



HAL
open science

Eco conception des procédés alimentaires Comment réduire les consommations ?

Geneviève Gésan-Guiziou

► **To cite this version:**

Geneviève Gésan-Guiziou. Eco conception des procédés alimentaires Comment réduire les consommations?. Workshop “ Agroalimentaire: Et si mon entreprise devait survivre dans un monde sans pétrole? ”, Oct 2019, Bruxelles, Belgique. hal-02790694

HAL Id: hal-02790694

<https://hal.inrae.fr/hal-02790694v1>

Submitted on 5 Jun 2020

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.

Eco-conception des procédés alimentaires

Comment réduire les consommations ?

Geneviève Gésan-Guiziou

INRA - Agrocampus Ouest UMR 1253 STLO

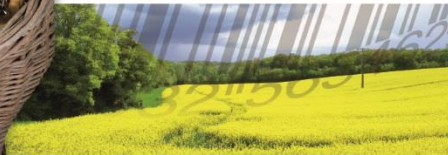
“Science et Technologie du Lait et l’Oeuf”

65, rue de Saint-Brieuc – 35042 Rennes Cedex

Tel. 33 2 99 28 53 25 – Fax 33 2 99 28 53 50

genevieve.gesan-guiziou@inra.fr

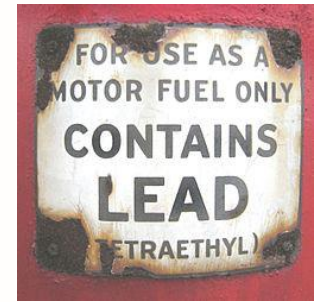
www.rennes.inra.fr/stlo





Thomas Midgley, Jr
(1889-1944)
Ingénieur mécanicien et
chimiste américain
(170 brevets)

Un exemple historique

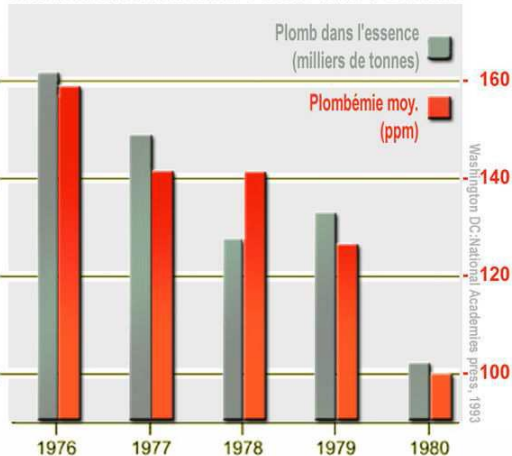


- Découverte des propriétés du **plomb tétraéthyle** (principal composant des produits antidétonants pour les carburants)

Mais → Saturnisme parmi les ouvriers de General Motors

Plomb Tétraéthyle: Produit persistant, non-biodégradable
Interdit dans l'UE depuis 2000

Corrélation Plombémie / Plomb dans l'essence



Source : National Research Council ; Measuring Lead exposure in infants, children and other sensitive populations, Washington DC:National Academies press, 1993

- « Inventeur » du **fréon** (chlorofluorocarbures ou CFC, gaz réfrigérants non inflammables): à l'époque, les fuites de réfrigérateurs (ammoniac (NH_3), chlorométhane (CH_3Cl); dioxyde de soufre (SO_2)) causaient de nombreux morts

Mais → . Responsable du « Trou dans la couche d'ozone »
. ↗ cas de mélanomes dans les pays les plus exposés

. Interdit par plusieurs protocoles internationaux depuis les années 80s



John R. Mc Neill
(1954 -)
Historien de
l'environnement

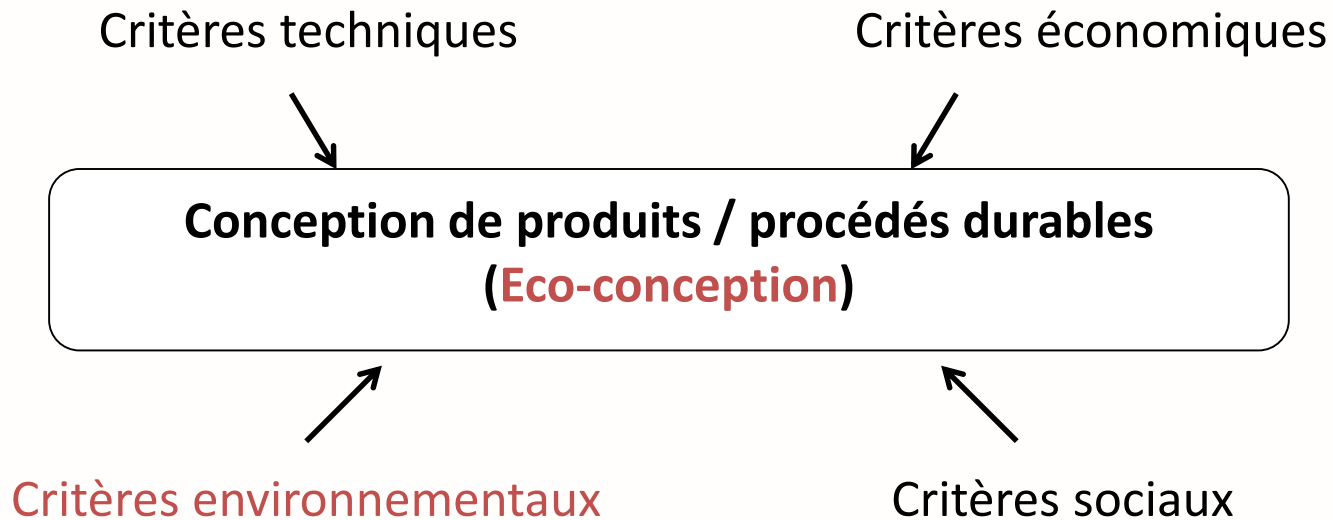
Ce que l'histoire retient ...

« Thomas Midgley Jr (...) eut plus d'impact sur l'atmosphère qu'aucun être vivant quelconque dans l'histoire de la planète »

Ce que nous retiendrons ...

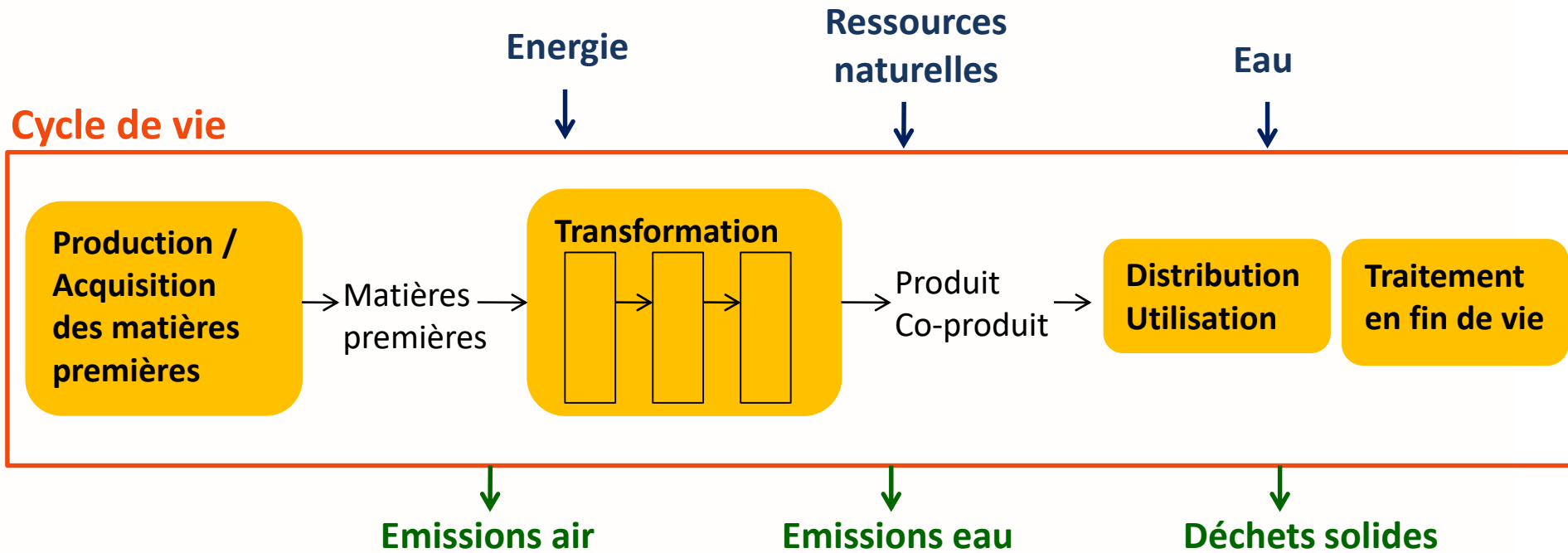
- ❖ Ne pas se concentrer uniquement sur les performances économiques et technologiques d'une innovation
- ❖ Prendre en compte
 - les performances environnementales (santé, écologie)
 - l'impact sur la société
 - le devenir du produit lors de son utilisation et en fin de vie

Qu'est ce que l'éco-conception ?



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

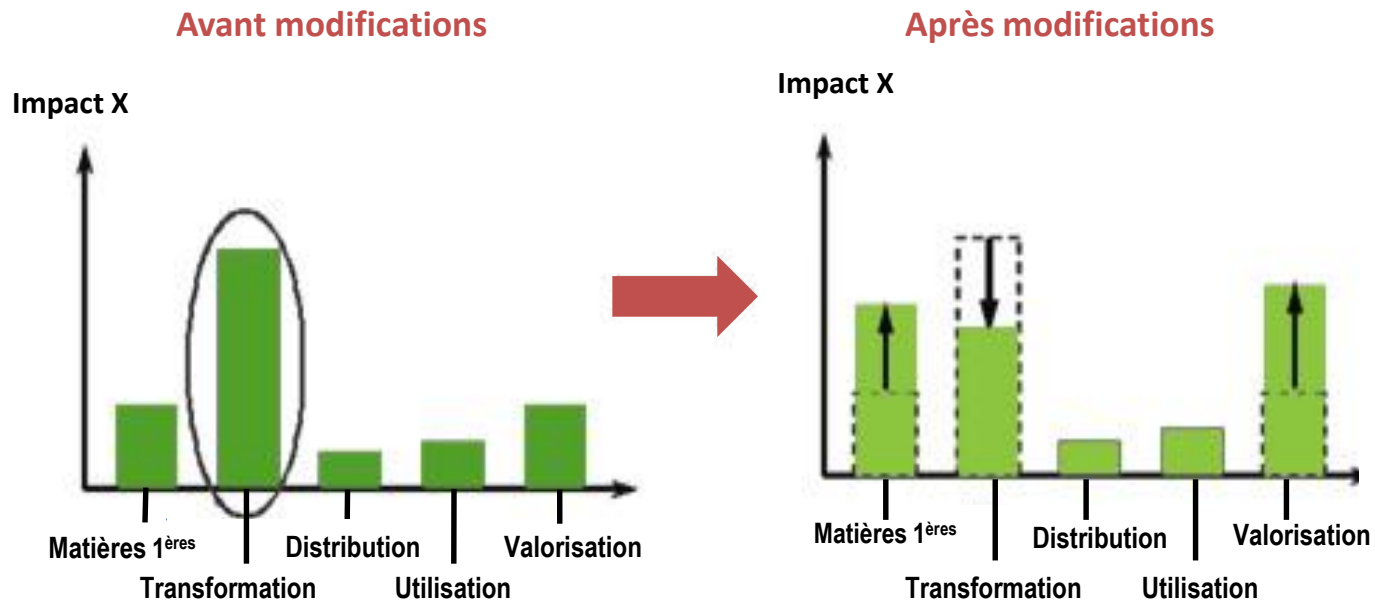
Eco-conception : Définition (1)



