

Eco-conception des procédés agro-alimentaires

Approches et nouvelles opportunités

Geneviève Gésan-Guiziou , UMR 1253 Science et Technologie du Lait et de l'œuf
INRAE – Institut Agro Rennes



Qualité
sensorielle



Structure
de l'aliment

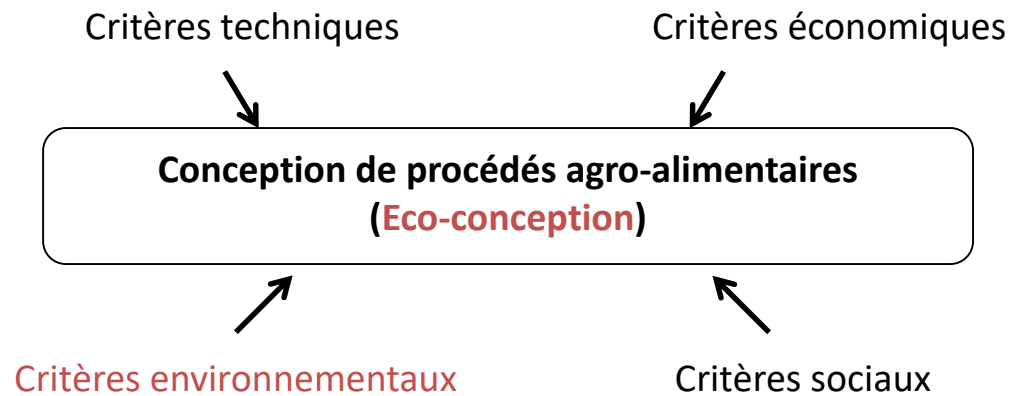


Technologies et procédés
agroalimentaires



Qualité nutritionnelle
et effets sur la santé

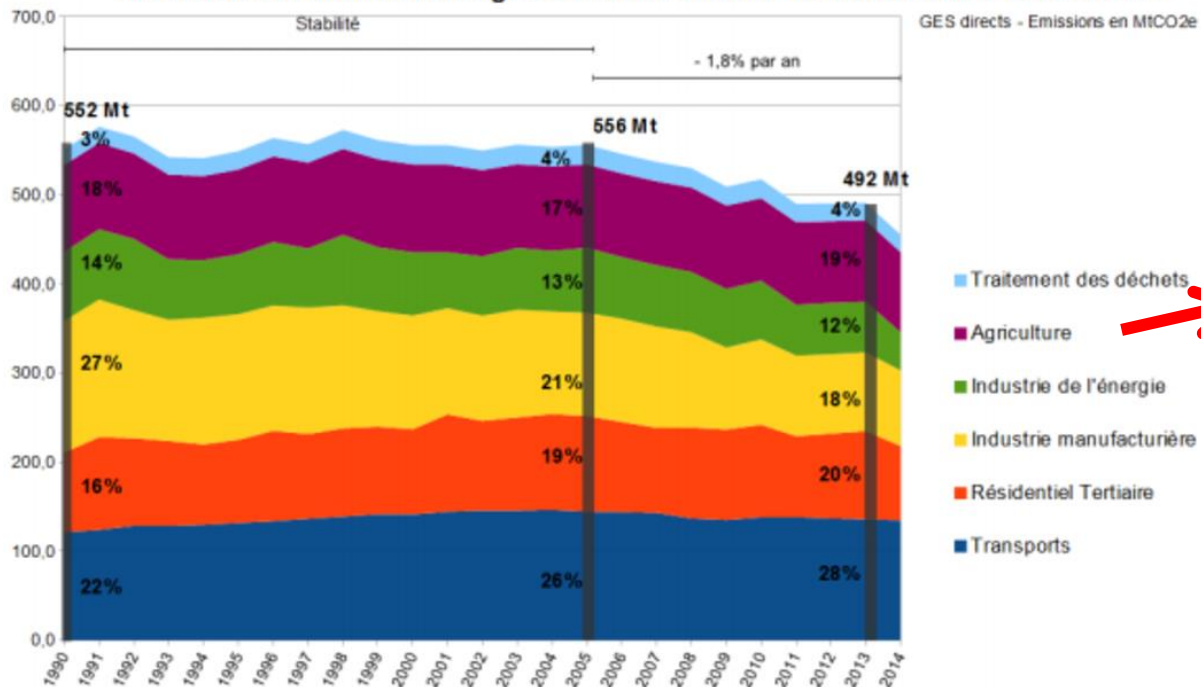
Qu'est ce que l'éco-conception ?



**Intégration du paramètre « environnement »
dans la conception ou la re-conception d'un procédé**

Des efforts particuliers à faire sur les étapes de transformation (COP 21 Paris)

