



**HAL**  
open science

## Développement d'un outil d'optimisation multi-objectif d'un procédé de microfiltration tangentielle pour la séparation des protéines laitières

Maëllis Belna, Amadou Ndiaye, Franck Taillandier, Christophe Fernandez,  
Louis Agabriel, Geneviève Gésan-Guiziou

### ► To cite this version:

Maëllis Belna, Amadou Ndiaye, Franck Taillandier, Christophe Fernandez, Louis Agabriel, et al.. Développement d'un outil d'optimisation multi-objectif d'un procédé de microfiltration tangentielle pour la séparation des protéines laitières. MemPro 7 2022, Jun 2022, Montpellier, France. hal-03696862

**HAL Id: hal-03696862**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03696862v1>**

Submitted on 16 Jun 2022

**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

# Développement d'un outil d'optimisation multi-objectif d'un procédé de microfiltration tangentielle pour la séparation des protéines laitières

Maëllis Belna<sup>1,2,3\*</sup>, Amadou Ndiaye<sup>2</sup>, Franck Taillandier<sup>\*4</sup>, Christophe Fernandez<sup>2</sup>,

**Louis Agabriel<sup>3</sup>, Geneviève Gésan-Guiziou<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>STLO, INRAE, Institut Agro, 35 Rennes, France

<sup>2</sup>I2M, INRAE, Université de Bordeaux, 33 Talence, France

<sup>3</sup>Boccard, Research and Development, 35 Montauban-de-Bretagne, France

<sup>4</sup>RECOVER, INRAE, 13 Aix-Marseille Université, France

# BOCCARD

## Equipementier – Ensemblier industriel



1918

Boccard foundation year  
in France



55

Business Units  
worldwide



4

th family  
generation dedicated to  
industrial development



35

countries



3500

experts worldwide

### ENERGY SOLUTIONS



Oil & Gas



Nuclear



Energy



Steel & Mining

### LIFE SOLUTIONS



Brewery



Food &  
Ingredients



Cosmetics &  
hygiene



Pharma &  
Biotech

Produits laitiers  
Ingrédients  
Plats préparés / Soupes /  
Glaces  
Boissons



# OPTIMAL (2017 – 2020)

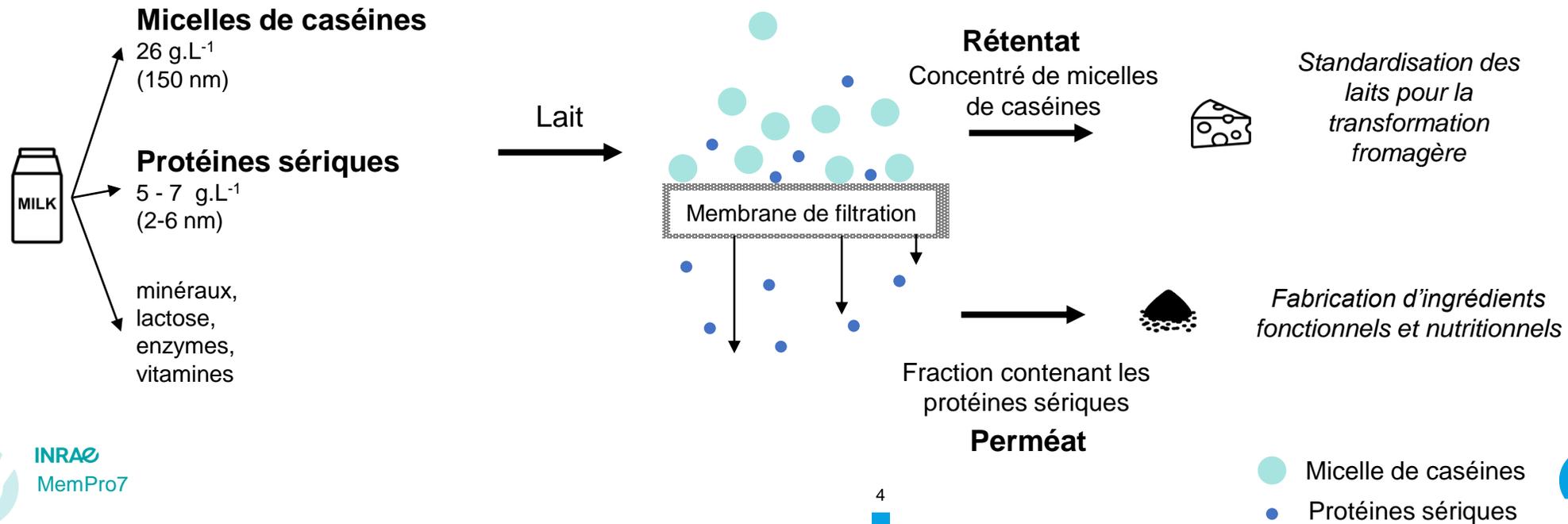
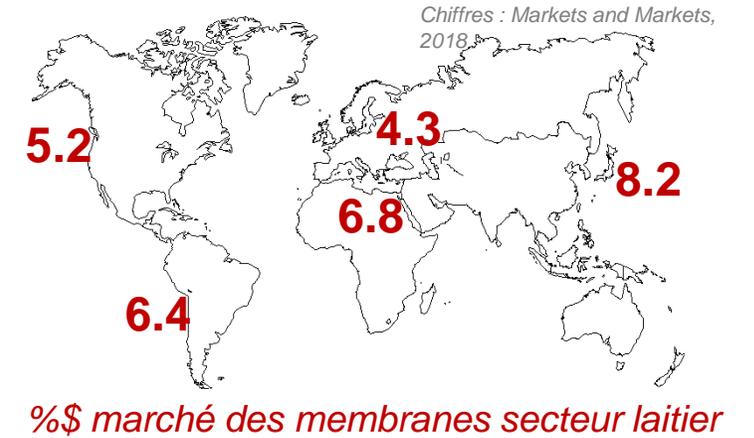
## Conception OPTimisée de procédés à MembrAnes visant à l'obtention d'ingrédients Laitiers

- ▶ Appel à projet 2016
  - ▷ « L'innovation collaborative au croisement des filières »
  - ▷ Génie des procédés & Intelligence Artificielle
- ▶ Consortium INRAE, Boccard et Sodiaal
- ▶ 3 ans et 9 mois
- ▶ 2 thèses Cifre



# CONTEXTE

- ▶ Opérations de séparation par membranes
  - ▷ Industrie laitière
  - ▷ Depuis plus de 40 ans
  - ▷ Croissance estimée de 4 à 8 % du marché entre 2018 et 2023
- ▶ Parmi les opérations de séparation à membrane
  - ▷ Microfiltration tangentielle 0,1  $\mu\text{m}$  de lait écrémé (=MF)



# TECHNOLOGIES DE MF 0.1 $\mu\text{m}$ DE LAIT ECREME

## Membranes

Céramique



Polymérique



Multitudes  
Conditions  
Opératoires

Température

Ratio réduction volumique, VRR

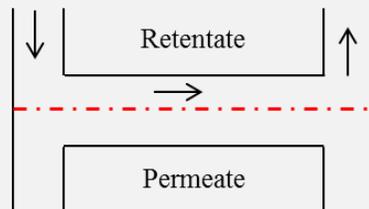
Pression transmembranaire ( $\searrow$ )

Vitesse de circulation ( $\nearrow$ )

...