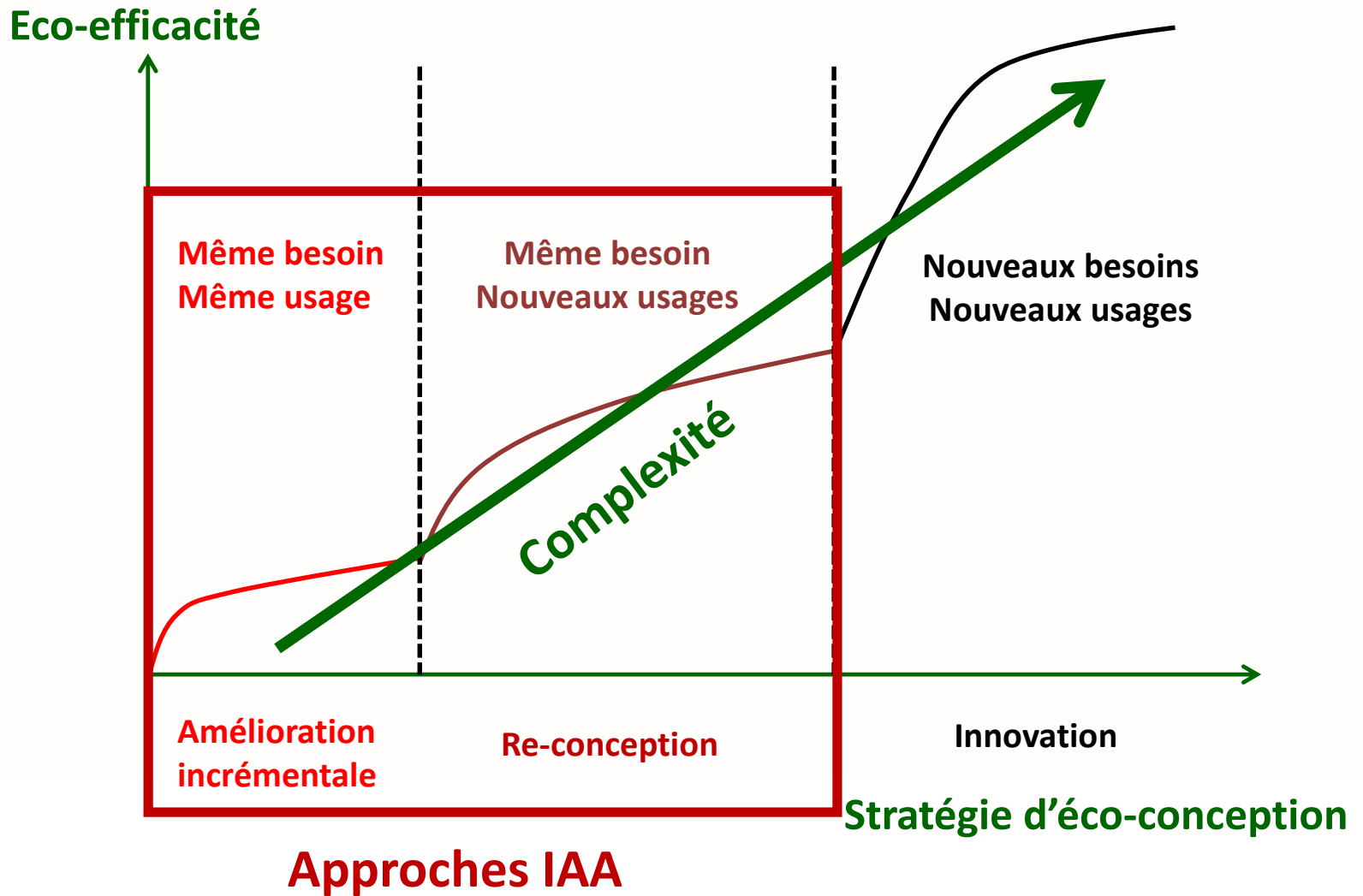
Approche **multicritère**
prise en compte sur tout le **cycle de vie** du produit / du procédé
Démarche **préventive**

Eco-conception : Définition (2)

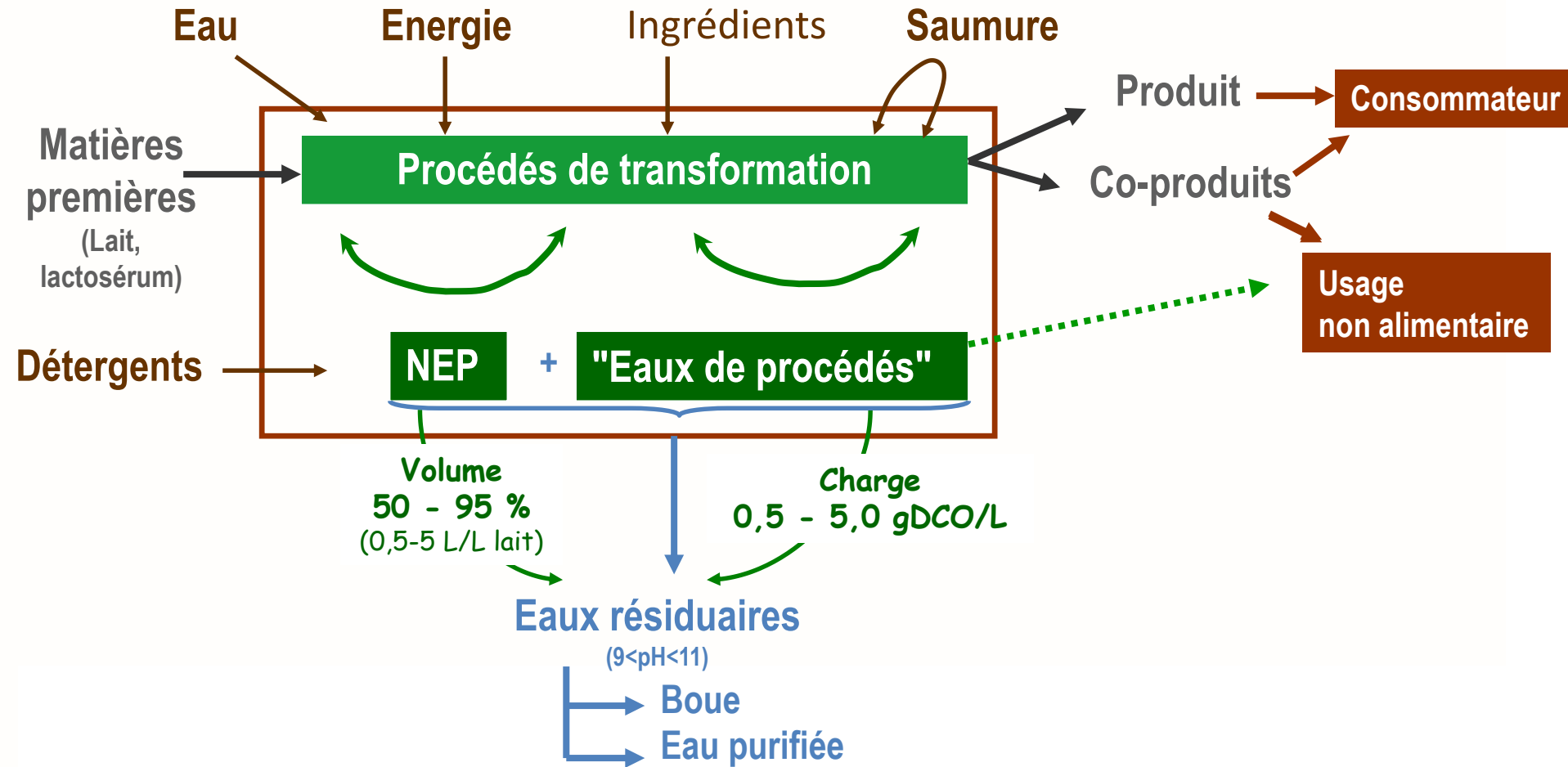
Identifier les **points sensibles** et les voies d'amélioration, en évitant ou en arbitrarrant les **déplacements de pollution**



Eco-conception : différents niveaux d'ambition



L'industrie laitière



Approche préventive

Approche curative

Quelles démarches en éco-conception ?

Quelques exemples

→ **Incrémental**

- Au niveau des opérations de transformation
 - Opérations unitaires
 - Conduite / Maîtrise des opérations unitaires de transformation (ex: opération de filtration, séchage)
- Au niveau du traitement des effluents / fluides techniques
 - Réduction des phases de nettoyage par meilleur suivi et régulation (ex: échangeur de chaleur)
 - Régénération des fluides techniques (solutions détergentes)

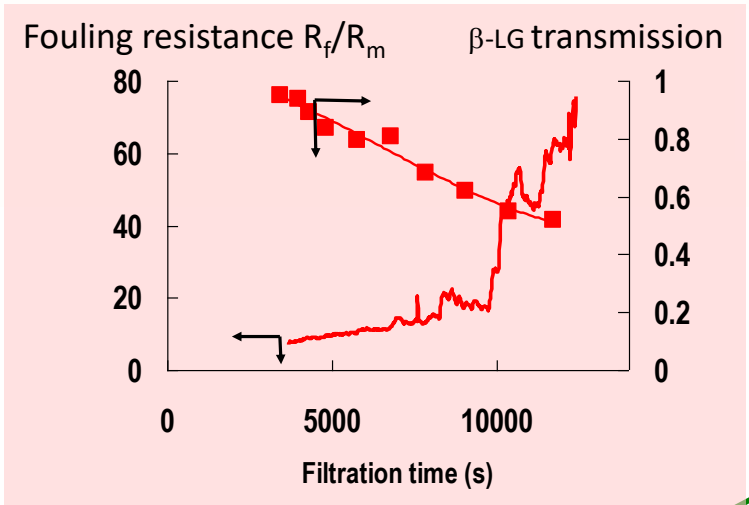
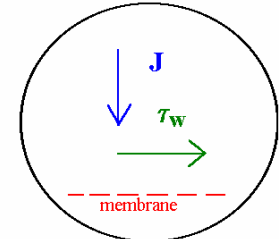
Re-conception

- Au niveau des opérations unitaires (innovations technologiques)
- Au niveau des procédés (Agencement des opérations unitaires)

Evaluation des impacts environnementaux des procédés, évaluation des opérations les plus génératrices d'impacts; proposition de voies alternatives (ex: Analyse de cycle de vie : optimisation multi-critères)