Evolution des émissions de gaz à effet de serre de la France entre 1990 et 2013

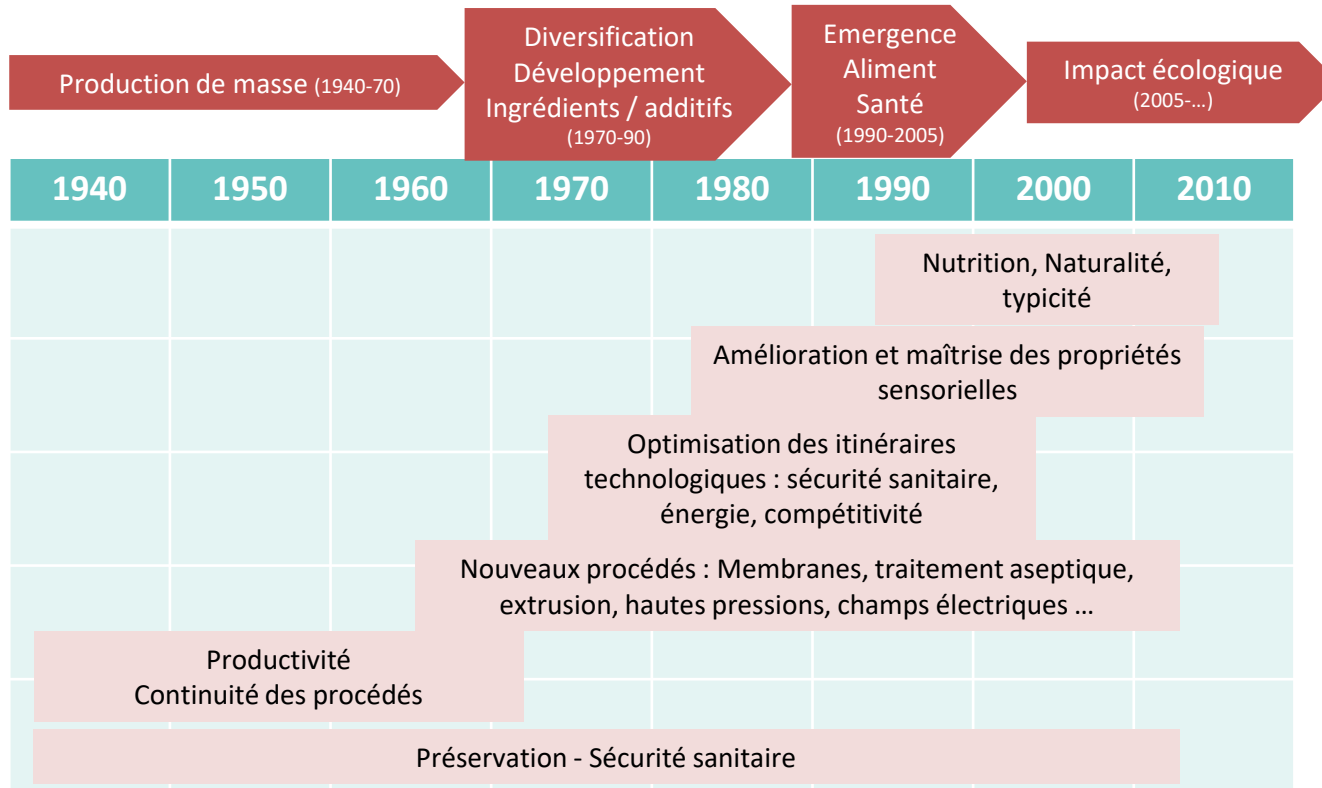


-12 % pour les 10 prochaines années
 et -50% d'ici 2050

-24 % pour les 10 prochaines années
 et -75 % d'ici 2050



Une prise en compte « récente » des critères environnementaux

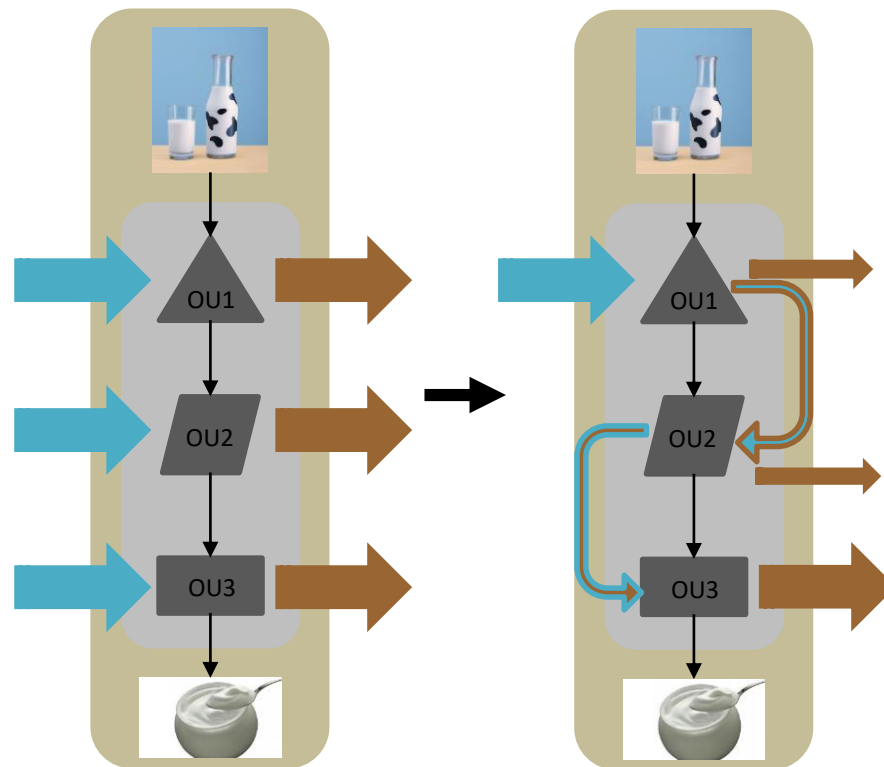


Trystram, 2014

Stratégie 1

Minimisation des ressources & intrants ('bon sens')

Stratégie 1 : Minimisation des ressources & intrants ('bon sens')



OU : Opération unitaire

- Diminution des intrants
 - Changement de technologies
 - Modifications de conditions opératoires
 - Ré-utilisation / redistribution des flux en utilisant des méthodes de conception spécifiques (ex: Pinch)
- Diminution des coûts (driver = économie)
- Actions uniques sur les consommations d'eau et d'énergie
- Non-prise en compte de modifications de caractéristiques des produits
- Pas de recherche d'optimum
- Innovation faible, mais gains (éco-envi) non négligeables

Stratégie 1

Exemples (1/2)

- Ventilation des haloirs de fromagerie

EuropeanTruefood (2006-2010); Picque et al., IDJ (2009)

- 1- La ventilation séquentielle préconisée est basée sur le contrôle de la température de la cave
- 2- Économie sur la consommation électrique ~ 50-60 % de la consommation liée à la ventilation (2% de la consommation électrique de l'usine) sans affecter la qualité des fromages affinés



Volume cave ~ 1300 m³
Fromages affinés ~ 20 000

- Gestion des nettoyages de stérilisateur

Industrial project, Alvarez et al. IDJ (2010)

- 1- Le nettoyage-en-place est basé sur l'utilisation rationnelle de capteurs et traceurs et sur le traitement adapté des données recueillies lors du nettoyage d'un stérilisateur de crème dessert
- 2- Les temps de nettoyage et les volumes d'effluents ont été presque divisés par 2, sans altérer l'efficacité du nettoyage

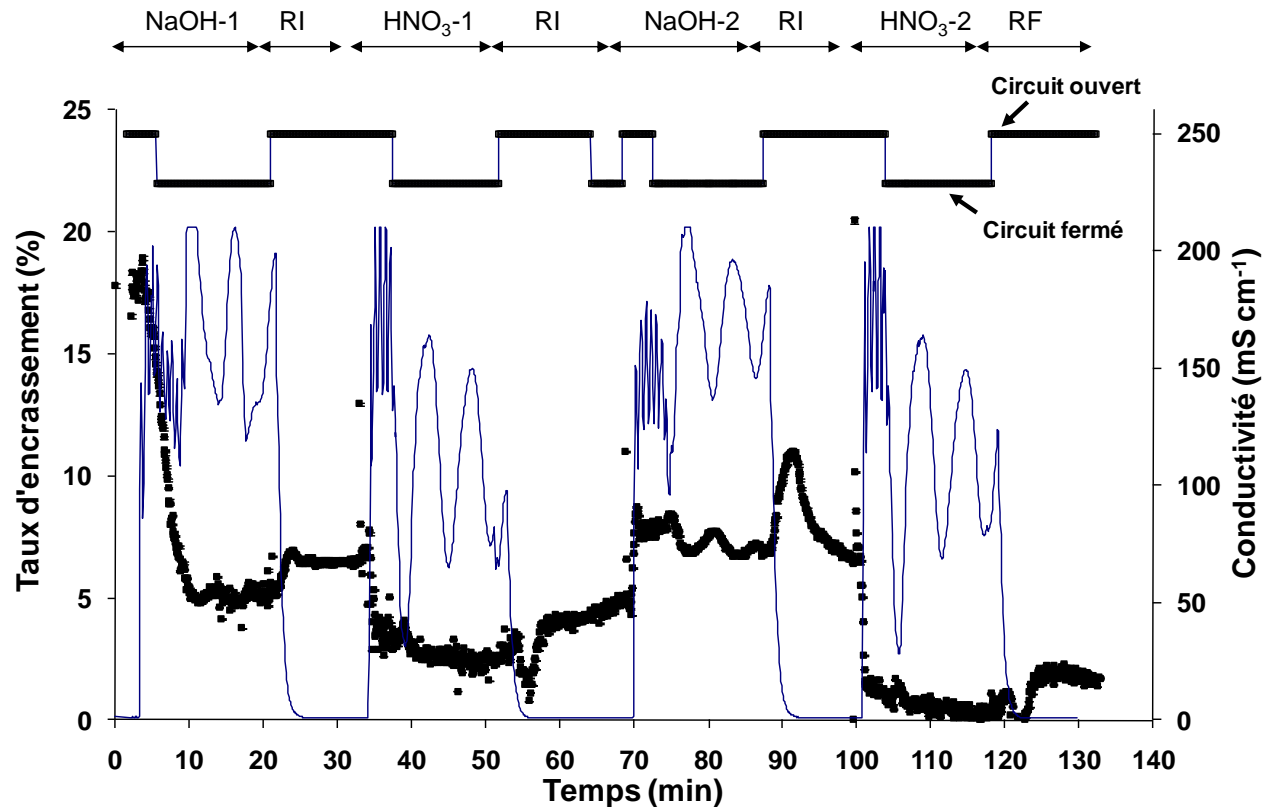


Stratégie 1

Exemples (2/2)