Organique, SW  
Conventionnelle

$$P_{re} > P_{ro}$$

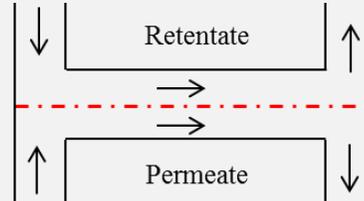


$$P_{pe} = P_{po}$$

Céramique, UTP

Uniform transmembrane pressure

$$P_{re} > P_{ro}$$



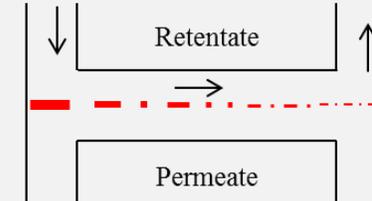
$$P_{pe} > P_{po}$$

Circulation de  
perméats

Céramique, GP

Gradient Pressure

$$P_{re} > P_{ro}$$



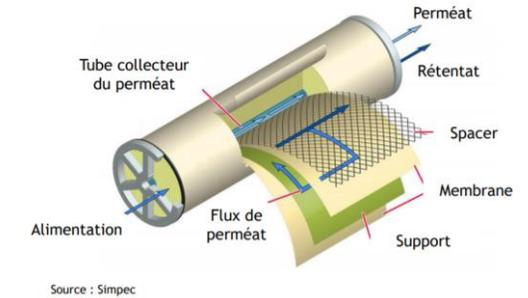
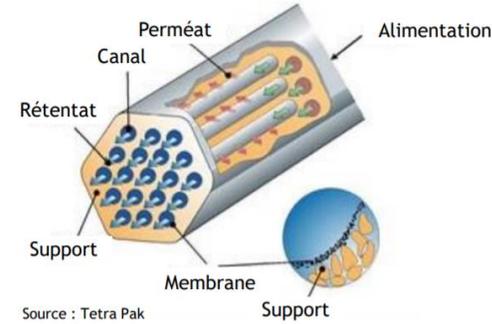
$$P_{pe} = P_{po} \neq 0$$

Perméats sous  
gradient de pression

Diverses  
Technologies

# MF : OBJECTIFS CONTRADICTOIRES

- ≠ Membranes
- ≠ Matériaux
- ≠ Modes de conduite
- ≠ Performances de filtration



Performances pour un FRV = 3	Céramique		Organique
	UTP	GP	SW
Température de conduite	50°C	50°C	12°C
Flux de perméation	75-100 L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup>	75 L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup>	10 L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup>
Transmission des protéines sériques	65-70 %	60 %	20-50 %
Durée de vie des membranes	10 ans	10 ans	2 ans
Coût des membranes	+	++	--
Exemple fonctionnement sur 1 journée	À 50°C : 2 productions de 8h + 2 nettoyages		A 12°C : 1 production de 20h + 1 nettoyage

# APPROCHES ACTUELLES POUR CONCEVOIR UNE UNITÉ DE MF SUR LAIT

## ▶ Dans littérature scientifique

- ▶ Optimisation mono-objectif: expériences qui révèlent l'influence d'une variable sur un groupe de variables/objectifs choisis
- ▶ Peu d'études sur optimisation à plusieurs objectifs (parfois optimisation d'objectifs successivement)
- ▶ Pas de comparaison des différentes technologies membranaires sur de la MF 0,1 $\mu$ m lait (except : Zulewska et al, 2009: mais comparaison sur un seul jeu de conditions opératoires)

## ▶ Au niveau industriel

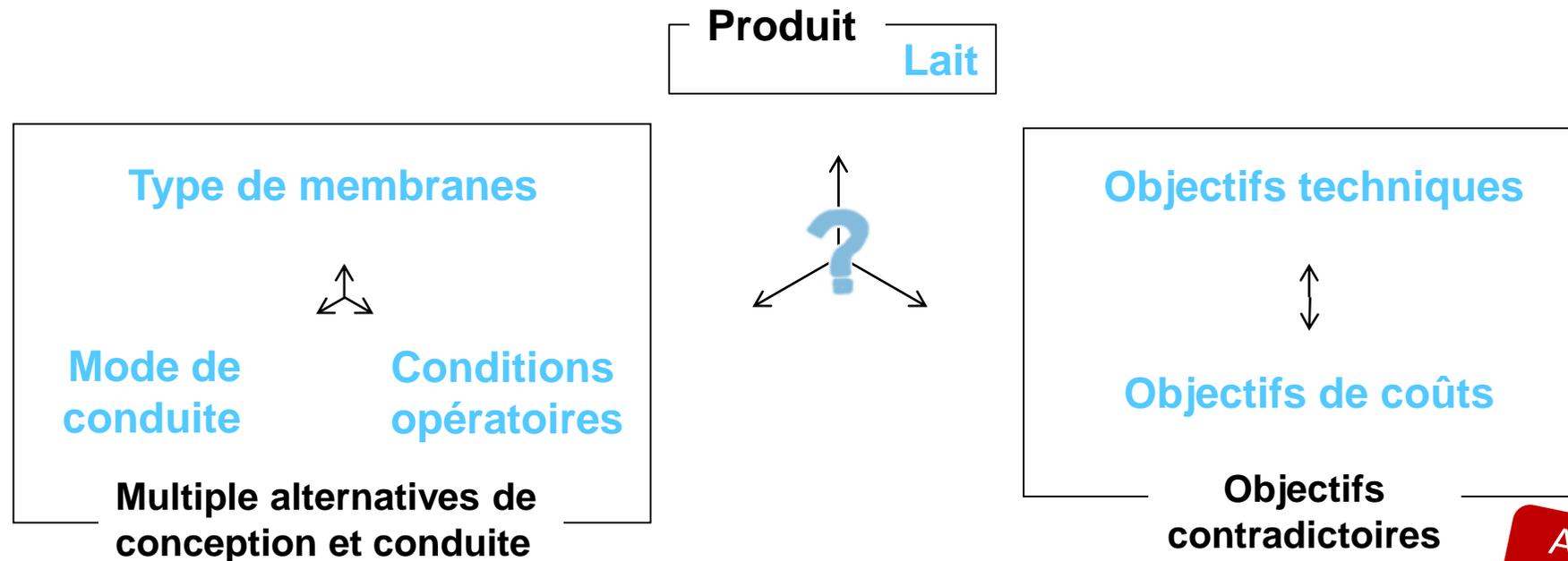
- ▶ Conception qui repose sur le savoir-faire et les connaissances des équipementiers =  $f^n$  (histoire, expérience, contrats, licences)
- ▶ Manque de données pour comparer les 3 technologies de filtration sur une large plage de conditions opératoires

**La MF de lait n'a jamais été optimisée en intégrant les objectifs contradictoires de l'opération, le tout sur une large plage de conditions opératoires**



# OBJECTIF

Développer un outil d'aide à la conception de la MF de lait écrémé basé sur une approche d'**optimisation multi-objectif**



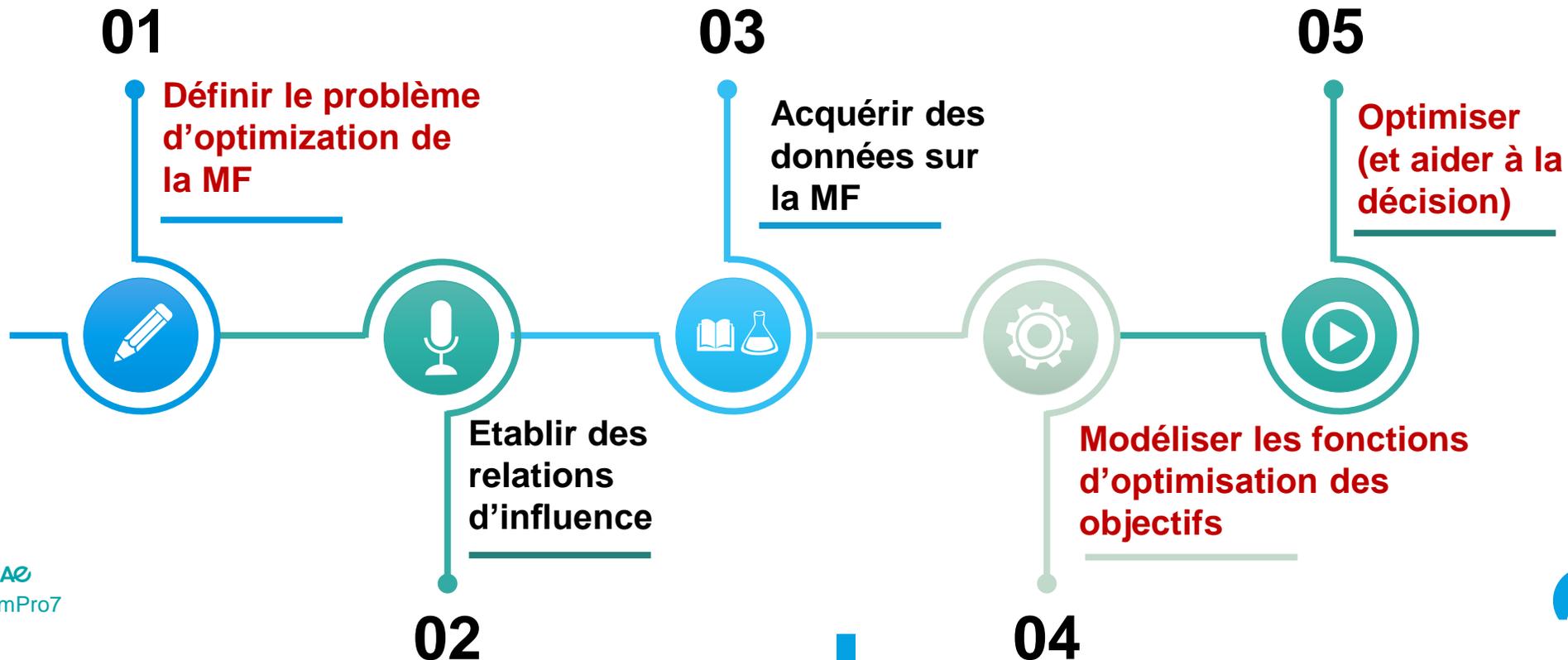
 Manque de connaissances & modèles prédictifs