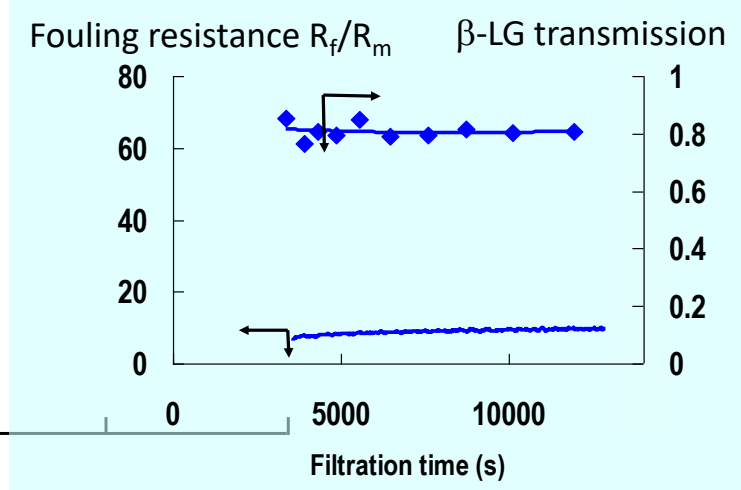
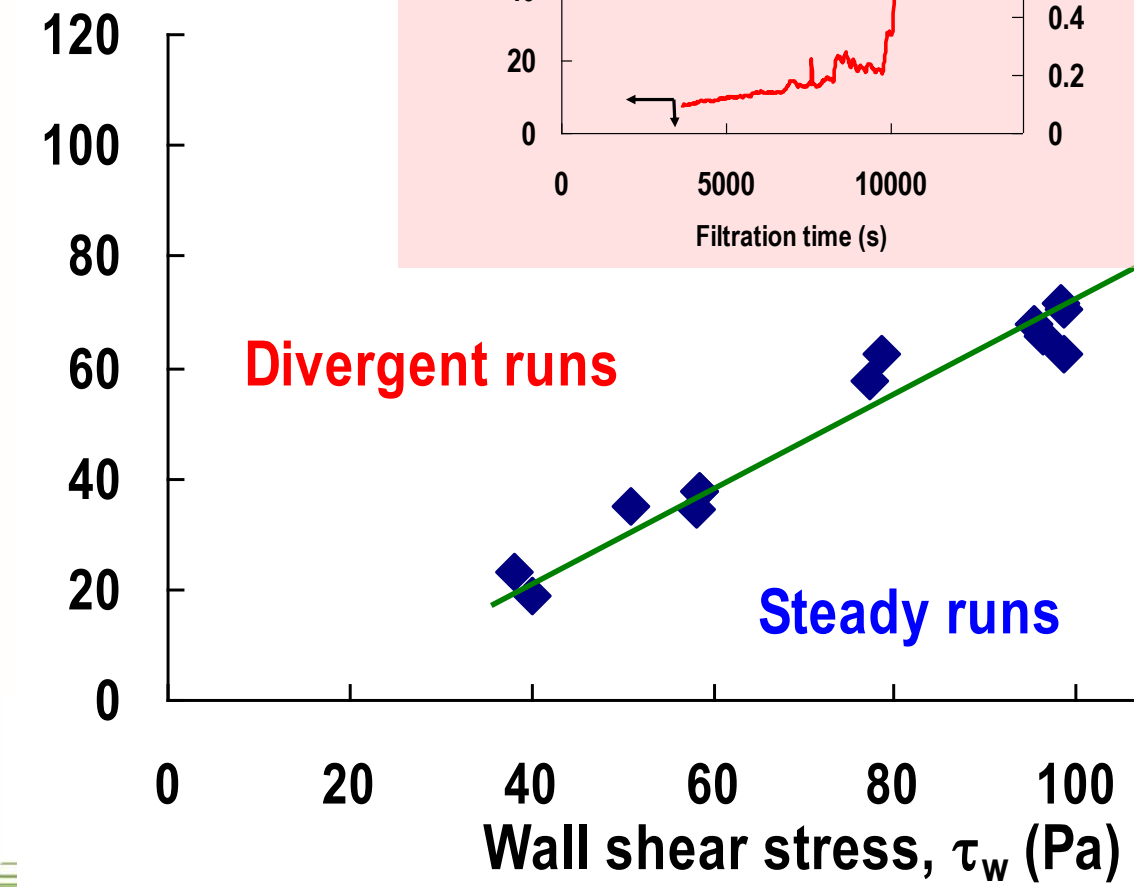
Casein micelles properties & Microfiltration performances

Example : Critical Hydrodynamic Conditions



$J = 76 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$
 $\tau_w = 100 \text{ Pa}$

Permeation flux, J



$(J/\tau_w)_{crit}$

$J = 38 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$
 $\tau_w = 100 \text{ Pa}$

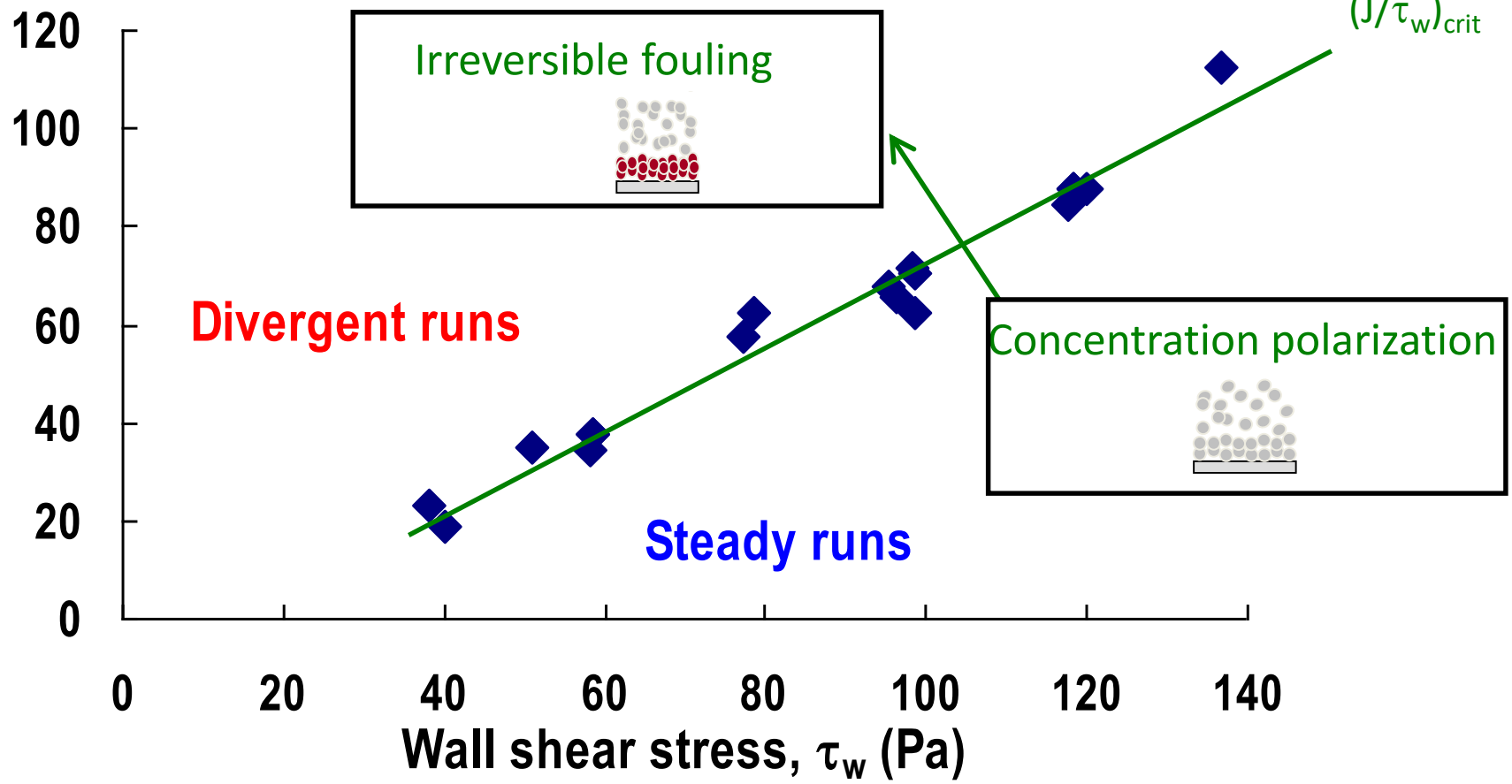
Ceramic membrane 0.1 μm , UTP system, VRR=2, T= 50°C
 Le Berre et Daufin, 1996; Gésan-Guiziou *et al.*, 1999; 2000

Casein micelles properties & Microfiltration performances

Example : Critical Hydrodynamic Conditions

Irreversible deposition of casein micelles governs separation (permeability, protein transmission)

Permeation flux, J

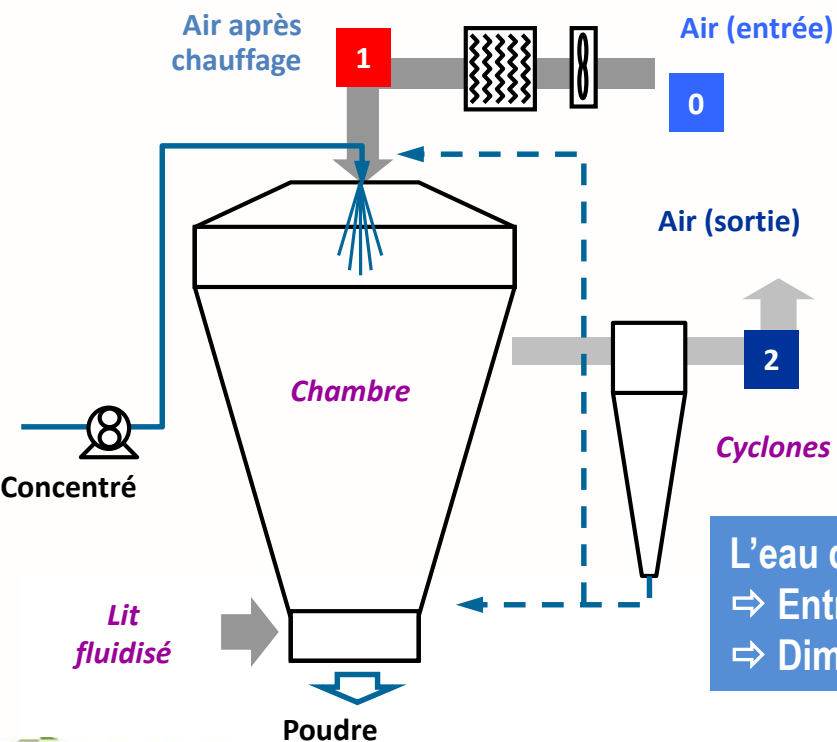


Kerasep 0.1 μ m, UTP system, VRR=2, T= 50°C
Gésan-Guiziou *et al.*, 1999

Logiciel d'aide à la détermination des paramètres de séchage par atomisation

Pourquoi ?