Nettoyage stérilisateur crème Chocolat

Situation revisitée

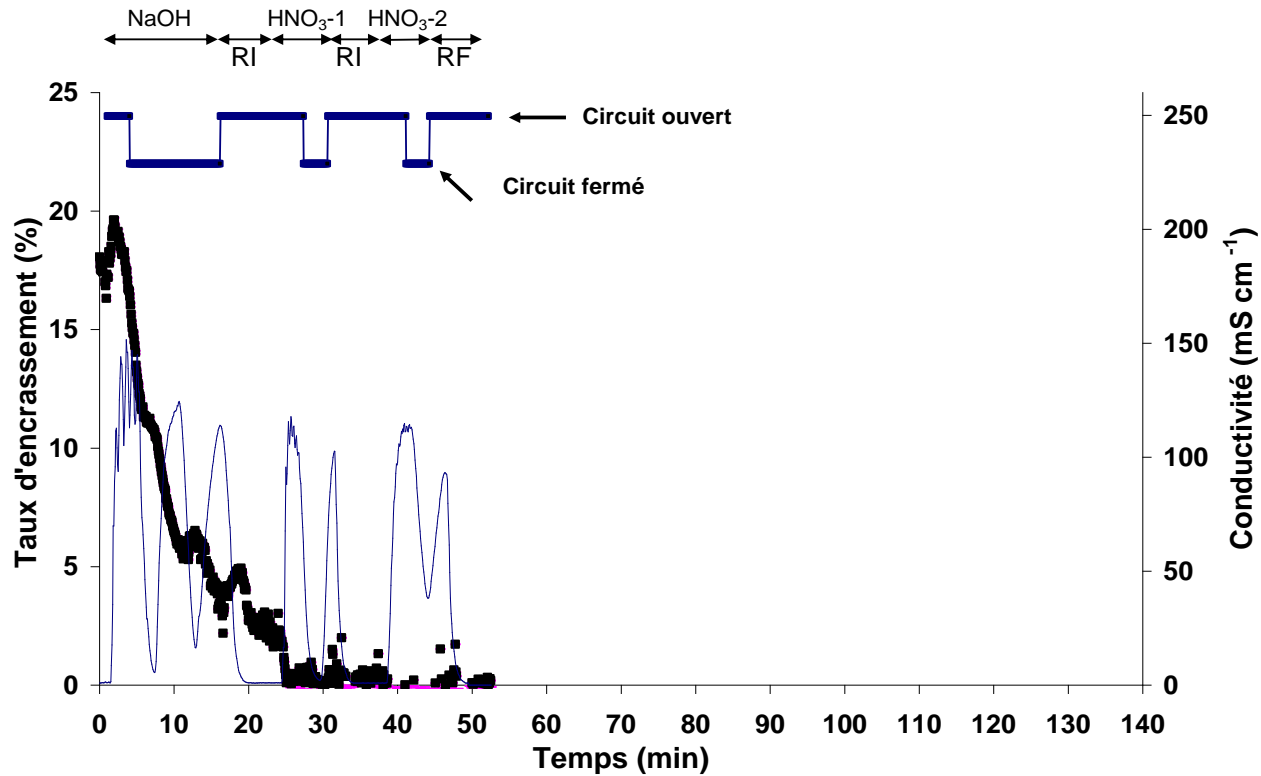


Stratégie 1

Exemples (2/2)

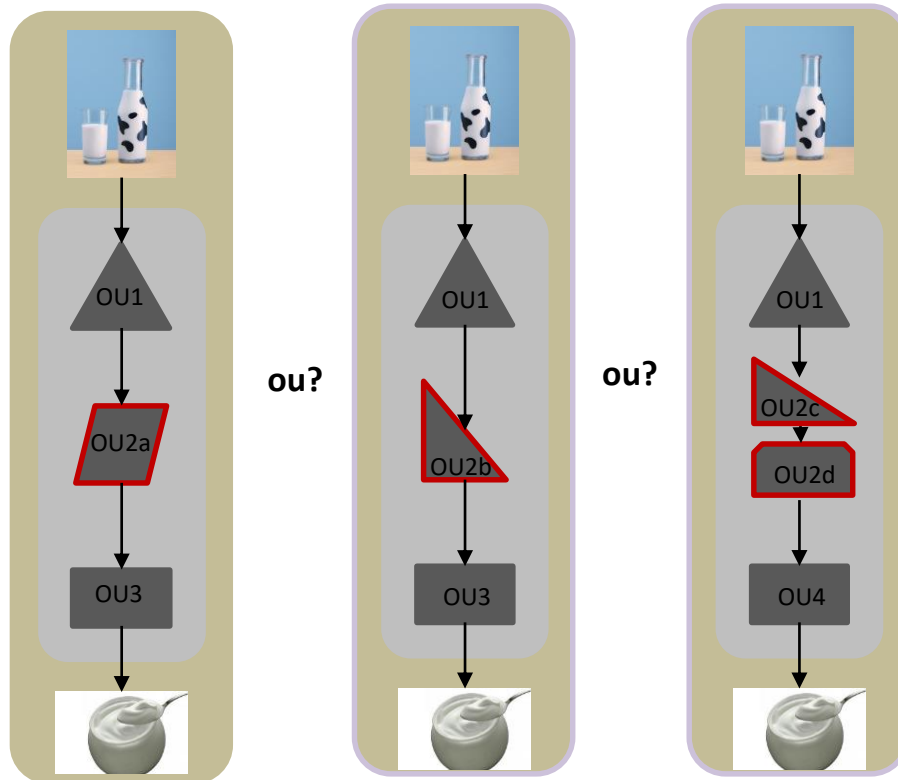
Nettoyage stérilisateur crème Chocolat

Situation initiale



Stratégie 2

Evaluation des procédés par ACV



OU : Opération unitaire

Analyse de cycle
de vie, ACV



- Simple et applicable
- Identifications des opérations les plus « pénalisantes »