**Modélisation basée sur l'intégration de connaissances expertes**

**Apport de l'Intelligence artificielle**



# MÉTHODOLOGIE D'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIVE UTILISANT DES CONNAISSANCES EXPERTES



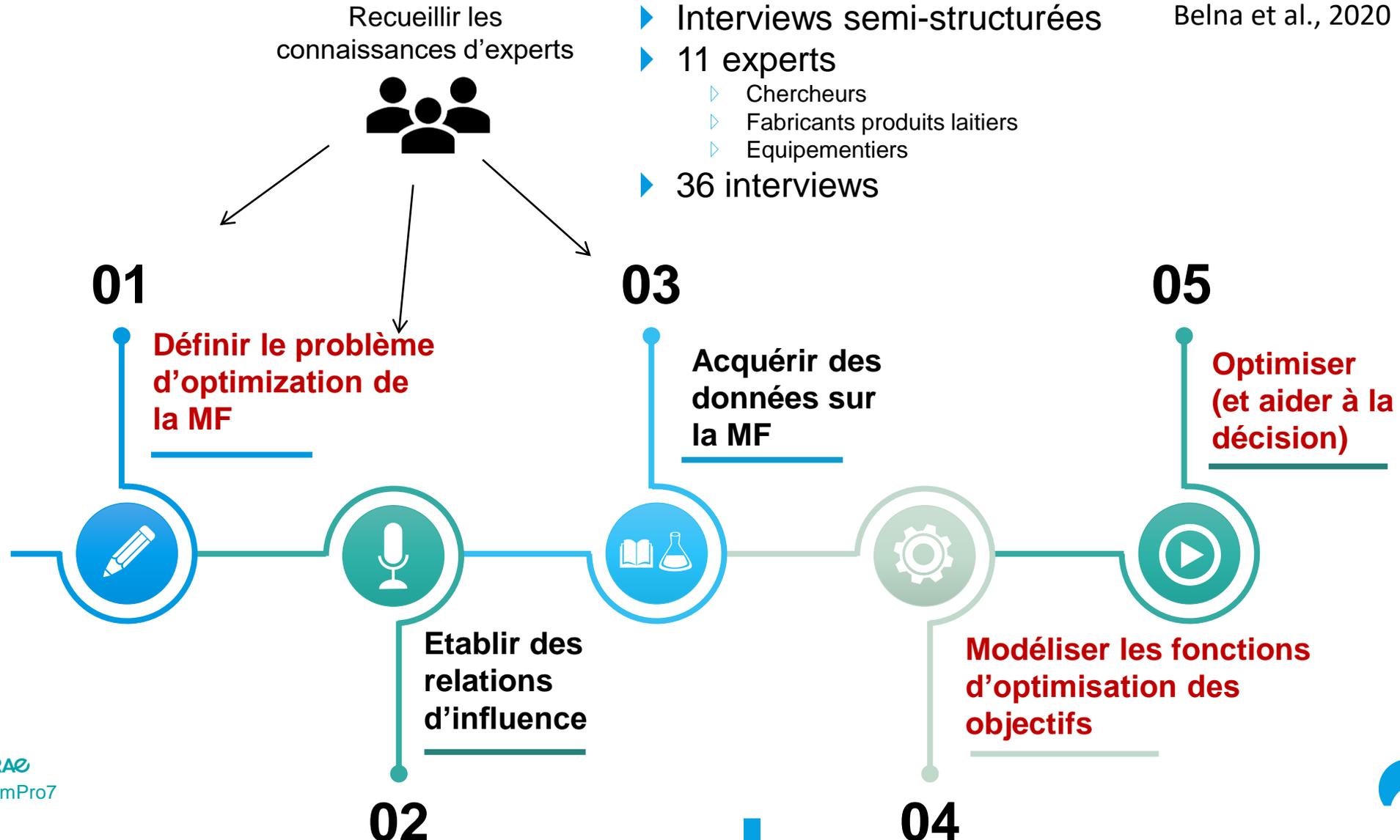
# MÉTHODOLOGIE D'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIVE UTILISANT DES CONNAISSANCES EXPERTES

Recueillir les connaissances d'experts



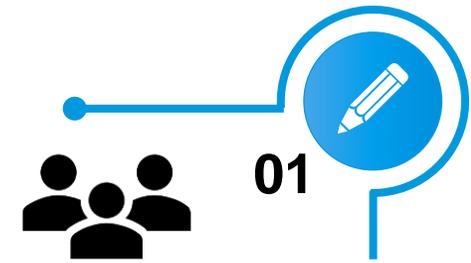
- ▶ Interviews semi-structurées
- ▶ 11 experts
  - ▶ Chercheurs
  - ▶ Fabricants produits laitiers
  - ▶ Equipementiers
- ▶ 36 interviews

Belna et al., 2020



# DÉFINIR LE PROBLÈME D'OPTIMISATION DE LA MF

- **Scope de l'optimisation : Microfiltration 0.1  $\mu\text{m}$**



Microfiltration 0.1 $\mu\text{m}$ lait écrémé	Caractéristiques du lait = constantes	TMP = constante	température de filtration = 12°C polymérique 50°C céramique	Pertes de caséines = non considérées	Nettoyage et désinfection = Efficace et reproductible
---	--	-----------------------	---	--	---