- Pas de méthodes permettant de déterminer *a priori* les paramètres de séchage et les propriétés des poudres => nécessité d'essais complexes et coûteux
- Cause: Séchage non isenthalpe (\neq séchage d'un eau "pure" dans des conditions idéales)



1 → 2 Séchage non isenthalpe

Causes :

- Pertes énergétiques mesurables
- Chaleur latente d'évaporation non constante

L'eau du produit est 'liée' aux constituants à des degrés variables
⇒ Entraînement nécessite un surcroît d'énergie
⇒ Diminution des performances de séchage (écart à l'isenthalpe)

Logiciel d'aide à la détermination des paramètres de séchage par atomisation

Question

- Comment évaluer le surcroît d'énergie latente à apporter pour compenser la liaison des molécules d'eau/ matière ?
- Comment prédire les paramètres de séchage et les caractéristiques du produit ?

Difficulté

- Complexité de la technologie
- Restrictions d'accès et de mesure du séchage d'une gouttelette dans la chambre

Originalité

- Combiner bilans matière / énergie à 2 échelles:

Echelle globale : séchage par désorption + « boîte noire »

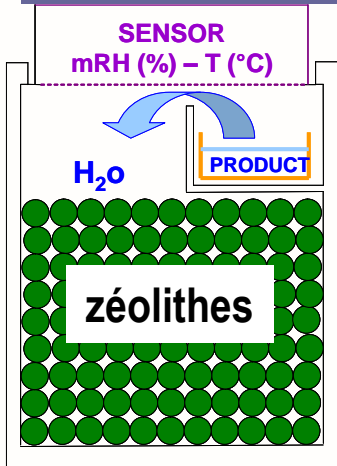
=> paramètres du séchage

Echelle locale : Reaction Engineering Approach (REA)

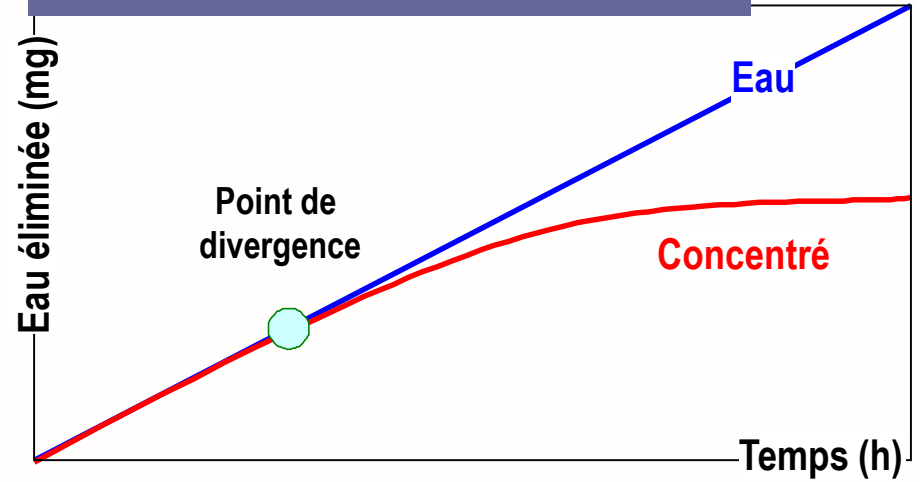
=> paramètres du produit (température et humidité finale de la poudre)



① Zéodratation



② Cinétique d'élimination d'eau

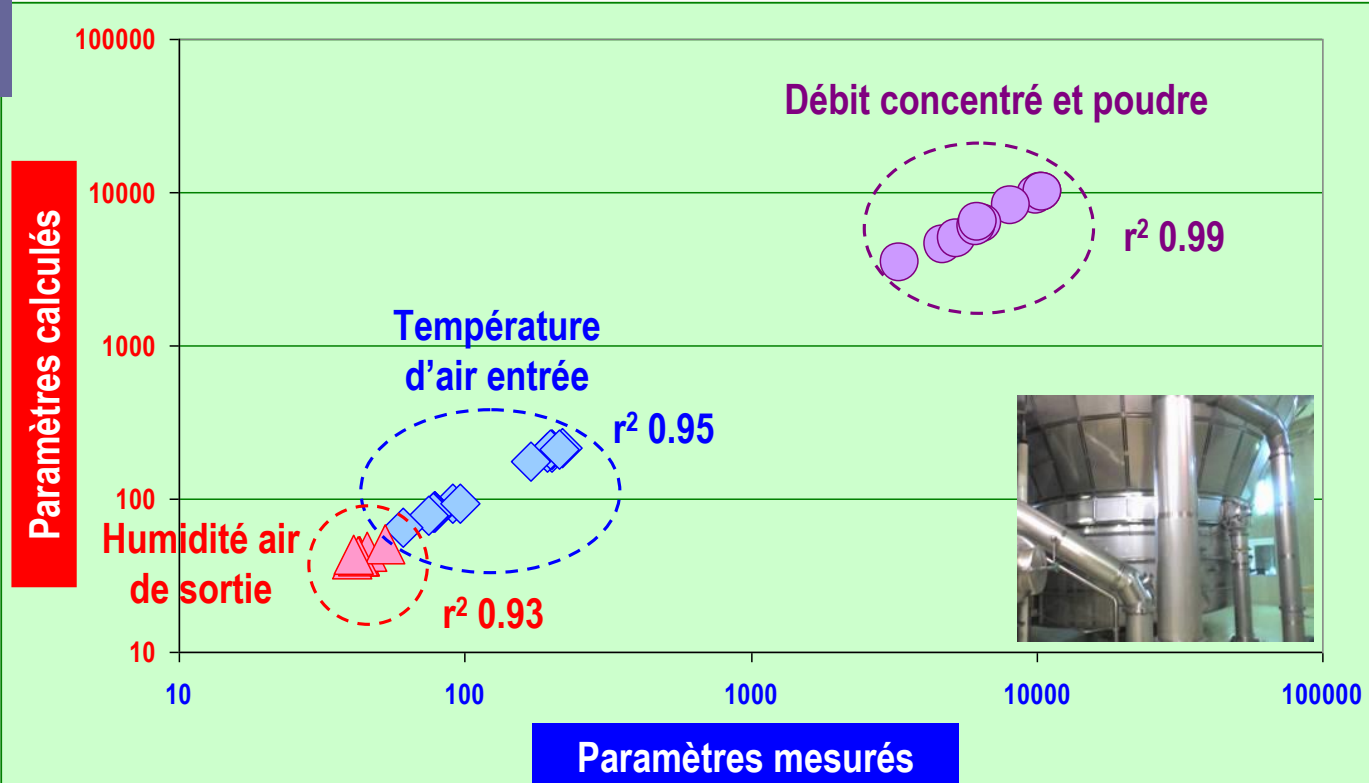


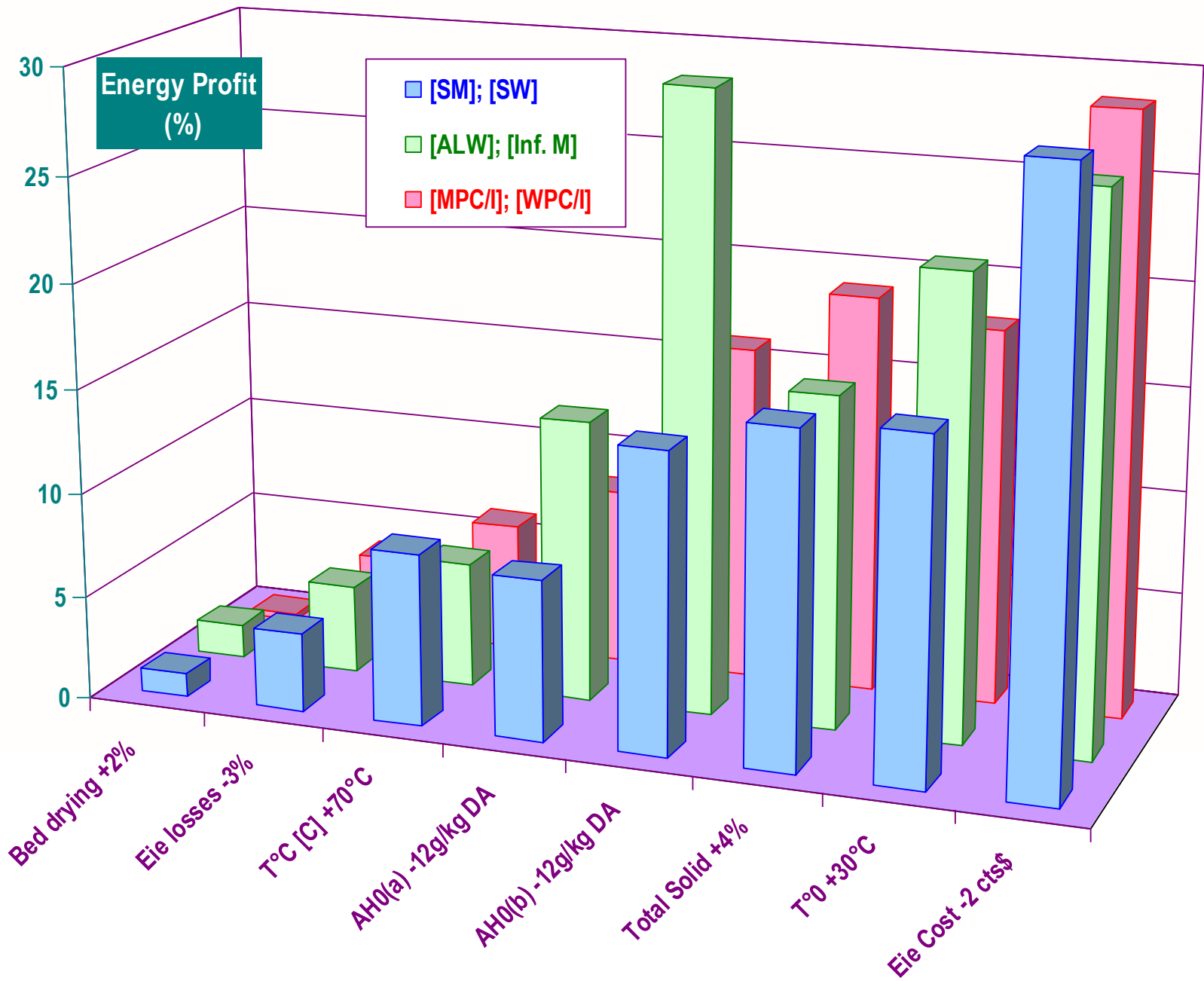
③ Bilan d'énergie

SD2P
Spray Drying Parameters
Simulation & Determination

④ Validation

- 50 produits testés
- 25 séchoirs de 5 kg.h⁻¹ à 6 tonnes.h⁻¹ de capacité évaporatoire





Quelles démarches en éco-conception ?