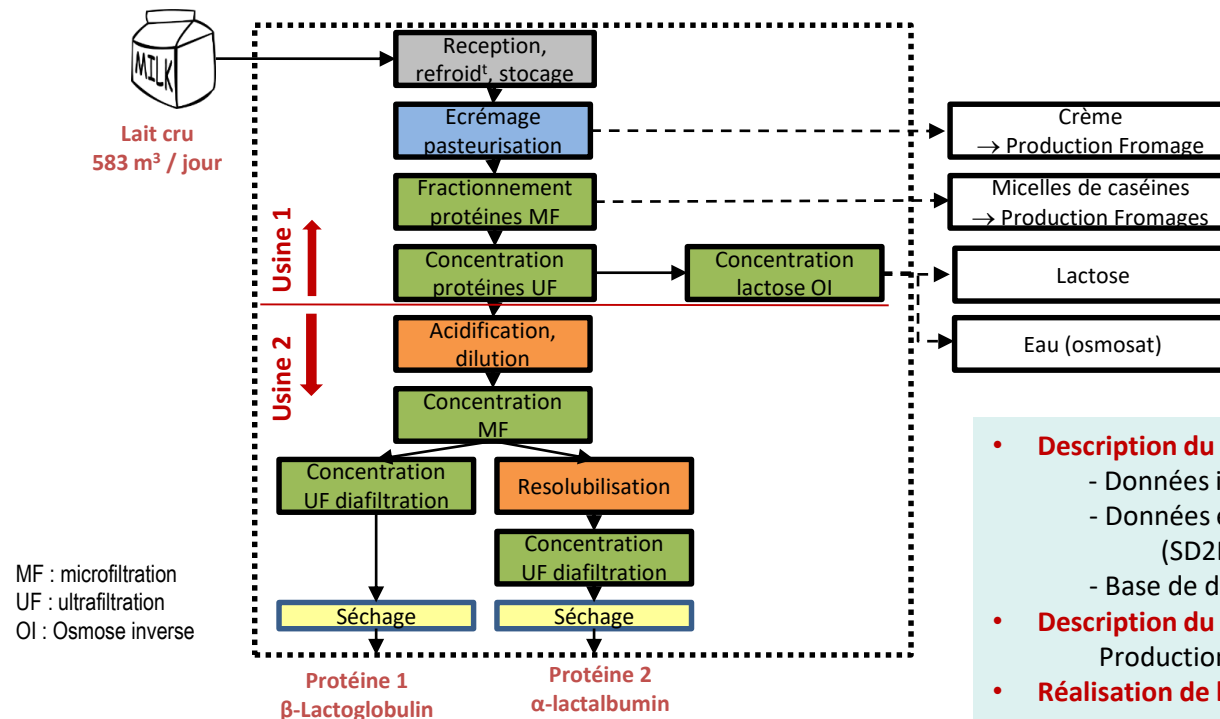


- Complexe quand le produit est affecté (Unité fonctionnelle non constante)
- Pas de proposition de solutions d'améliorations
- Pas de recherche d'optimum

Stratégie 2

Evaluation des procédés par ACV

Exemple: Procédé de fractionnement de protéines laitières



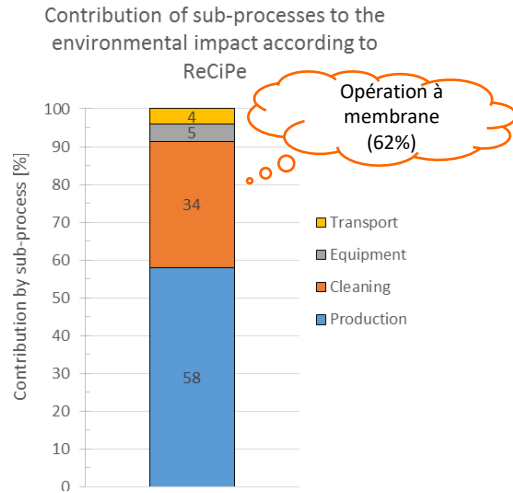
- **Description du procédé → Données**
 - Données industrielles
 - Données expérimentales + logiciel de séchage (SD2P, Schuck et al. 2009)
 - Base de données : Ecoinvent 3.0
- **Description du procédé → 4 Etapes**
 Production, nettoyage, équipement, transport
- **Réalisation de l'ACV:** Méthode ReCiPe + SimaPro 8.0

Stratégie 2

Evaluation des procédés par ACV

Exemple: Procédé de fractionnement de protéines laitières

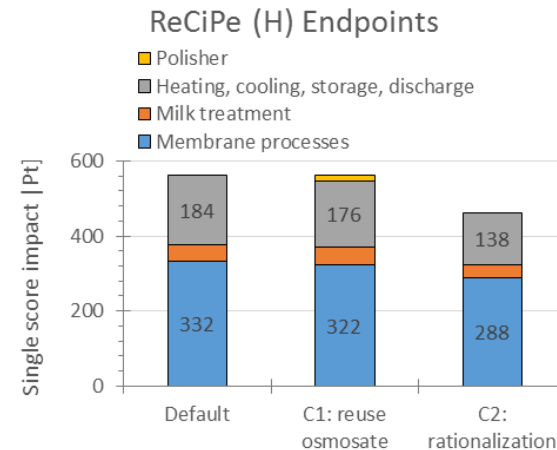
Résultats



Les étapes de production (≈ 60 %) et nettoyage (≈ 30 %) sont les plus « pénalisantes » d'un point de vue environnemental

Gésan-Guiziou et al. SPT 2019

Comparaison de stratégies de nettoyage

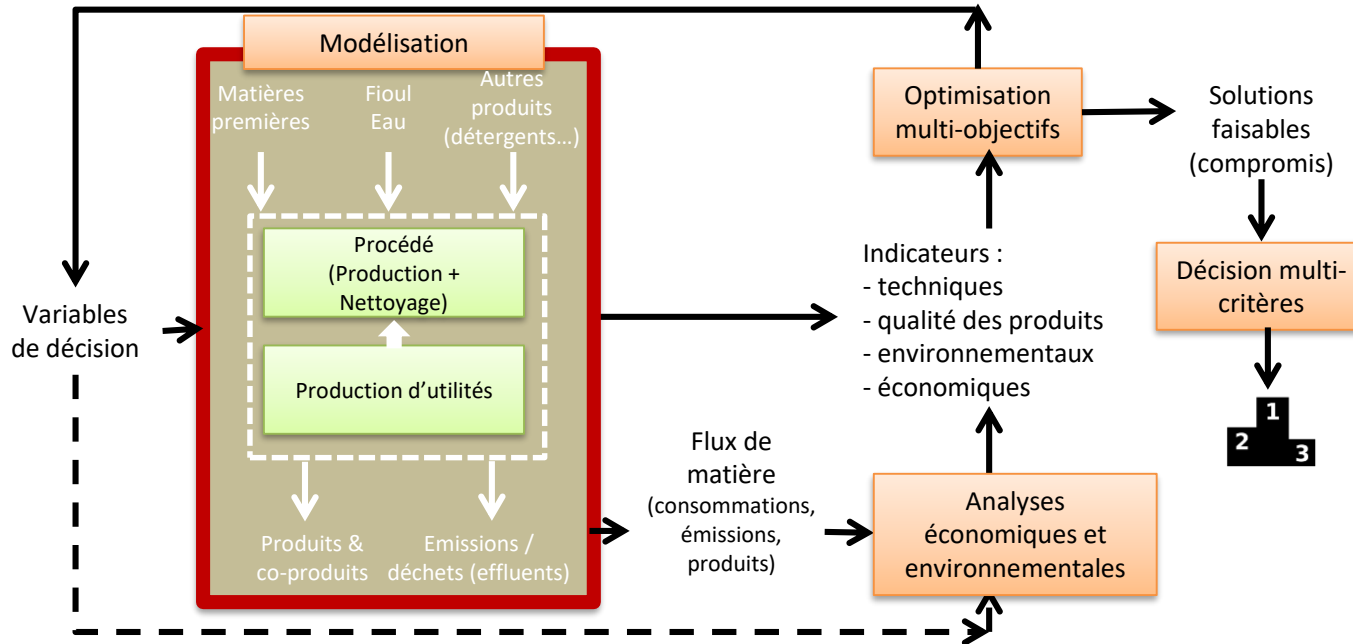


- C1: Ré-utilisation de l'eau à partir du procédé de concentration de lactose
 - réduction de la consommation d'eau
 - Mais besoin d'un « polisher »
- C2: Rationalisation des étapes de nettoyage (moins de renouvellement des solutions de soude, réduction des durées de nettoyage, ...)
 - réduction des consommations d'eau, d'énergie et produits chimiques

