 (S_z)	

Antagonisme entre S_z et Y_z



- Une méthodologie est proposée pour concevoir le système de filtration (fractionnement) multi-étagé. Approche théorique (bilan matière) + données empiriques

- Un système multi-étagé nécessite moins de surface membranaire totale S_{Σ} qu'un système mono-étagé.

S_{Σ} dépend on $J_p(VRR)$

Les valeurs de VRR_i pour minimiser S_{Σ} sont déterminées selon

$$S_{\Sigma, \min} = \min_{VRR_i} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{J_{p,i}} \left(\frac{1}{VRR_{i-1}} - \frac{1}{VRR_i} \right) \right)$$

- Le taux de récupération totale d'un composé dans le perméat, Y_{Σ} dépend de $TR(VRR)$ et de tous les VRR_i

Les valeurs de VRR_i pour maximiser Y_{Σ} sont calculées selon:

$$Y_{\Sigma, \max} = \max_{VRR_i} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{VRR_{i-1}} \prod_{j=0}^{i-1} b_j - \frac{1}{VRR_i} \prod_{j=0}^i b_j \right) \quad \text{où} \quad b_j = \frac{VRR_j}{TR_j(VRR_j - VRR_{j-1}) + VRR_{j-1}}$$

- Les valeurs de VRR_i pour maximiser Y_{Σ} peuvent être différentes des valeurs qui minimisent S_{Σ} (compromise)

- Attention : vérifier l'influence de la concentration rétentat du composé (partiellement) transmis ($[SP]_r$) sur $J_p(VRR)$ et $TR(VRR)$

Merci de votre attention !

Geneviève Gésan-Guiziou
genevieve.gesan-guiziou@inrae.fr



This work was funded by Carnot Qualiment®, supported by the ANR (agreement #20 CARN 0026 01), as part of its call for scientific resourcing projects 2021.



GREEN FOOD TECH²⁰²⁵

April 9-11, 2025

Palace of Grand Large
Saint-Malo, France

[GREENFOODTECH.COM](https://www.greenfoodtech.com)



Brings together the key players of the food sector (research, industry and government) to discuss scientific and technological advances dedicated to sustainable food.

Organized by:



Date limite de soumission 3 Novembre 2024