- **Objectifs d'optimisation**

$$\max CD_{CN,r}$$

*Concentration en  
caséines sur matière  
sèche dans le  
rétentat*

$$\max CD_{SP,p}$$

*Concentration en  
protéines sériques sur  
matière sèche dans le  
perméat*

$$\max \eta_p$$

*Rendement de  
récupération en  
protéines sériques*

$$\min CI$$

*Coût  
investissement*

$$\min CPR$$

*Coûts  
production*

# ETABLIR DES RELATIONS D'INFLUENCE

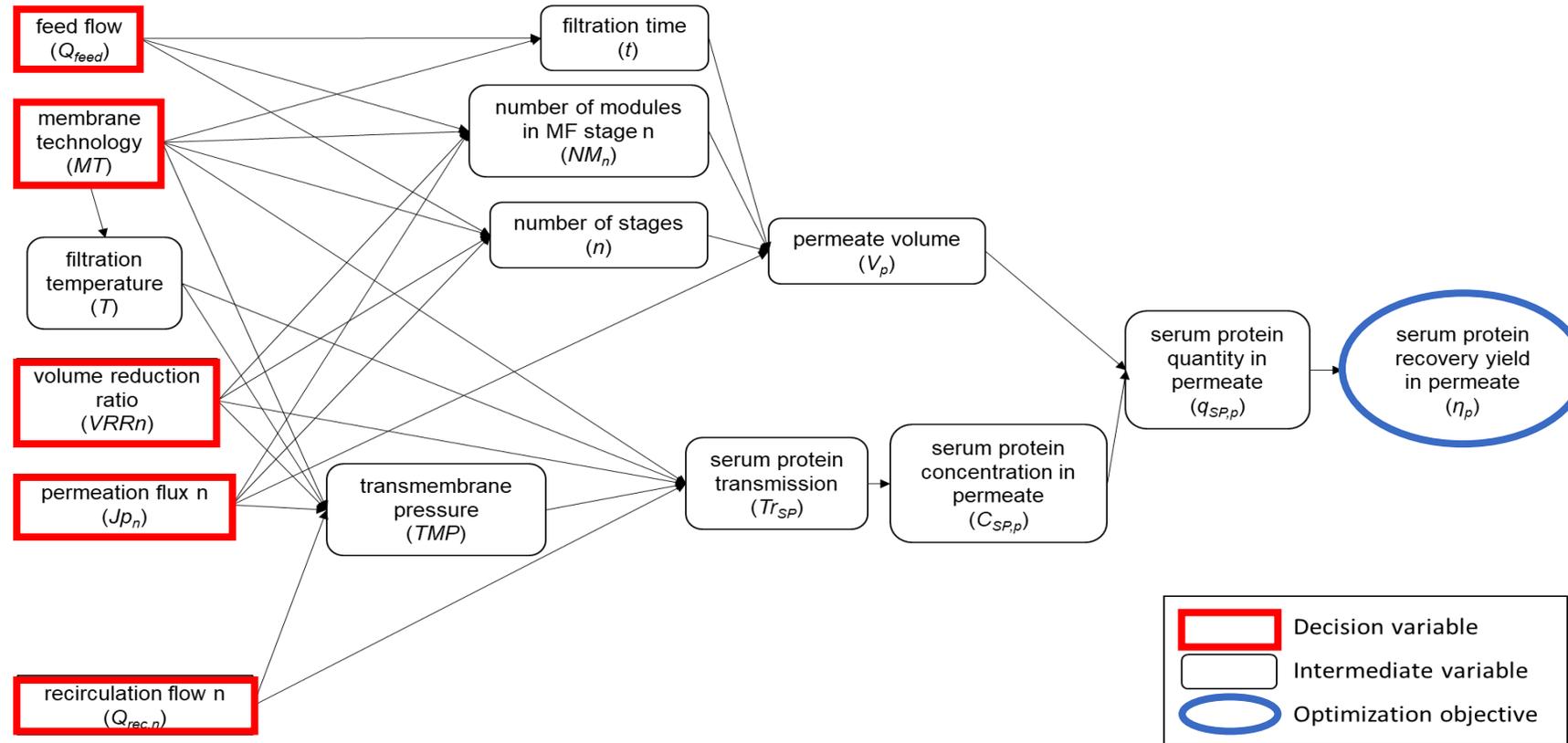
02



Belna et al., 2020



- 5 objectifs d'optimisation
- 6 variables de décision
- 31 variables intermédiaires



Carte causale pour le rendement de récupération en protéines sériques

$$\max \eta_p = f(q_{SP,p}(C_{SP,p}(Tr_{SP}), V_p(t(Q_{feed}, MT), n, NM_n)))$$

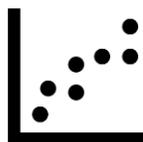
# COLLECTER ET ACQUÉRIR DES DONNÉES SUR LE PROCESS MF



03



*Littérature*



*Données de  
production  
industrielles*



*Connaissances  
expertes*



*Données à  
échelle pilote*



*Hypothèses*



*Pilote plateforme STLO  
Tetra Alcross MFS-7, TetraPak Filtration  
System*

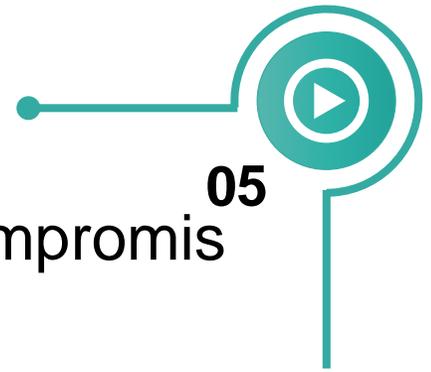
# MODÉLISATION DES FONCTIONS OBJECTIFS D'OPTIMISATION



04

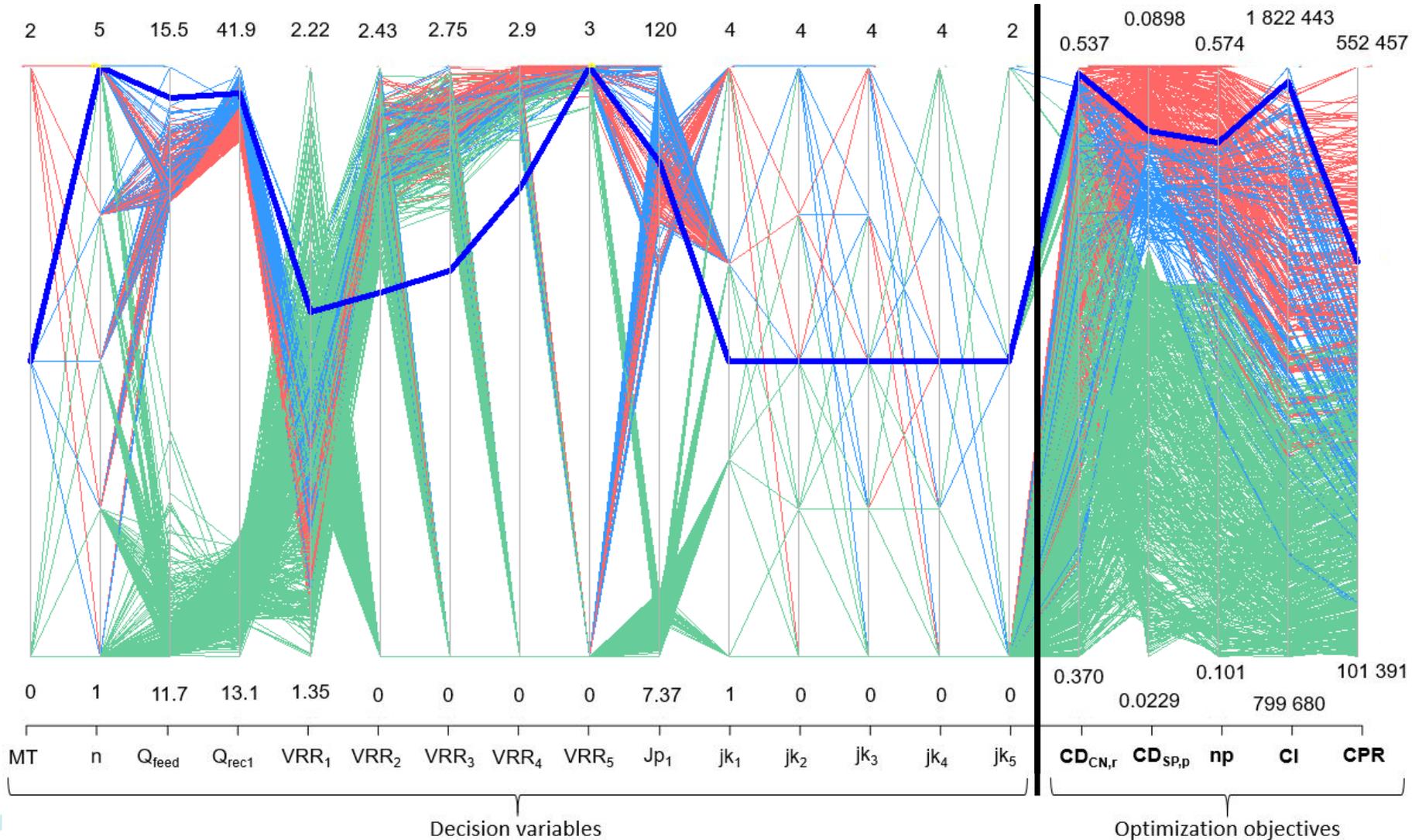
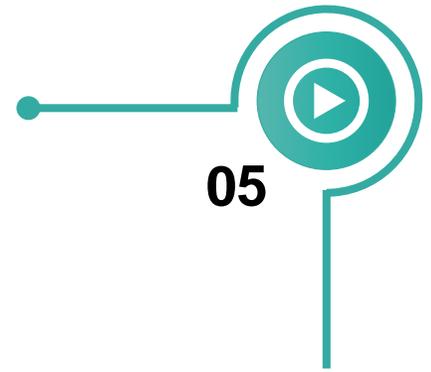
**Modèle fortement contraint**