Gésan-Guiziou et al. SPT 2019

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs



Optimisation simultanée d'objectifs contradictoires



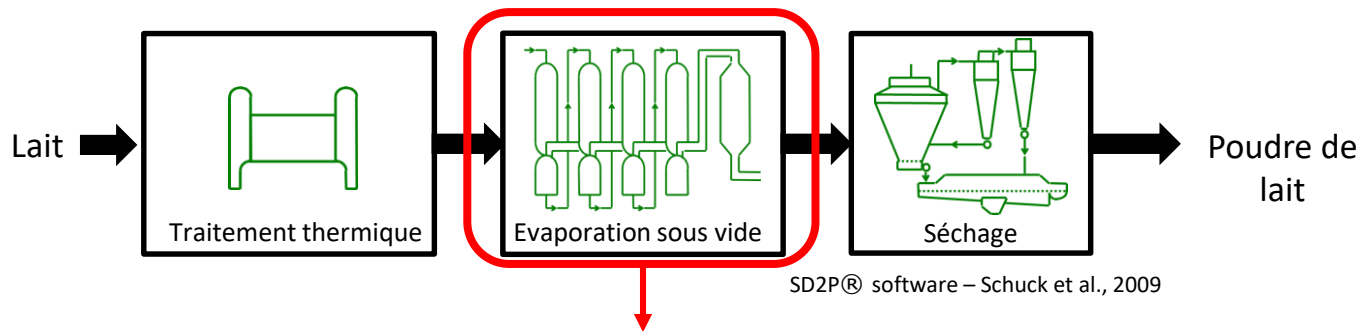
Manque de modèles phénoménologiques des procédés
 → Adaptation des simulateurs de procédés
 → Intégration de connaissances experts
 → analyse statistique



Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 1: Evaporation de lait / simulateur



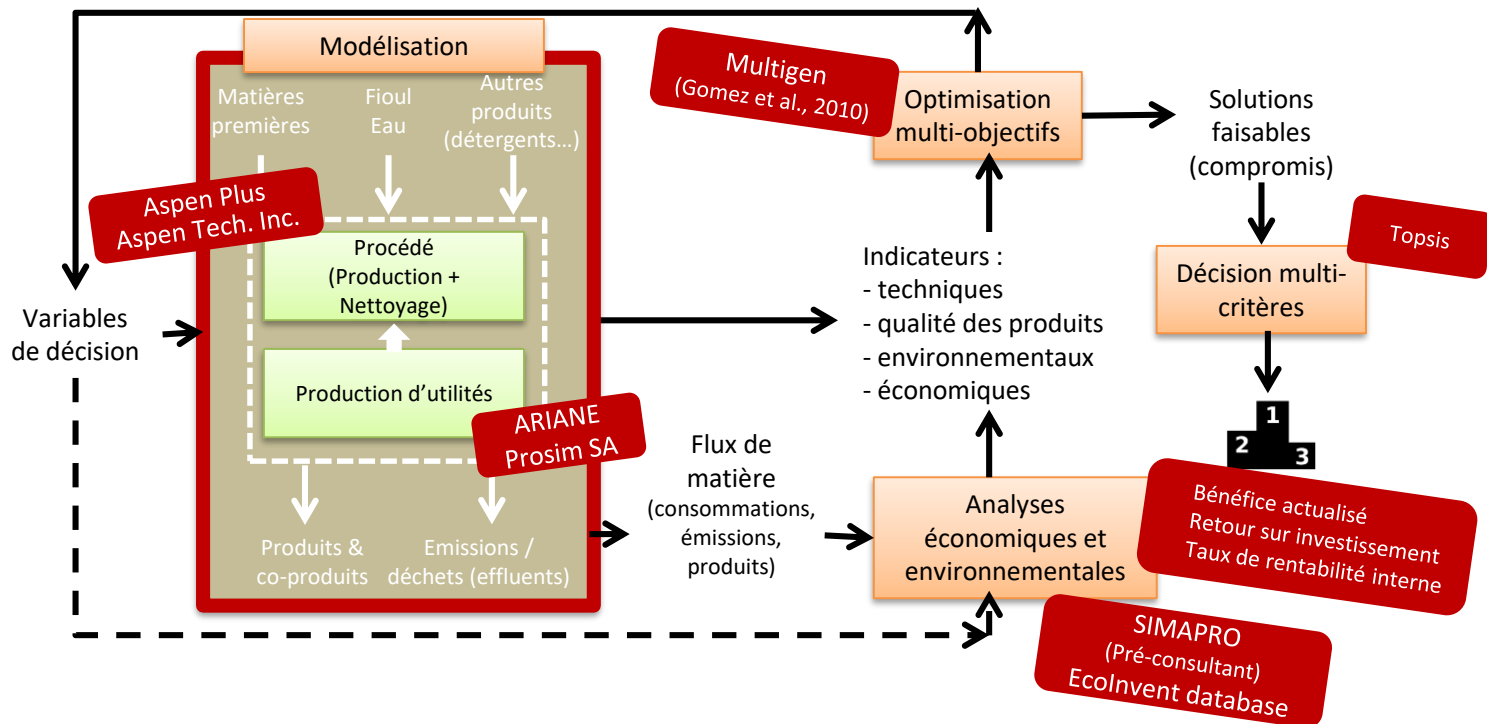
- ❑ > 50% de la consommation énergétique du procédé de concentration / séchage du lait (Jebson, 1991)
- ❑ Plusieurs options de conception de l'évaporateur : nombre d'effets, turbine de production de vapeur, ...
- ❑ Aucune approche holistique de conception d'un évaporateur

- **Utilisation d'un simulateur de procédé « adapté » pour**
 - Concevoir l'évaporateur (nombre d'effets)
 - Choisir la source d'énergie primaire nécessaire pour la production de vapeur

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 1: Evaporation de lait / simulateur



Choix of Aspen Plus

- Couplage facile avec des algorithmes d'optimisation
- Intégration possible de données/corrélations/ modèles dans le software par les utilisateurs

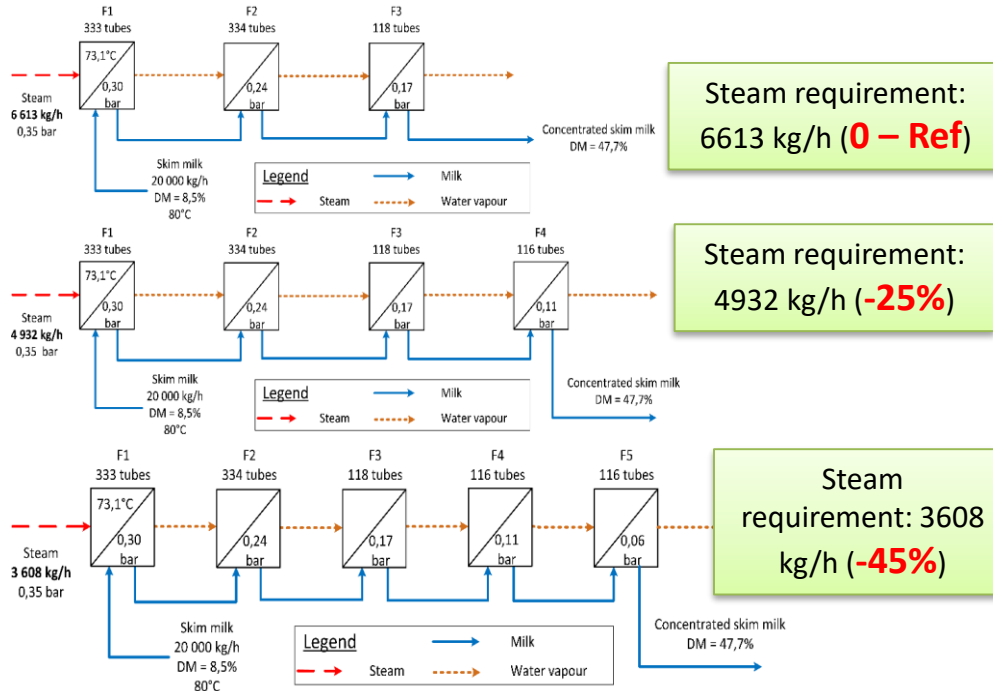
Madoumier et al. JFE 2015
 Madoumier et al., FBP, 2020
 Azzaro-Pantel et al., FBP, 2022

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 1: Evaporation de lait / simulateur