Quelques exemples

Incrémental

- Au niveau des opérations de transformation
 - Opérations unitaires
 - Conduite / Maîtrise des opérations unitaires de transformation (ex: opération de filtration, séchage)
- – Au niveau du traitement des effluents / fluides techniques
 - Réduction des phases de nettoyage par meilleur suivi et régulation (ex: échangeur de chaleur)
 - Régénération des fluides techniques (solutions détergentes)

Re-conception

- Au niveau des opérations unitaires (innovations technologiques)
- Au niveau des procédés (Agencement des opérations unitaires)

Evaluation des impacts environnementaux des procédés, évaluation des opérations les plus génératrices d'impacts; proposition de voies alternatives (ex: Analyse de cycle de vie : optimisation multi-critères)

Rationalisation du NEP

Objectifs

- Organiser, gérer selon des raisonnements et/ou des modes de calculs
Création d '« **une boîte à outils d'aide à la décision** » = capteurs, traceurs, traitement de données

POUR

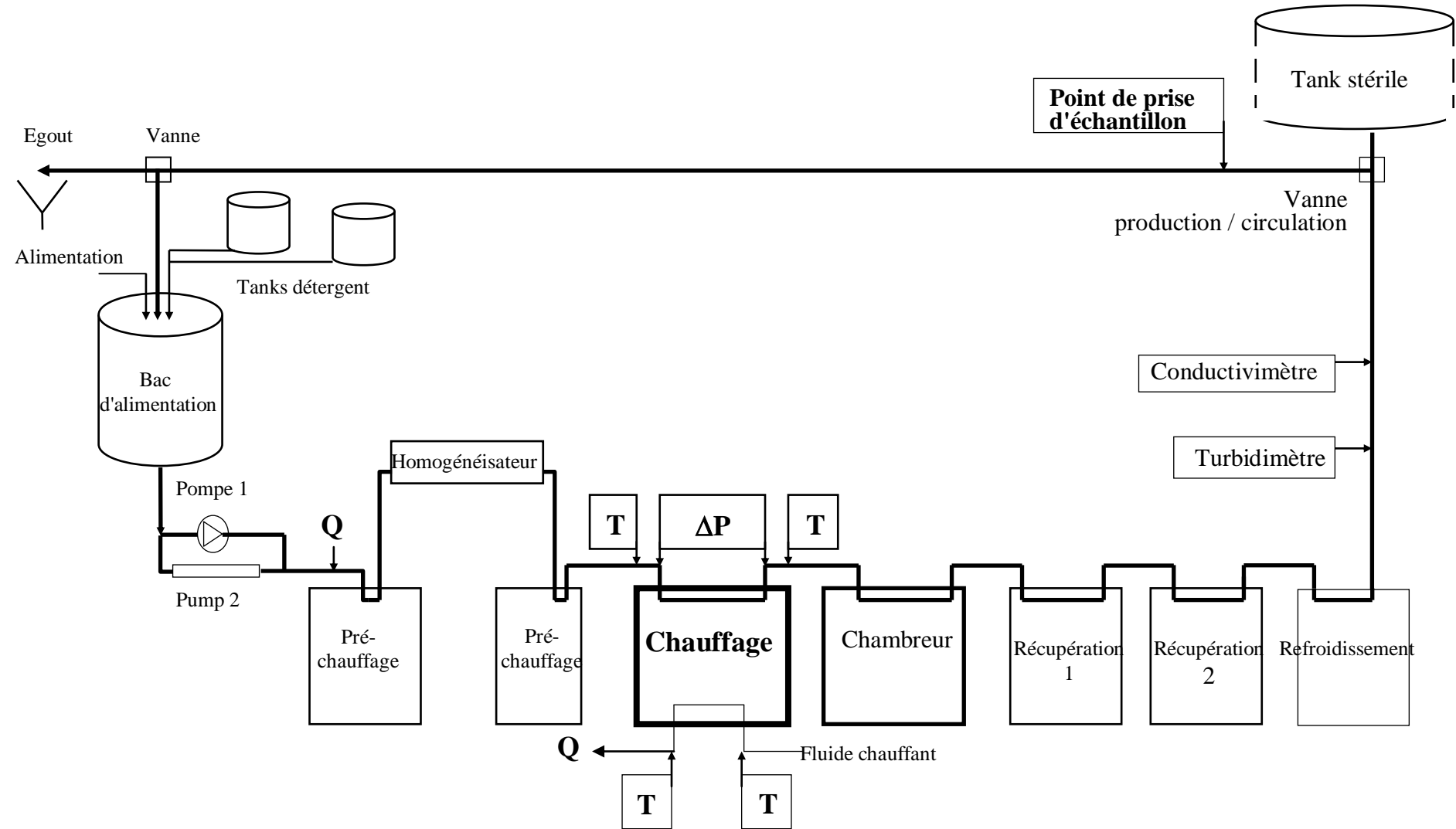
un NEP moins coûteux avec une efficacité maintenue, voire améliorée

- Réduire le durée totale du NEP
(conception de l'installation; réduction de la durée des phases successives)
- Réduire le volume des rejets
(diminution des durées; tri avant recyclage, réutilisation, valorisation ultérieure)

Stratégie pour maîtriser NEP

- **Analyse -> Maîtrise de l'existant**
 - **Etape 1: connaissance équipement et procédé = plan global de l'installation**
 - **Etape 2: capteurs (installation, étalonnage, incertitudes); traceurs**
 - **Etape 3: base de données Excel**
 - Conception base
 - Acquisition: capteurs; traceurs
 - **Etape 4: outils pour maîtriser la gestion du NEP = exploitation**
 - Traitement des données
 - Contrôle - commande séquence révisée
 - Compromis durée encrassement - durée nettoyage
- **Prospective**
 - **Valorisation des fluides: recyclage, réutilisation**

Exemple : stérilisation d'une crème dessert chocolat



Capteurs, traceurs pertinents /phase

Phase	Fin opération	Tri
Production		
Lancement	ES, (Turbidité, Conductivité)	Turbidité, (Conductivité)
Production	$\Delta P, R_f, P_{tm}$	
Nettoyage		
Pousse et premier rinçage	Conductivité, (Turbidité)	Conductivité, (Turbidité)
NaOH	$\Delta P, R_N, PC, (DCO)$	
HNO ₃	Ca (perméat), (P _{tm})	
Rinçages détergents (intermédiaires; final)	Conductivité	Conductivité

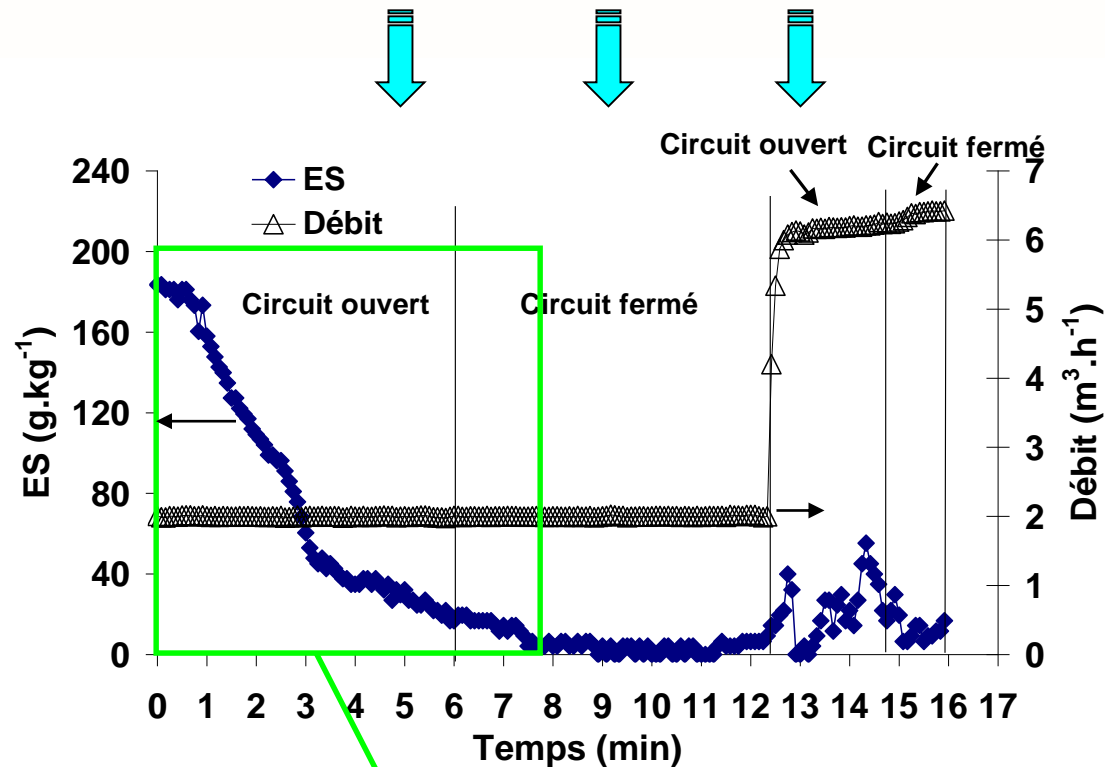


➤ Taux de colmatage, α

$$\alpha = \frac{D_0 - D}{D_0} \times 100$$

Etape 4: Traitement des données

Pousse et premier rinçage: Fin d'opération + Tri



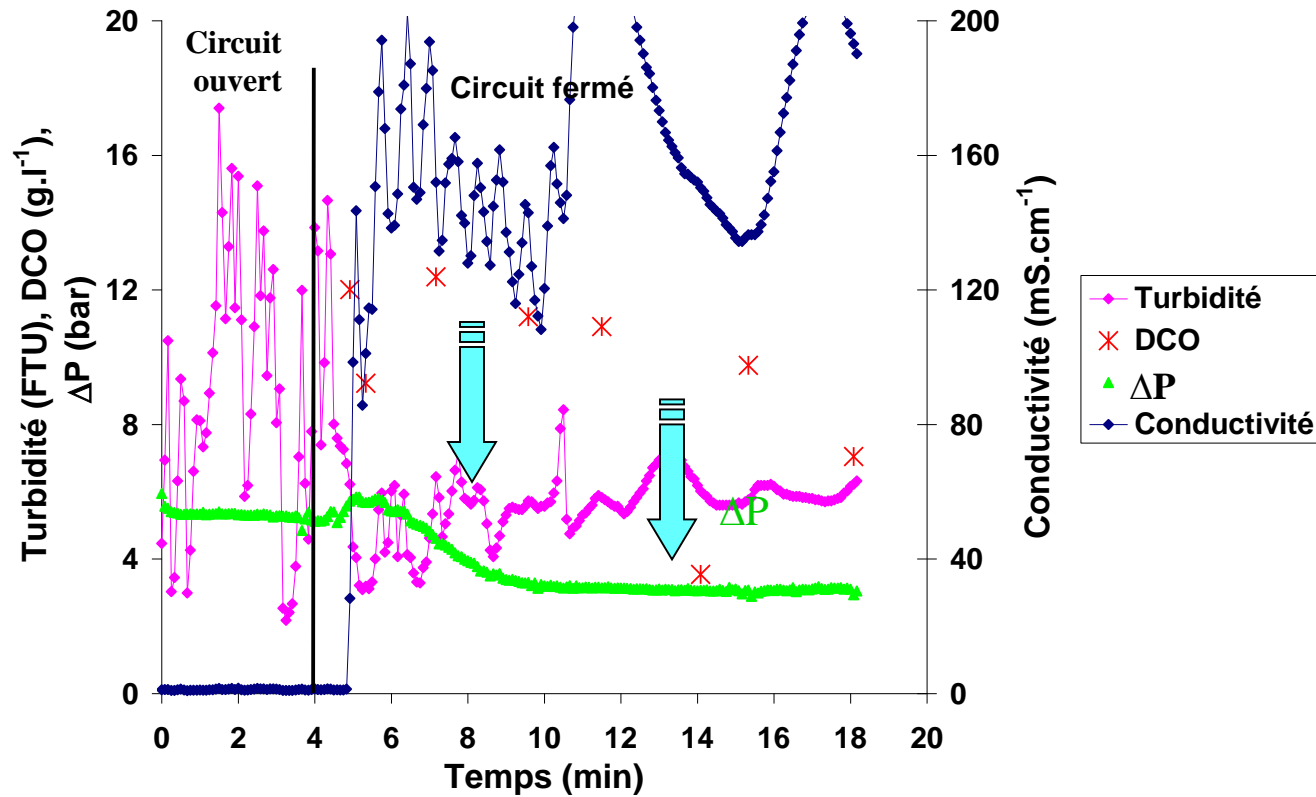
$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = A_i - k_i \times t ; (i=1,2,3) ; r^2 > 0,93$$