# OPTIMISER LE PROCESS DE MF



- ▶ Optimisation → Determination du front de Pareto = ensemble de compromis optimaux avec algorithme :
  - ▷ Métaheuristique NSGA-II
  - ▷ Taille de la population size définie à 1000 avec un offspring de 2500
  - ▷ Paramètre de distribution établi à 30
  - ▷ Probabilités de crossover et de mutation établies resp. à 0.9 et à 0.5
  - ▷ Tolérances des variables de décision, fonctions objectifs et contraintes établies resp. à 0,1; 0,01 et 0.
  - ▷ Critère de terminaison: nombre maximum d'évaluation, établi à 5 000 000.
  
- ▶ Notre problème
  - ▶ Installation de MF multi étagée
  - ▶ Volume de lait traité/jr :  $V_{\text{feed}} = 230 \text{ m}^3 / \text{j}$

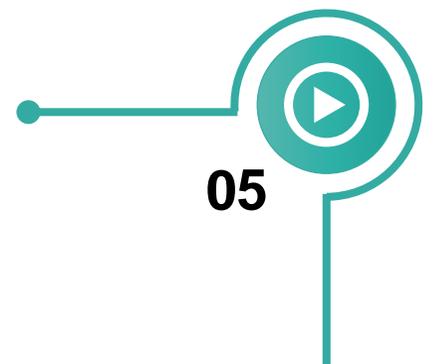
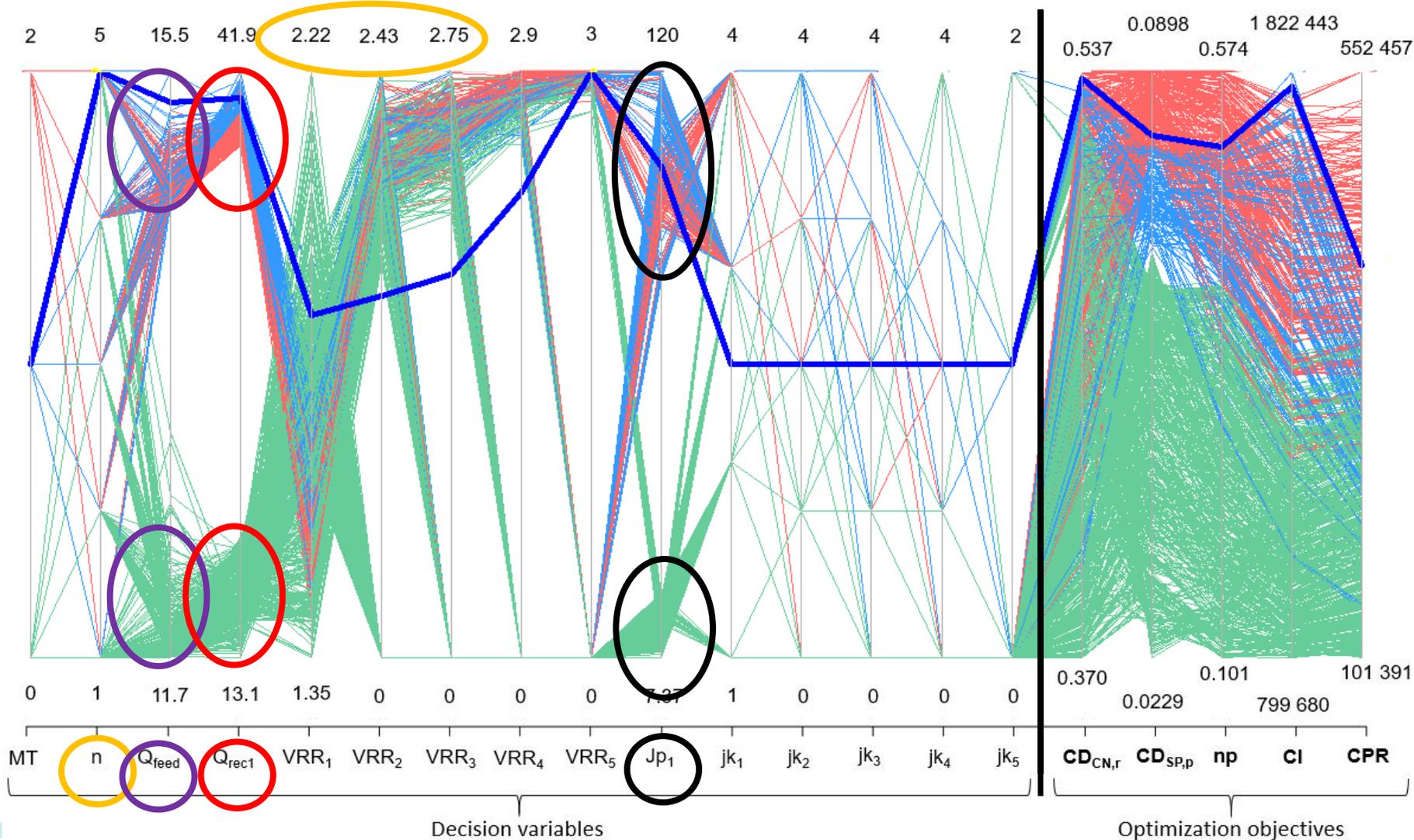
# RÉSULTATS



► Plus de 1000 solutions Pareto-optimales

$Q_{feed}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Q_{rec1}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Jp_1$  ( $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ );  $CD_{CNr}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ );  $CD_{SPp}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ ); CI (€); CPR (€)