Résultats : nombre d'effets



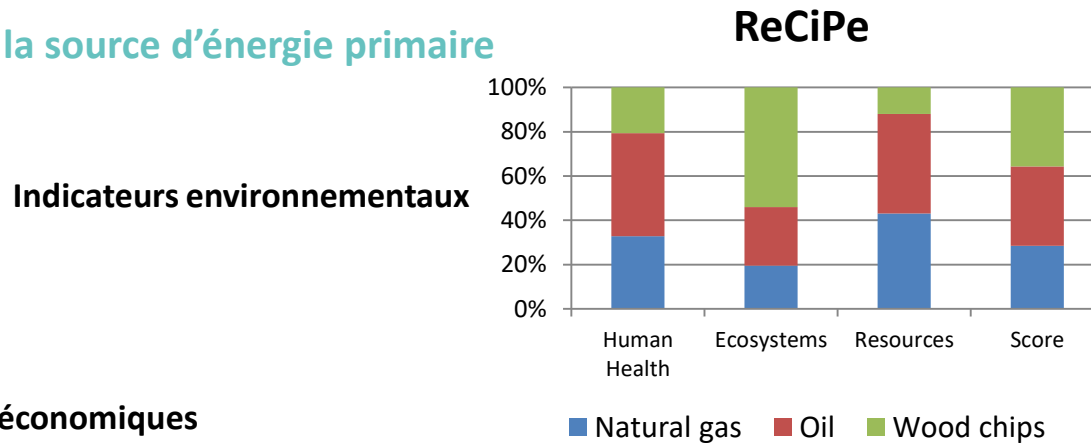
Paramètres du procédé
Evaporateur film tombant
20 t/h of de lait écrémé
50 % Extrait Sec du concentré
Séquences de NEP constantes
Energie primaire d'énergie = gaz
Variables dans la conception
Nombre d'effets([3 ; 4 ; 5])

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 1: Evaporation de lait / simulateur

Résultats : choix de la source d'énergie primaire



Indicateurs économiques

	Bénéfice Actualisé (+) (M€)	Retour sur investissement (-) (an)	Taux de rentabilité interne (+) (%)
Gaz naturel (reference)	8,26	3,6	47
Fioul	9,34 (+13%)	3,4 (-7%)	51 (+9%)
Plaquettes de bois	9,54 (+16%)	4,0 (+9%)	42 (-10%)

Madoumier et al. JFE 2015
 Madoumier et al., FBP, 2020
 Azzaro-Pantel et al., FBP, 2022

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 1: Evaporation de lait / simulateur

Résultats : choix de la source d'énergie primaire

Analyse multi-critères (M-TOPSIS)

	Combustible		
	Gaz naturel	Fioul	Plaquettes de bois
Bénéfice actualisé, Score unique ReCiPe	1	3	2
3 indicateurs économiques, 3 scores ReCiPe	2	3	1

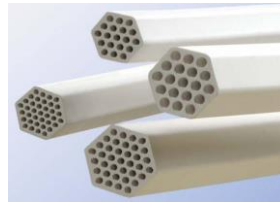
Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 2: Microfiltration de lait / intégration de connaissances

Microfiltration
0.1 μm de lait

- ❑ Fractionnement des 2 groupes majeurs de protéines du lait
- Fabrication fromagère, production d'ingrédients)



UTP, Uniform
Transmembrane Pressure
System (Sandblöm, 1974)

Membrane with
permeability gradient



Spiral wound

- ❑ Nombreuses options de conception → Objectifs contradictoires
- ❑ Pas d'optimisation de la conception de MF intégrant ces objectifs contradictoires
- ❑ Manque de modèles prédictifs de la MF

Apport de
l'Intelligence
artificielle



- Utilisation d'approches d' « Intégration de connaissances expertes »
 - Concevoir la microfiltration (choix de membranes et modes de conduite)

Hoballah et al. Expert Syst. (2018)

Belna et al. JFE, 2020

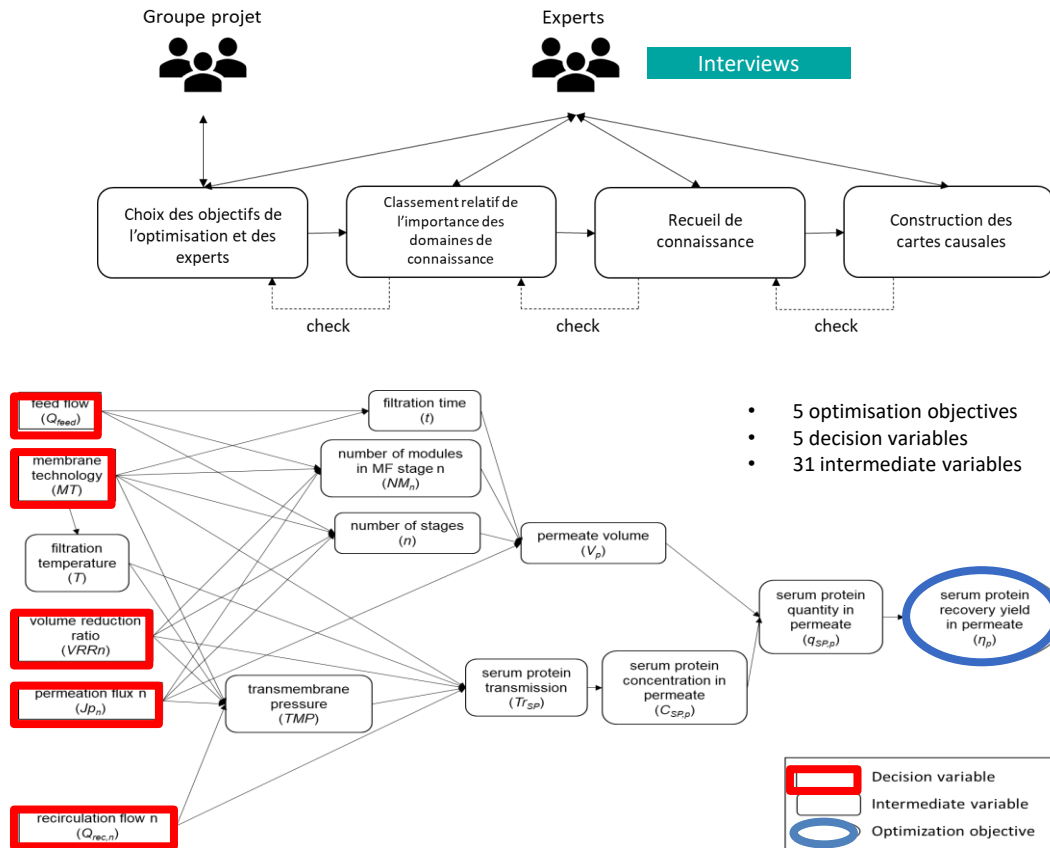
Belna et al, ESWA, 2022

Baudrit et al., IJAEIS, 2022

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 2: Microfiltration de lait / intégration de connaissances



- 5 optimisation objectives
- 5 decision variables
- 31 intermediate variables

$$\eta_p = \frac{q_{SP,p}}{q_{SP,milk}} = \frac{C_{SP,p} \left(V_{feed} - \left(\frac{V_{feed}}{VRR} \right) \right) \rho_p}{C_{SP,milk} \cdot V_{feed} \cdot \rho_{milk}}$$