Paramètre opératoire majeur: cisaillement paroi

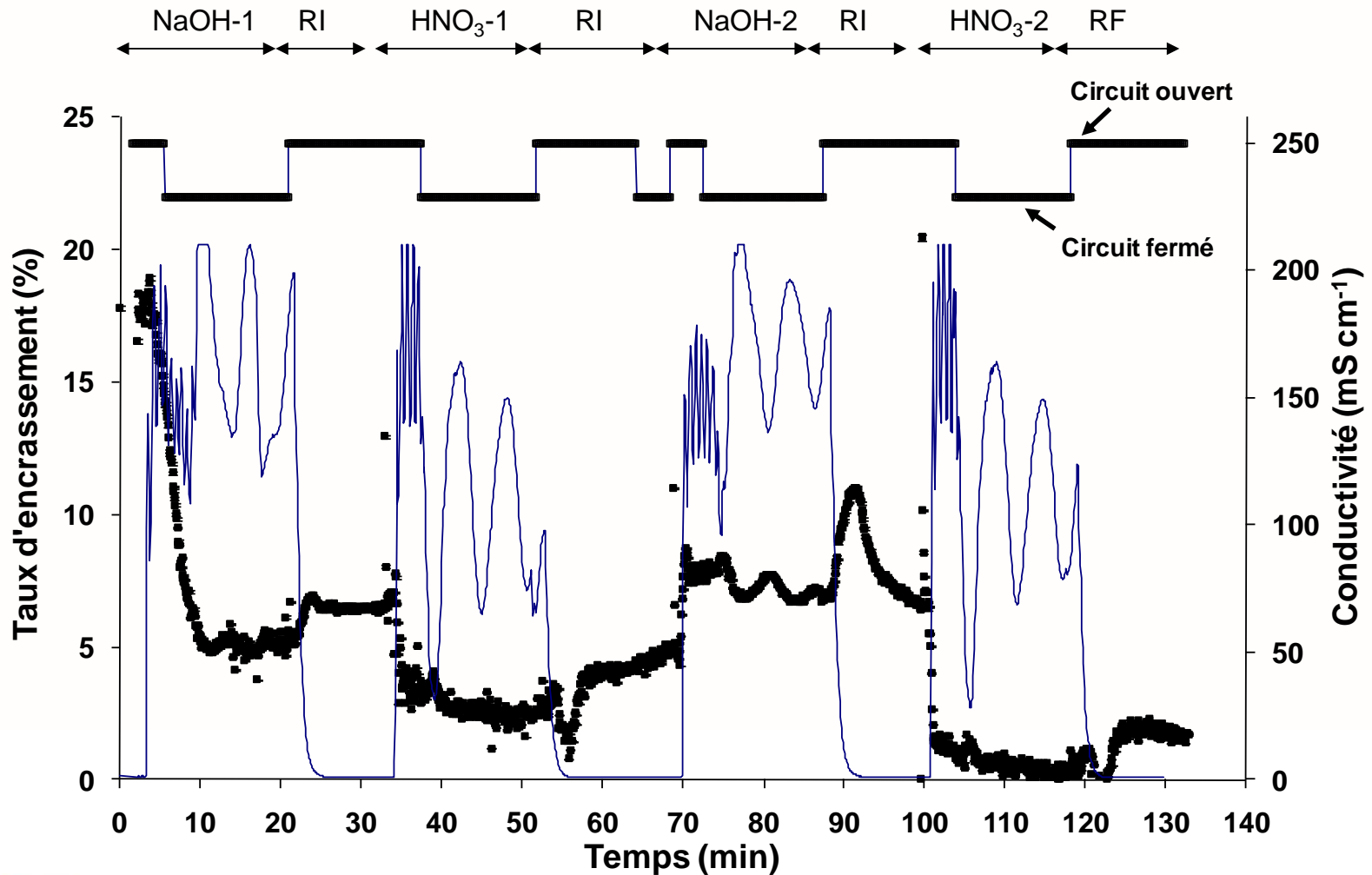
Etape 4: Traitement des données

Nettoyage NaOH : Fin opération + Tri

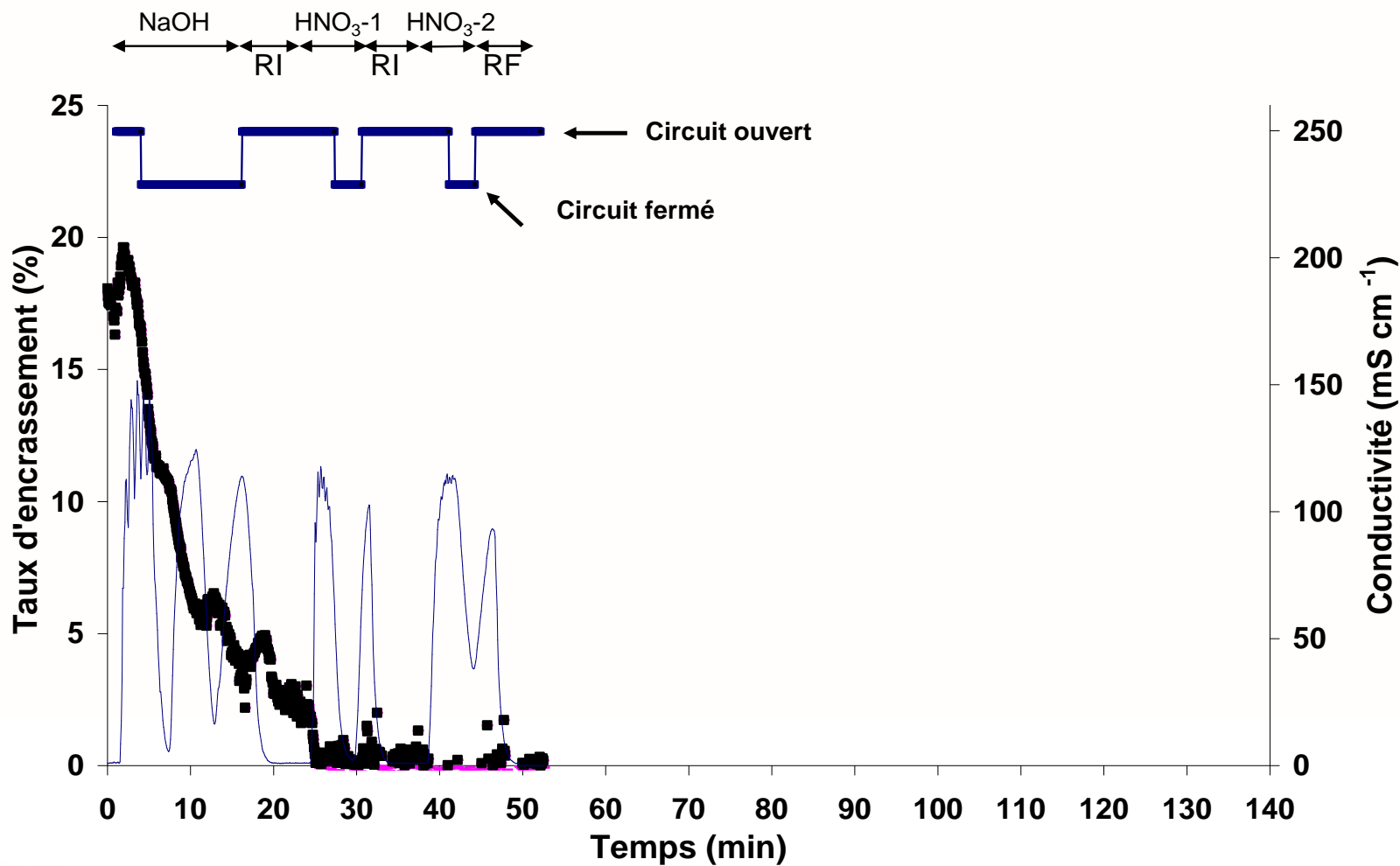
Critère: ΔP ou α stationnaire



Exemple stérilisateur crème Chocolat – Situation initiale



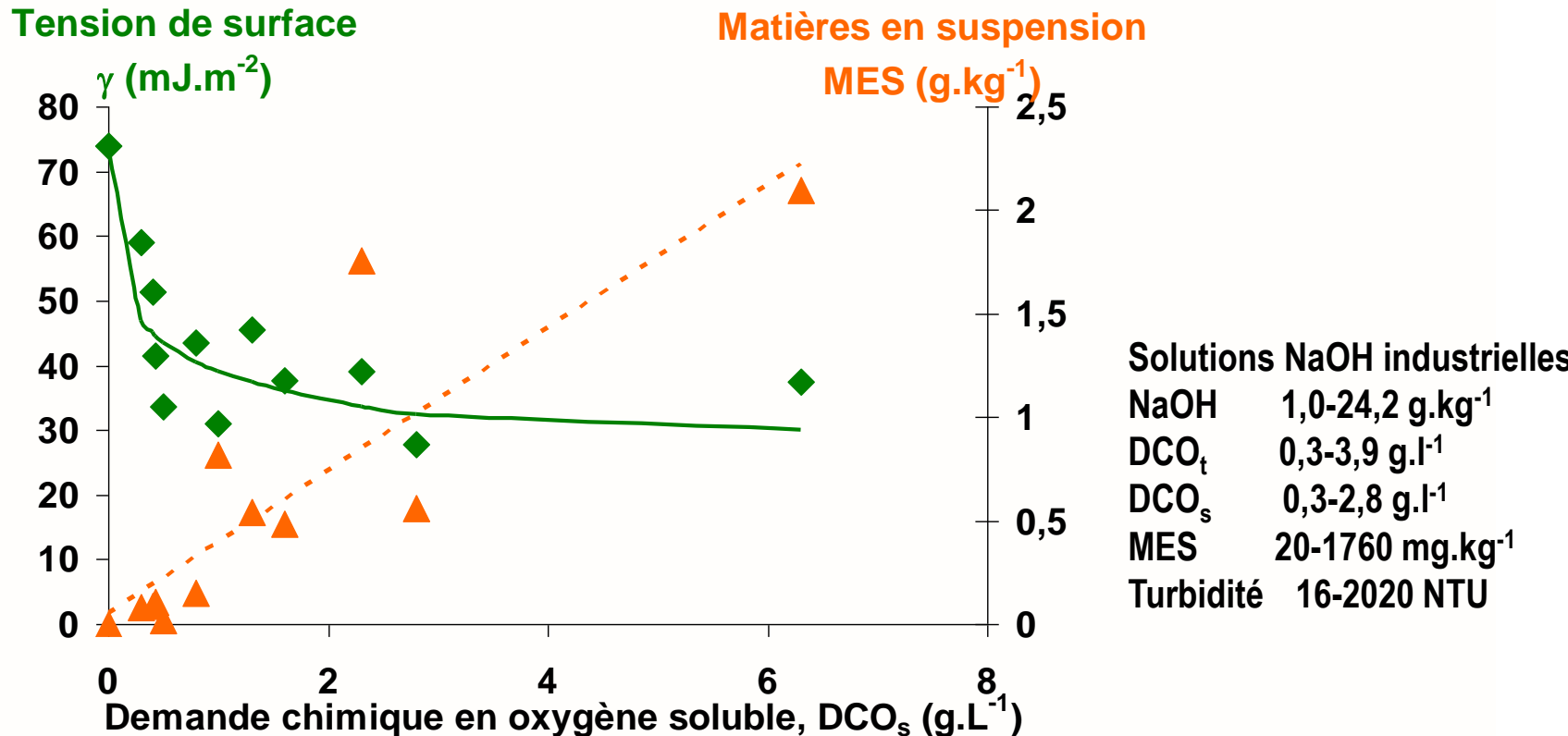
Exemple stérilisateur crème Chocolat – Situation revisitée