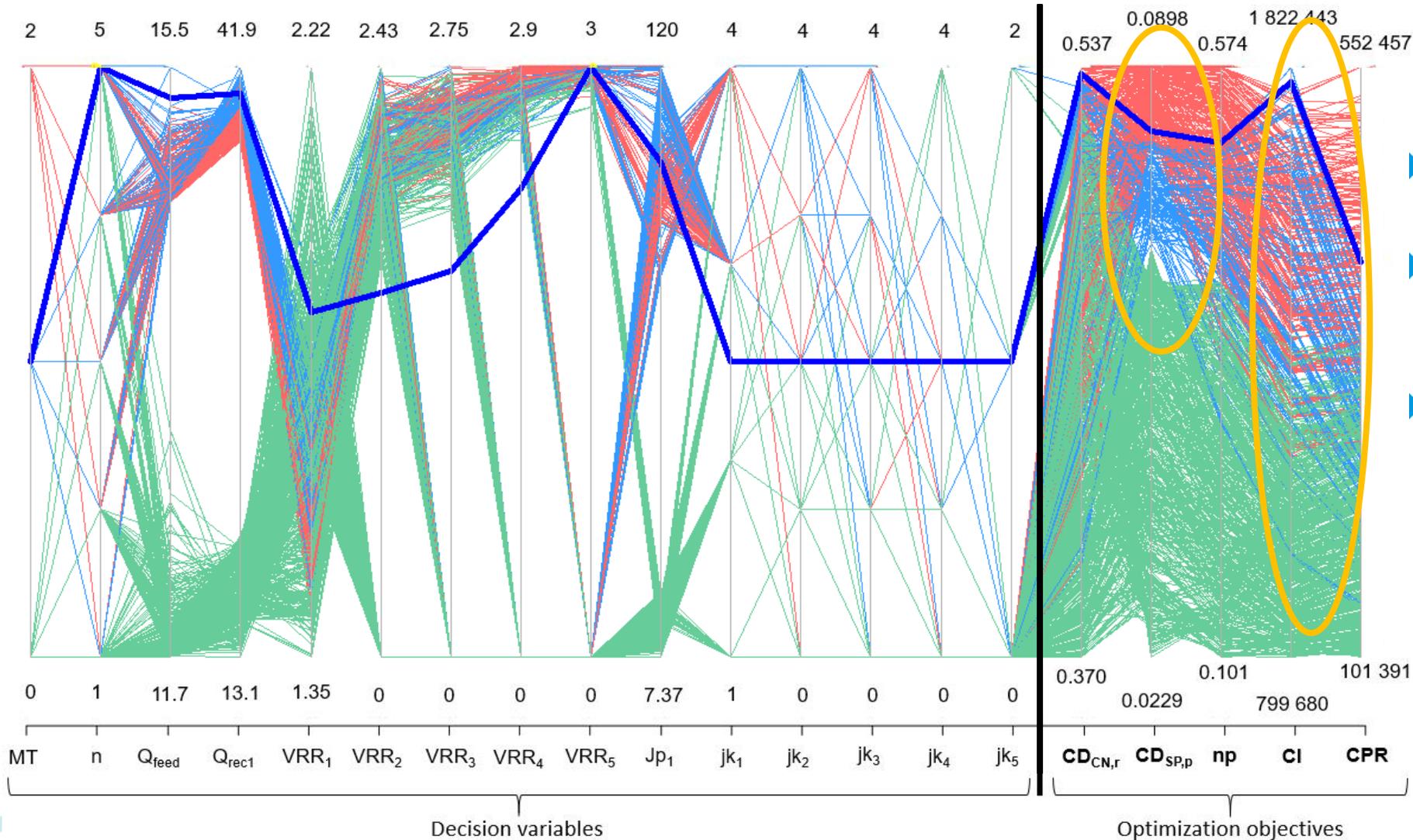
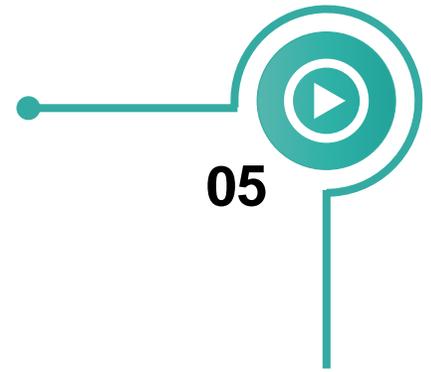
# RÉSULTATS



- ▶ Plus de 1000 solutions Pareto-optimales
- ▶ Conformes à la littérature et aux pratiques industrielles

MemPro7  
 $Q_{feed}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ) ;  $Q_{rec1}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ) ;  $Jp_1$  ( $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ ) ;  $CD_{CNr}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ ) ;  $CD_{SPp}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ ) ; CI (€) ; CPR (€)

# RÉSULTATS



- ▶ Plus de 1000 solutions Pareto-optimales
- ▶ Conformes à la littérature et aux pratiques industrielles
- ▶ Compromis dans le choix de la MT: membrane céramique par rapport à organique:
  - objectifs techniques **plus performants** mais solutions **plus chères**.

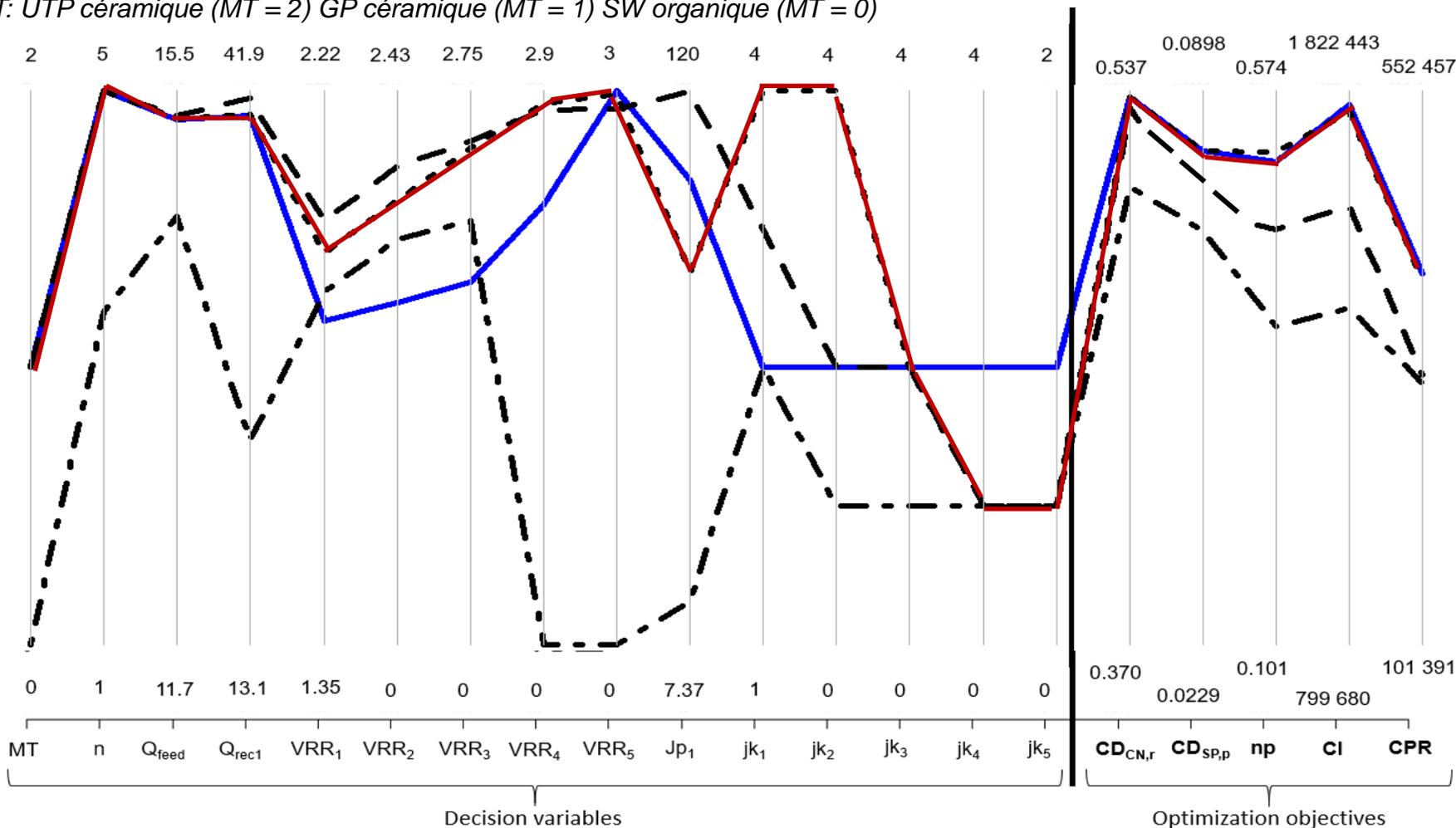
$Q_{feed}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Q_{rec1}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Jp_1$  ( $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ );  $CD_{CNr}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ );  $CD_{SPp}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ ); CI (€); CPR (€)

# ANALYSE DE SOLUTIONS PARTICULIÈRES PARETO-OPTIMALES



05

MT: UTP céramique (MT = 2) GP céramique (MT = 1) SW organique (MT = 0)



- Solution industrielle
- - - Solution équivalente pareto-optimale
- - - Solution moins chère et équivalente pareto-optimale
- . - . Solution innovante Pareto-optimale (membrane organique)