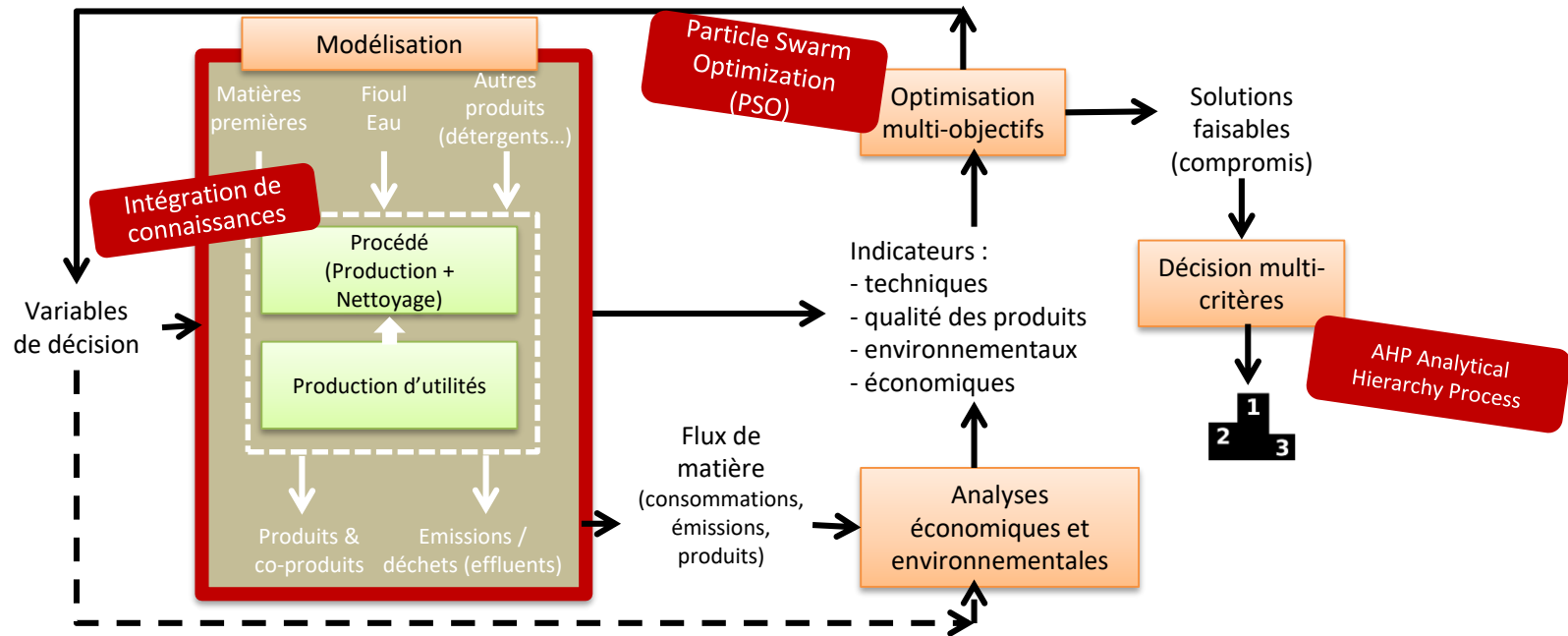
- $\max CD_{CN,r}$
Concentration en caséines dans le rétentat (/ES)
- $\max CD_{SP,p}$
Concentration en protéines de lactosérum dans le perméat (/ES)
- $\max \eta_p$
Taux de récupération en protéines de lactosérum
- $\min CI$
Coût d'investissement
- $\min CPR$
Coût de fonctionnement

Belna et al. JFE, 2020
 Belna et al. ESWA, 2022
 Baudrit et al., IJAEIS, 2022

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

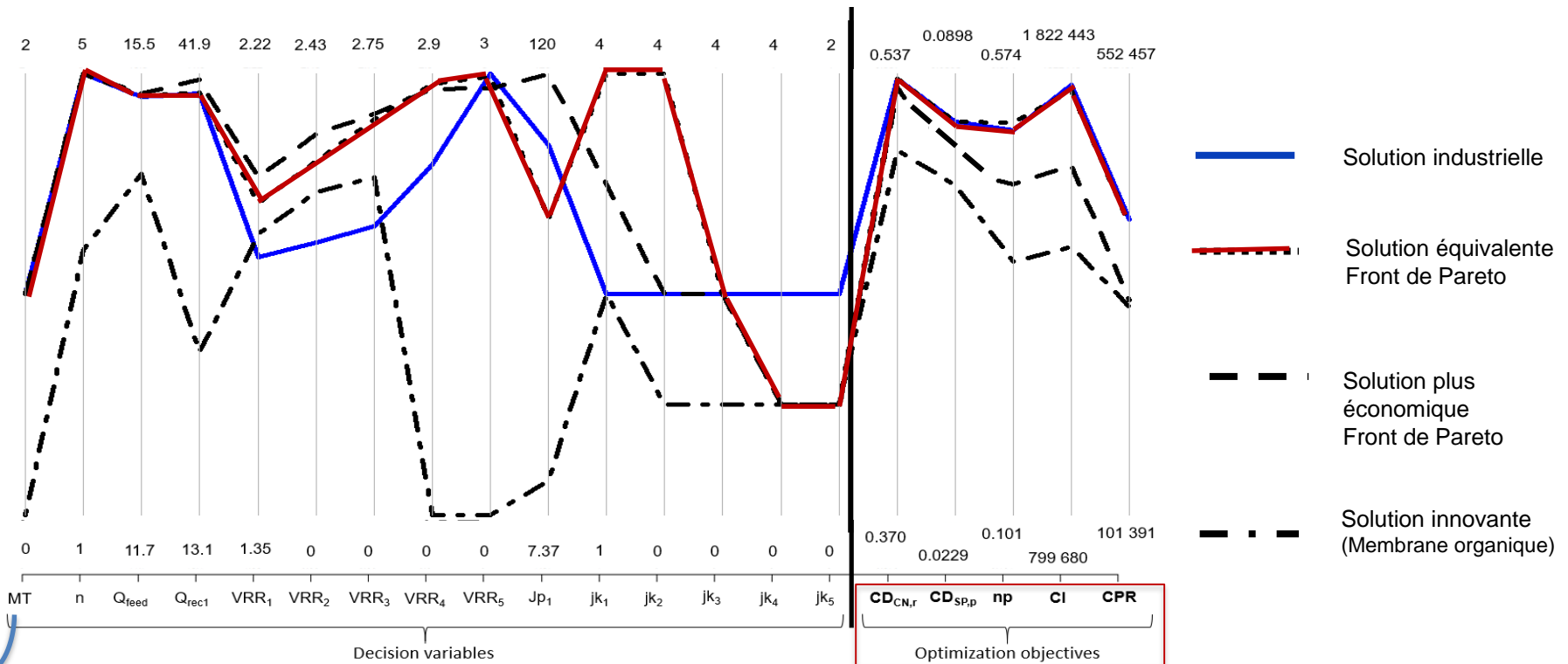
Exemple 2: Microfiltration de lait / intégration de connaissances



Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 2: Microfiltration de lait / intégration de connaissances



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

MT=0 Membrane organique
 MT=1 Membrane céramique GP
 MT = 2 membrane céramique UTP