Régénération des solutions de NEP

- Plusieurs interrogations ...
 - Comment évolue la composition des solutions détergentes au cours de leur utilisation ?
 - Quels sont les constituants que l'on cherche à éliminer dans les solutions détergentes usagées ?
 - Quels sont les critères de régénération de la solution ?
 - ...
 - Comment maîtriser la composition de la solution de NEP par l'opération de régénération ?
 - Quelles opérations unitaires utiliser ?
 - Quelles performances à ces opérations de régénération ?
 - ...

Evolution de la composition des solutions de NaOH



Diminution de γ et augmentation de MES observées pour plusieurs types d'installations (11 usines bretonnes; NEP à réutilisation et à usage unique; NEP principalement atelier de standardisation)

Diminution de γ et augmentation de MES attribuées à des réactions chimiques d'hydrolyse de protéines et de saponification de matières grasses

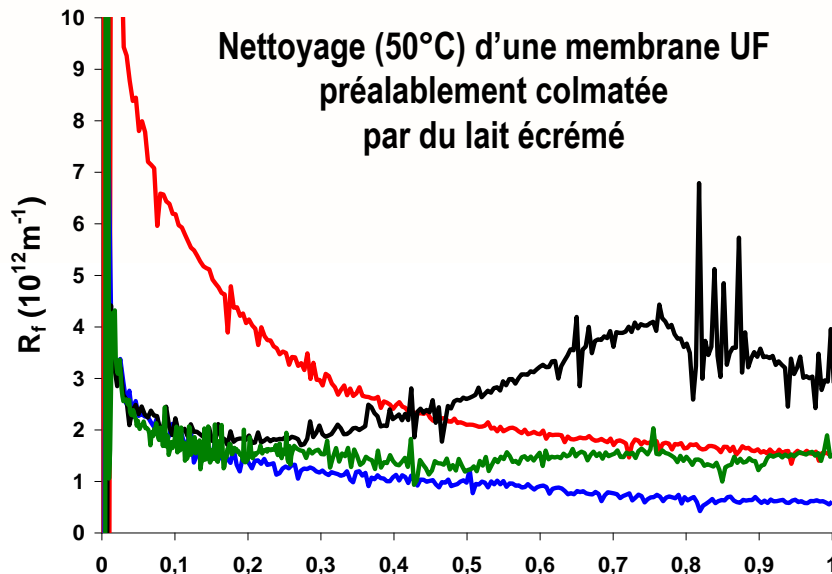
Efficacité des solutions de NaOH réutilisées

Performances de nettoyage (efficacité (91-94%), propreté hydraulique (70%) et cinétiques) :

- effet bénéfique de γ abaissée
- effet néfaste de SS

Elimination des MES de la solutions NEP « polluée »
MF (0.1 μm) UTP; $\Delta P = 0.5 \text{ bar}$; $J = 200 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$; $T=70^\circ\text{C}$

Solution	γ mJ.m^{-2}	COD _t g.l^{-1}	COD _s g.l^{-1}	SS mg.kg^{-1}	k $10^{-13} \text{ m.h}^{-1}$
1. Ultrasil 13	41.0	2,1	2.1	0	24
2. « clean » NaOH	74.0	0.0	0.0	0	8
3. « polluted » NaOH with SS	28.7	9.1	6.1	1700	13
4. «Polluted» NaOH without SS	33.5	6.1	5.9	0	24



$$\frac{1}{R_f} = kt + cte$$

Modèle du 2nd ordre

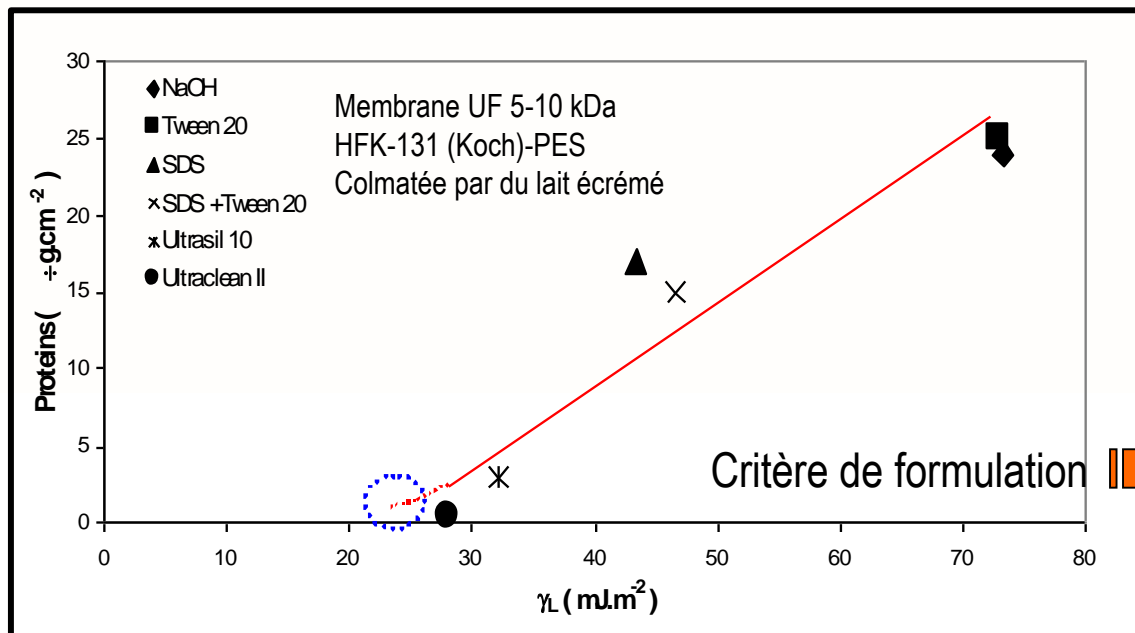
Nettoyage des membranes

- Nettoyage non maîtrisé des membranes

→ Identifier les mécanismes physico-chimiques qui sous-tendent le nettoyage
Définir des critères d'évaluation du nettoyage

Pour:

- Proposer des protocoles de nettoyage adaptés et simplifiés
- Formuler des solutions détergentes



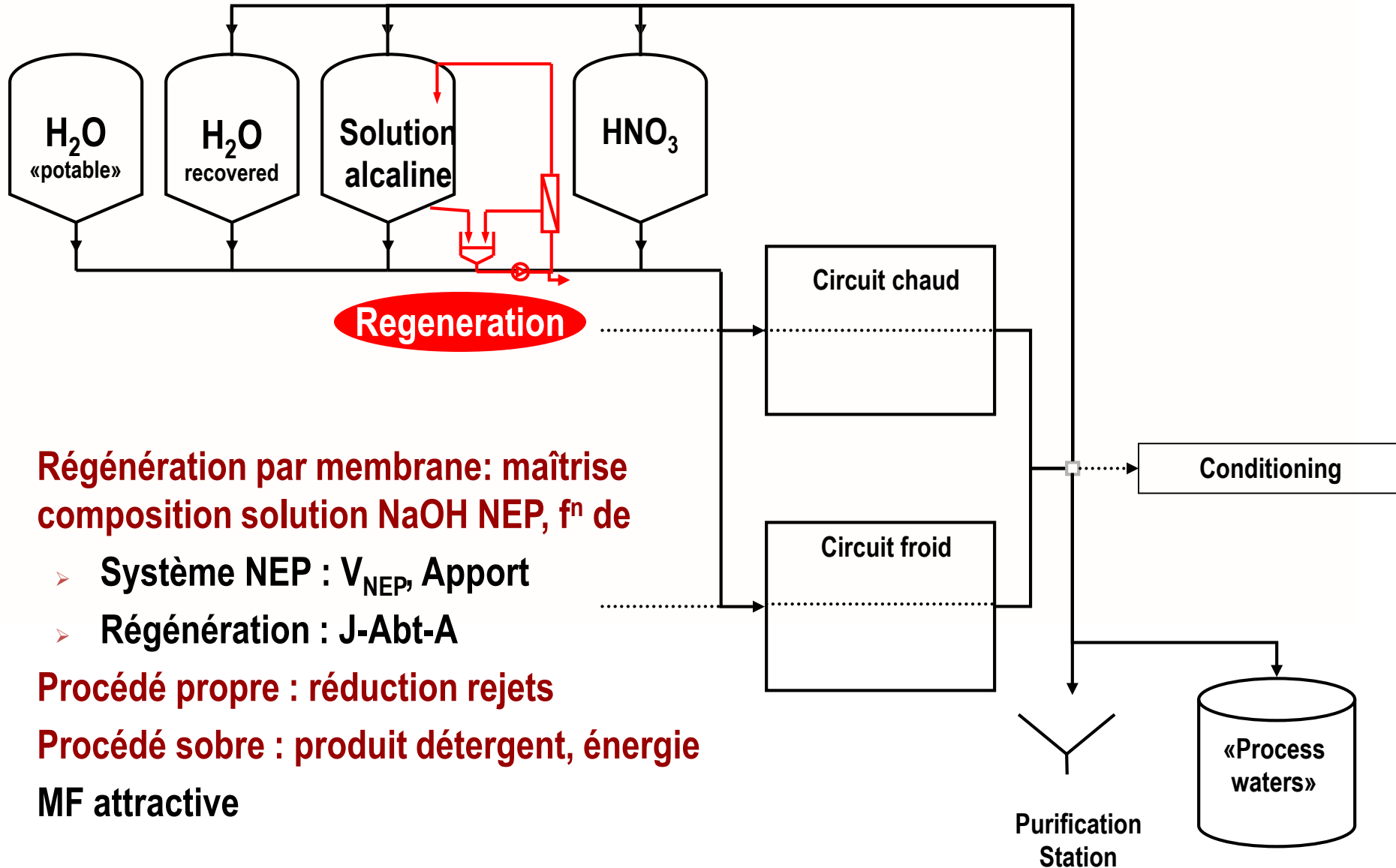
Nettoyage
en réacteur agité
pH= 11.5
50°C

Solution efficace
 $\gamma_L < 35 \text{ mJ m}^{-2}$

Quantité de protéines résiduelles = f(tension superficielle des solutions détergentes)

Rabiller-Baudry et al. (2006)

Conclusions : Régénération des solutions de NaOH



- **Régénération par membrane: maîtrise composition solution NaOH NEP, fⁿ de**
 - **Système NEP : V_{NEP}, Apport**
 - **Régénération : J-Abt-A**
- **Procédé propre : réduction rejets**
- **Procédé sobre : produit détergent, énergie MF attractive**

Quelles démarches en éco-conception ?