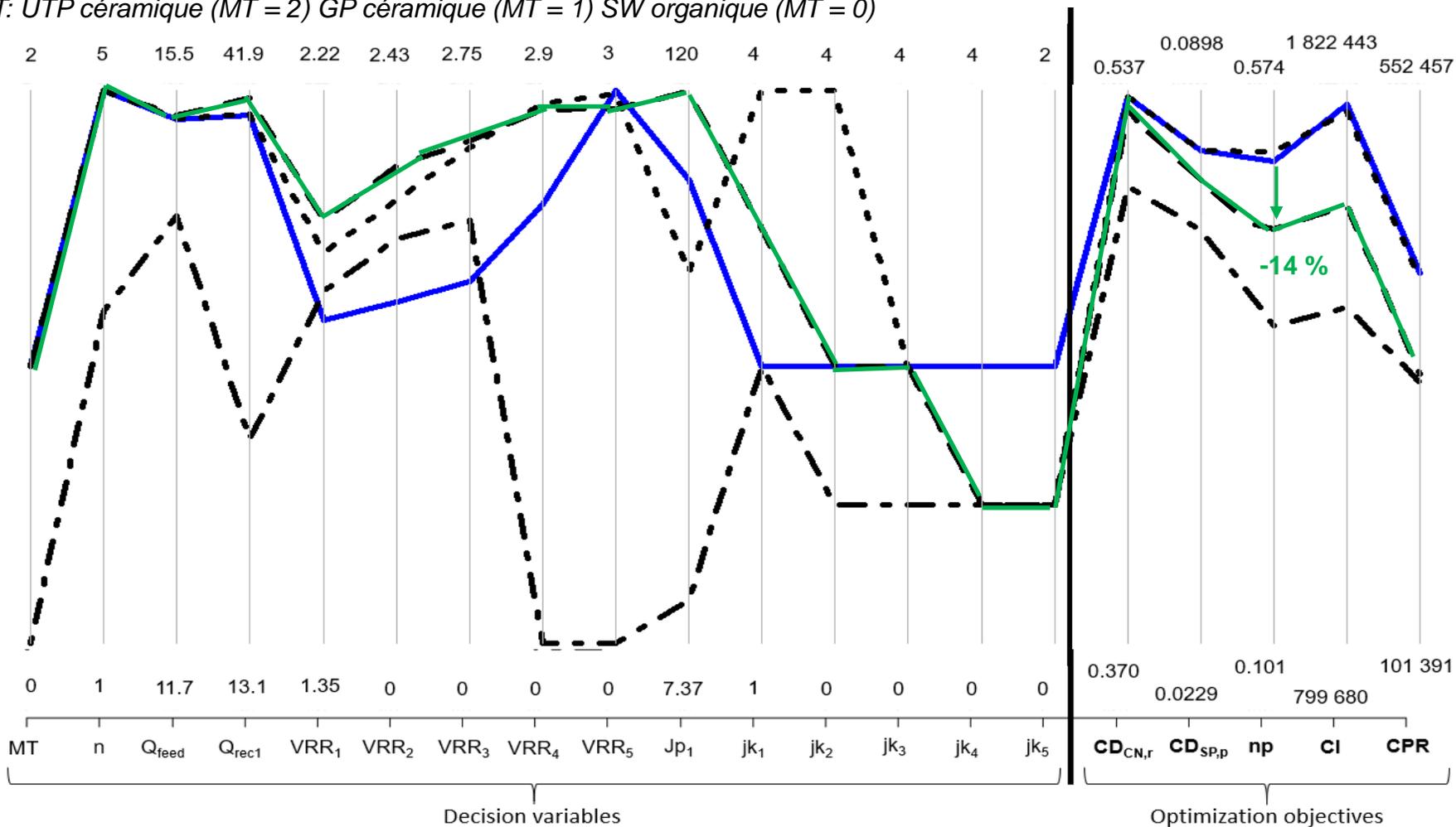
$Q_{feed}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Q_{rec1}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Jp_1$  ( $L \cdot h^{-1} \cdot m^2$ );  $CD_{CN,r}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ );  $CD_{SP,p}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ ); CI (€); CPR (€)

# ANALYSE DE SOLUTIONS PARTICULIÈRES PARETO-OPTIMALES



05

MT: UTP céramique (MT = 2) GP céramique (MT = 1) SW organique (MT = 0)



- Solution industrielle
- ⋯ Solution équivalente pareto-optimale
- - - Solution moins chère et équivalente pareto-optimale
- . - . - Solution innovante Pareto-optimale (membrane organique)

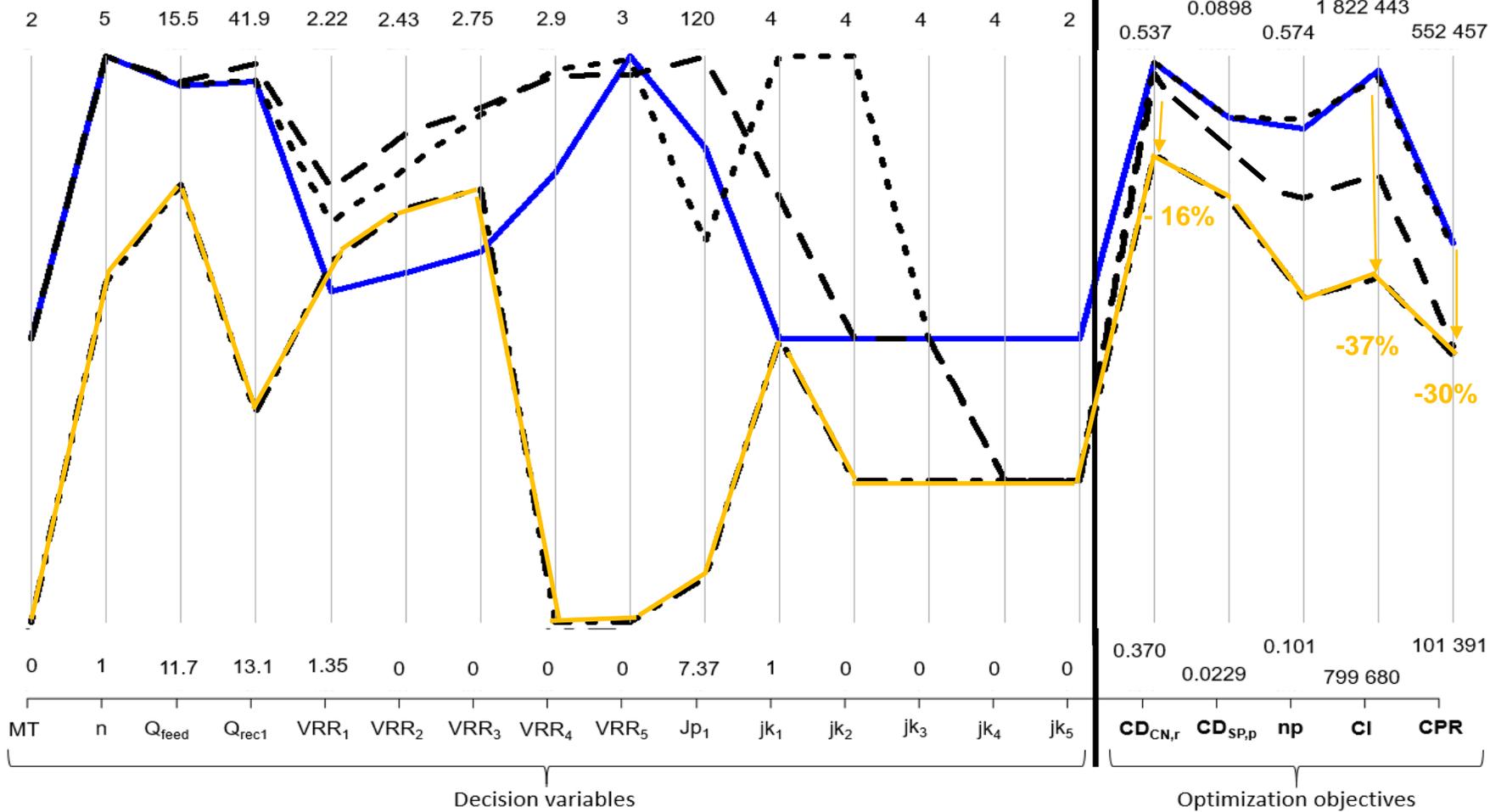
$Q_{feed}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Q_{rec1}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Jp_1$  ( $L \cdot h^{-1} \cdot m^2$ );  $CD_{CN,r}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ );  $CD_{SP,p}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ ); CI (€); CPR (€)

# ANALYSE DE SOLUTIONS PARTICULIÈRES PARETO-OPTIMALES



05

MT: UTP céramique (MT = 2) GP céramique (MT = 1) SW organique (MT = 0)