$\max CD_{CN,r}$

Concentration en caséines dans le rétentat

$\max CD_{SP,p}$

Concentration en protéines de lactosérum dans le perméat

$\max \eta_p$

Taux de récupération en protéines de lactosérum

$\min CI$

Coût d'investissement

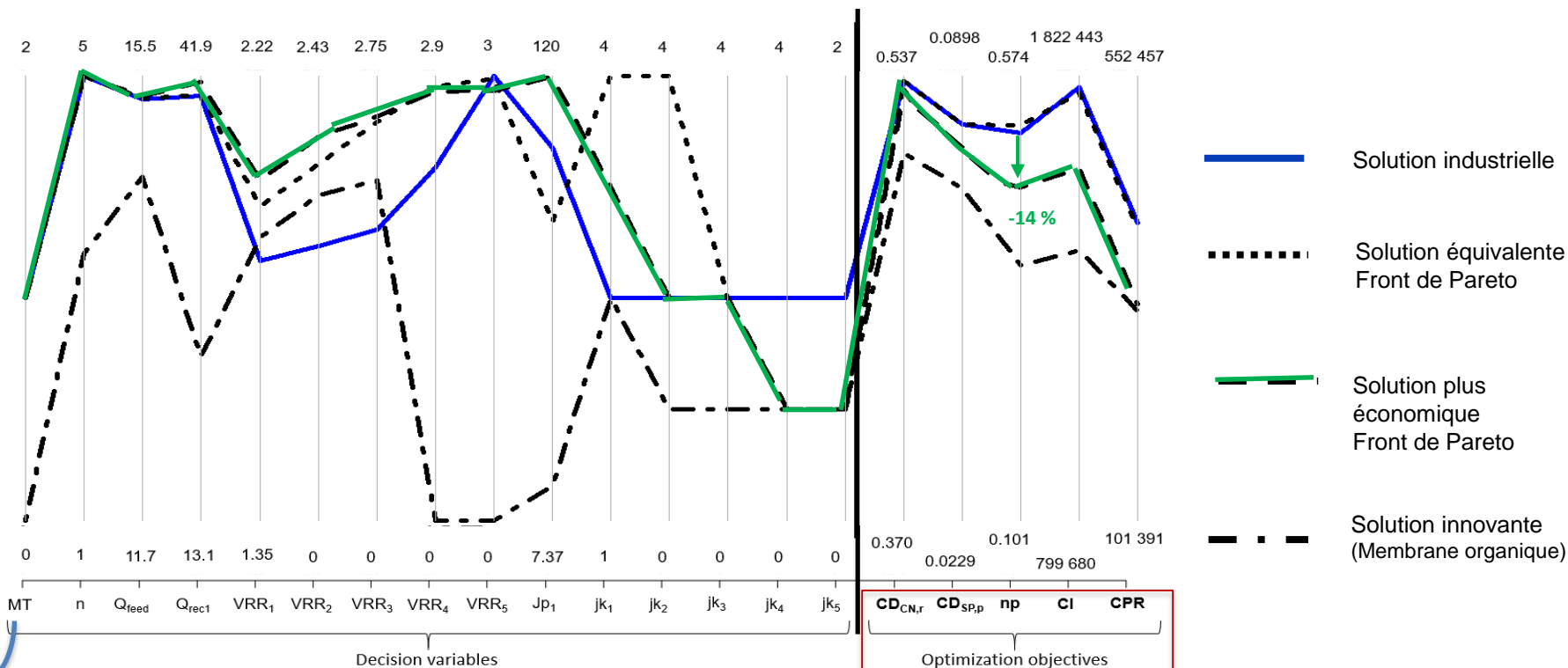
$\min CPR$

Coût de fonctionnement

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 2: Microfiltration de lait / intégration de connaissances



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

MT=0 Membrane organique
 MT=1 Membrane céramique GP
 MT = 2 membrane céramique UTP

$\max CD_{CN,r}$

Concentration en caséines dans le rétentat

$\max CD_{SP,p}$

Concentration en protéines de lactosérum dans le perméat

$\max \eta_p$

Taux de récupération en protéines de lactosérum

$\min CI$

Coût d'investissement

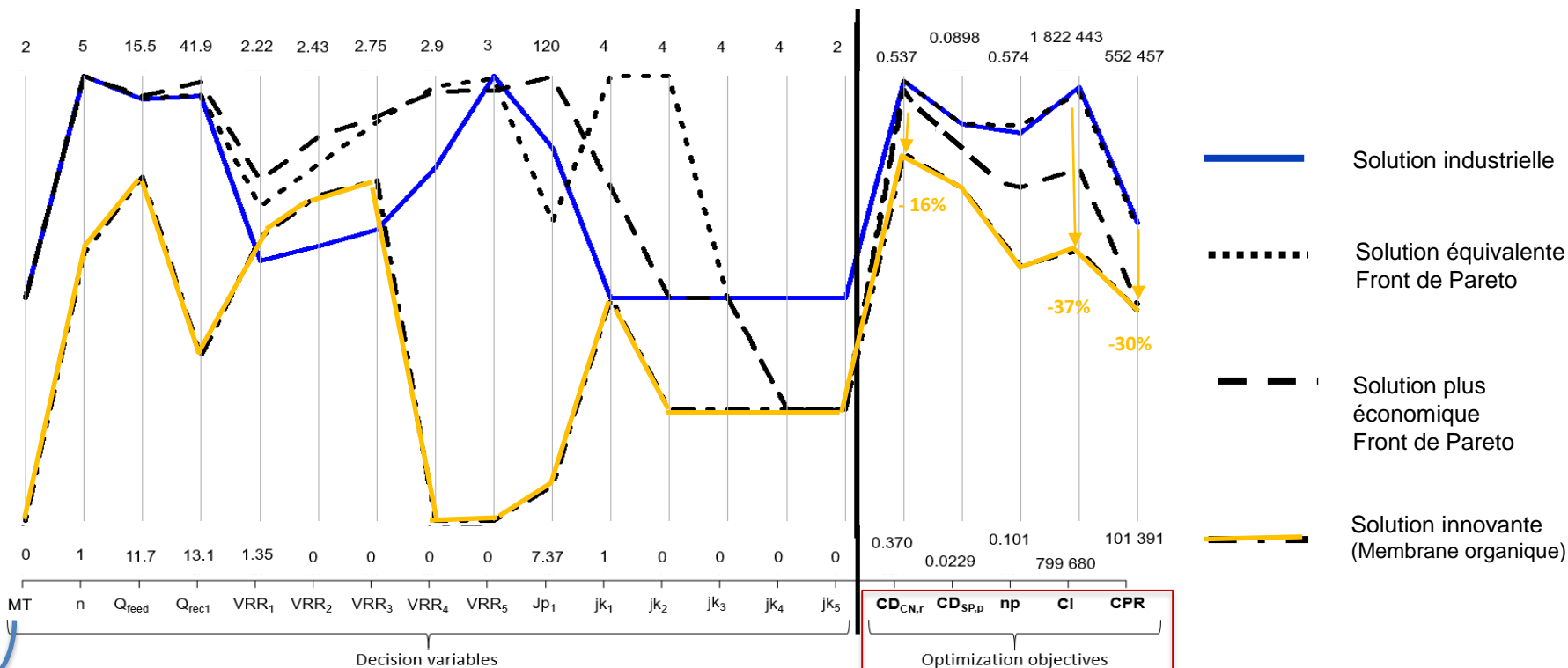
$\min CPR$

Coût de fonctionnement

Stratégie 3

Optimisation multi-objectifs

Exemple 2: Microfiltration de lait / intégration de connaissances



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

MT=0 Membrane organique
 MT=1 Membrane céramique GP
 MT = 2 membrane céramique UTP

$\max CD_{CN,r}$

Concentration en caséines dans le rétentat

$\max CD_{SP,p}$

Concentration en protéines de lactosérum dans le perméat

$\max \eta_p$

Taux de récupération en protéines de lactosérum

$\min CI$

Coût d'investissement

$\min CPR$

Coût de fonctionnement

Eco-conception de procédés alimentaires Émergence < 20 ans

3 approches

- 1/ Minimisation des ressources / intrants
- 2/ Evaluation des procédés par ACV
- 3/ Optimisation multi-objectifs



Vision holistique combinant modélisation, simulation et optimisation

Développer une approche systémique basée sur le couplage entre

- des outils de modélisation des procédés,
- les logiciels d'évaluation environnementale (ex ACV) et économique,
- des méthodes d'optimisation multi-objectif et d'aide à la décision

Remerciements