- Solution industrielle
- - - Solution équivalente pareto-optimale
- - - Solution moins chère et équivalente pareto-optimale
- - - Solution innovante Pareto-optimale (membrane organique)

$Q_{feed}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Q_{rec1}$  ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Jp_1$  ( $L \cdot h^{-1} \cdot m^2$ );  $CD_{CN,r}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ );  $CD_{SP,p}$  ( $g \cdot kg^{-1} DM$ ); CI (€); CPR (€)

# SCÉNARI D'AIDE À LA DÉCISION

- ▶ Suite à l'optimisation, nécessité de choisir la solution Pareto optimale préférée par l'utilisateur => étape d'aide à la décision

Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 1980)

Critère	Importance des critères		
	Valorisation caséines	Valorisation protéines sériques	Valorisation simultanée caséines et protéines sériques
Concentration en caséines (CDCN,r)	9	1	9
Concentration en protéines sériques(CDSP,p)	1	9	9
Rendement de récupération en protéines sériques ( $\eta_p$ )	1	9	9
Coût d'investissement (CI)	7	7	1
Coût de production (CPR)	 7 	 7 	 1 
	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>

Critère	Seuils de l'échelle	Note
CD <sub>CN,r</sub>	CD <sub>CN,r</sub> < 0.35	1
	0.35 < CD <sub>CN,r</sub> < 0.4	2
	...	...
	0.55 < CD <sub>CN,r</sub> < 0.56	8
	CD <sub>CN,r</sub> > 0.56	9

# SCÉNARI D'AIDE À LA DÉCISION

S1



MT = GP ; n=2

S2



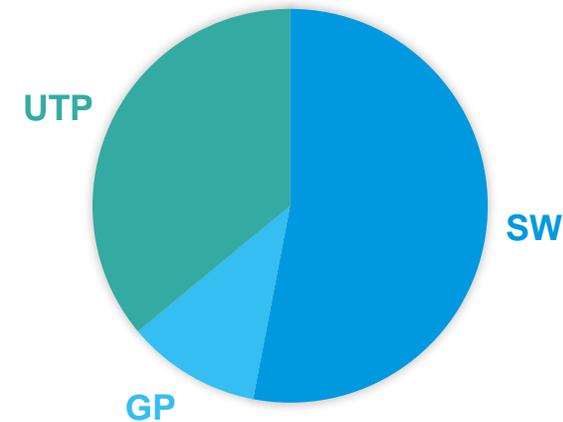
MT = UTP ; n=2

S3



MT = UTP ; n=4

Rappel de la répartition  
des solutions de l'optimisation (%)



Fortement lié au choix des critères de décision  
-> Besoin de recueil de critères et des préférences auprès des décideurs

## POUR RÉSUMER....

- ▶ Proposition d'une approche innovante pour l'optimisation de la MF de lait
  - ▷ En couplant et intégrant différents types de connaissances
  - ▷ En modélisant les objectifs d'un problème d'optimisation
  - ▷ Optimisation multi-objectifs avec des objectifs pouvant être contradictoires entre eux.
- ▶ L'optimisation propose plus de 1000 solutions Pareto-optimales avec:
  - ▷ Des solutions proches de solutions industrielles 'standards'
  - ▷ Des solutions avec des résultats comparables mais avec des coûts moindres
  - ▷ Des alternatives et des chemins potentiellement innovants qui nécessitent d'être validés pour évaluer leur faisabilité à l'échelle industrielle

↪ Coupler l'intégration de connaissance à l'optimisation est une stratégie intéressante pour résoudre un problème multi-objectifs tel que la MF de lait écrémé et plus généralement tout type de procédés agro alimentaires pour lesquels la connaissance disponible est incomplète.

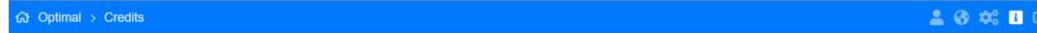
- ▶ L'aide à la décision type AHP permet de guider le décideur dans le choix de la solution préférée parmi les solutions Pareto-optimales.

# PRODUCTIONS

- Articles scientifiques

M. Belna, A. Ndiaye, F. Taillandier, L. Agabriel, A.-L. Marie, G. Gésan-Guiziou (2020). Formulating multiobjective optimization of 0.1  $\mu\text{m}$  microfiltration of skim milk, **Food and Bioproducts Processing**, 124, 244–257

M. Belna, A. Ndiaye, F. Taillandier, C. Fernandez, L. Agabriel, G. Gésan-Guiziou (2022). Multiobjective optimization of skim milk microfiltration based on expert knowledge. **Expert Systems with Applications** (accepté 2022)



- Outil: Logiciel Optimal



Project list | Project | Model | Results | Chart | MCDA | Export | Logs

Start optimization

General | History

Name: Model\_GP\_Ak\_V2 | id: 06c7d3d0-b73d-11ec-aa22-67f8f0ab338

Description: optional

Framework	Algorithm	Model	Version
pymoo	pymoo_nsga2	Model_Update_dim_GP	latest

Population size: 1000

Algorithm parameters		Variables			Constants	
Name	Value	Name	Lower bound	Upper bound	Name	Value
crossover_real_prob	0,9	Qfeed	5	20	TEST_ARNO	37
crossover_int_prob	0,9	Qrec1	12	43	MMGP	37

Project list | Project | Model | Results | Chart | MCDA | Export | Logs

Conception OPTimisée de procédés à Membrane

Ce logiciel est l'aboutissement de trois années de collaboration entre Boccard, Soutien financier FEDER européen et de la région Bretagne. Il permet l'optimisation fractionnement des protéines. Il a été pensé de façon à pouvoir: Concevoir et optimiser l'installation préc...

1000 | Order by priority | Axes

Optimization results

Log: [ Fri 13 May 2022 15:11:24 ]  
Duration: 1h 55m 17.1s  
Completed

```
> project definition id: 06c7d3d0-b73d-11ec-aa22-67f8f0ab338  
> https://pymoo.org /installation.html#installation  
> To disable this warning:  
> from pymoo.configuration import Configuration  
> Configuration.show_compile_hint = False  
=====
```

CDCNr	CDSPP	CI	COmaint	CPR	CSPp	Cech	Cetage	np
0.56	0.15	2 400k	175k	480k	6	24k	1 250k	0.0
0.52	0.12	2 000k	150k	400k	5	18k	1 000k	0.48
0.48	0.08	1 600k	125k	320k	4	14k	750k	0.36
0.44	0.06	1 200k	100k	240k	3	10k	500k	0.24
0.4	0.03	800k	75k	160k	2	0	250k	0.12
0.36	0	400k	50k	80k	1	-6k	0	0

Search in: [ ] [ ] [ ]

- CDCNr
- CDSPP
- CI
- COmaint
- COng
- CPR
- CSPp
- Callm
- Cech
- Cechamont
- Cetage
- CetageSM
- Cholding
- Cmembrane

```
> | n_gen | n_eval | cv (min) | cv (avg) |  
| 1 | - | - |  
> | 3500 | 2,000000000 | 8,297000000 |  
| 1 | 0,258145413 | ideal |  
> | 6000 | 2,000000000 | 5,048000000 |  
| 1 | 0,000000e+00 | 2
```

# RETOMBÉES INDUSTRIELLES ET PERSPECTIVES



## ▶ Retombées industrielles

- ▶ Capitalisation pour une **connaissance durable et accessible**
- ▶ Cartographie de la **connaissance et des savoir-faire**
- ▶ Implémentation d'un **logiciel** informatique combinant **optimisation et aide à la décision**

## ▶ Perspectives

- ▶ Travail sur la **généricité et la fiabilité** du modèle mathématique de la MF
- ▶ Travail sur la **sensibilité** des résultats
  - Constantes
  - choix algo et paramétrage
  - choix des critères de préférence
- ▶ Travail sur le **scope** du modèle mathématique
  - Inclure une ACV ?
- ▶ Utilisation du logiciel sur d'autres procédés membranaires ou non.

Merci de votre attention!