Quelques exemples

Incrémental

- Au niveau des opérations de transformation
 - Opérations unitaires
 - Conduite / Maîtrise des opérations unitaires de transformation (ex: opération de filtration, séchage)
- Au niveau du traitement des effluents / fluides techniques
 - Réduction des phases de nettoyage par meilleur suivi et régulation (ex: échangeur de chaleur)
 - Régénération des fluides techniques (solutions détergentes)

→ Re-conception

- Au niveau des opérations unitaires (innovations technologiques)
- Au niveau des procédés (Agencement des opérations unitaires)

Evaluation des impacts environnementaux des procédés, évaluation des opérations les plus génératrices d'impacts; proposition de voies alternatives (ex: Analyse de cycle de vie : optimisation multi-critères)

Définition du procédé initial

Production du lait

Transport Lait

Traitement du lait
(Ecrémage, Pasteurisation, refroidissements)

Transformation du lait et préparation des concentrés de protéines solubles
(MF à 50°C, UF et OI à 15°C)

Purification, concentration, séchage protéines
(Acidification / solubilisation, MF à 50°C, UFs à 15°C)
(Chromatographie, UFs à 15°C)

Traitement des effluents

Poudre enrichie en α-LA

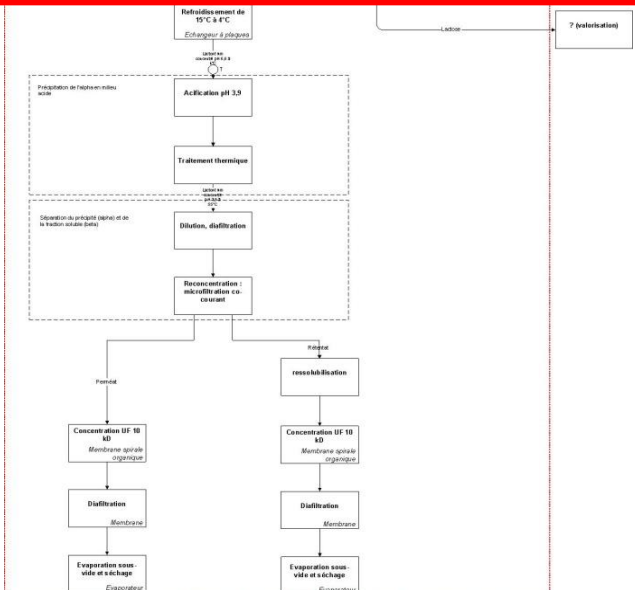
Poudre de β-LG

Commercialisation, consommation

Frontières du système

Crème case

- 4 sous-systèmes
- Transformation
 - Nettoyage / effluents
 - Equipements
 - Transport



MF : Microfiltration. UF : Ultrafiltration. OI : Osmose Inverse



Le procédé et l'ACV

Objectif : identifier les faiblesses et définir les recommandations d'éco-conception (puis comparaison d'options technologiques avec études de sensibilité)

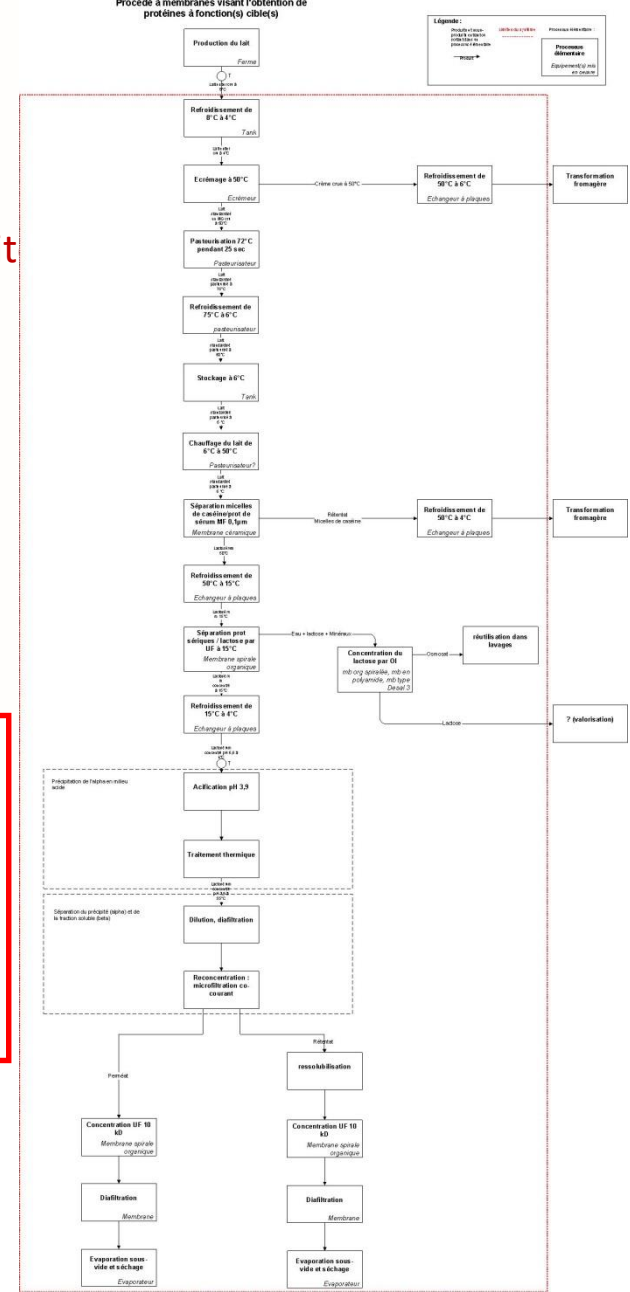
1- Définition du système étudié : objectifs et champ

2- Inventaire des flux entrant et sortant

Données collectées auprès de l'ensemble des partenaires :

- Pratiques industrielles
- Expérimentations spécifiques (labo)
- Base de données / savoir-faire / logiciels de recherche (dimensionnement – calculs énergétiques)

Procédé à membranes visant l'obtention de protéines à fonction(s) ciblée(s)

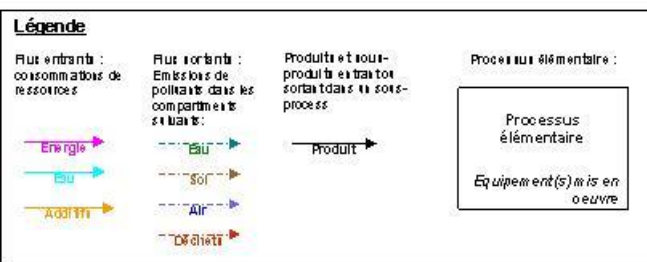


ACV du procédé

Inventaire des flux entrants et sortants

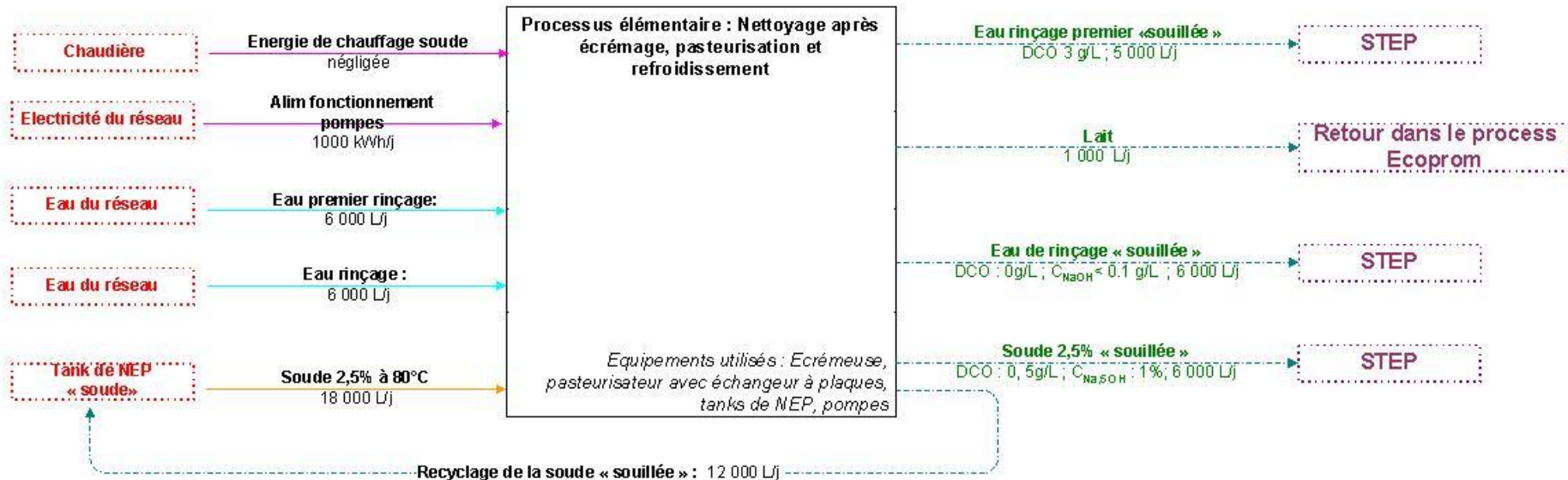
Processus élémentaire :

Ecrémage, Pasteurisation, Refroidissement en ligne en phase de nettoyage



Données :

Unité fonctionnelle : Préparation de 10,5 tonnes/j de lactosérum concentré 4°C.
Durée du processus élémentaire : 1h30 à 1h45
Débit : 35 m³/h



ACV du procédé : champs de l'étude

Périmètre

- Inclus : opérations unitaires / équipements / nettoyages / transport
- Exclus : locaux de production : entretien, éclairage...

Hypothèses

- Durée de vie du système : 20 ans
- 2 sites : Usine de transformation fromagère / unité de purification des protéines distantes de 100 km
- Périmètre géographique : France (cf. mix énergétique de la production d'électricité)

Unité fonctionnelle

- Traitement de 583 000 L de lait (Obtention de 1700 kg β -LG/j à 95 % pureté)
 - => qui conduit à :
 - . 5 co-produits: Crème crue refroidie, rétentat enrichi en micelles de caséines refroidi, lactose
 - . 2 fractions de protéines : α -lactalbumine et β -lactoglobuline

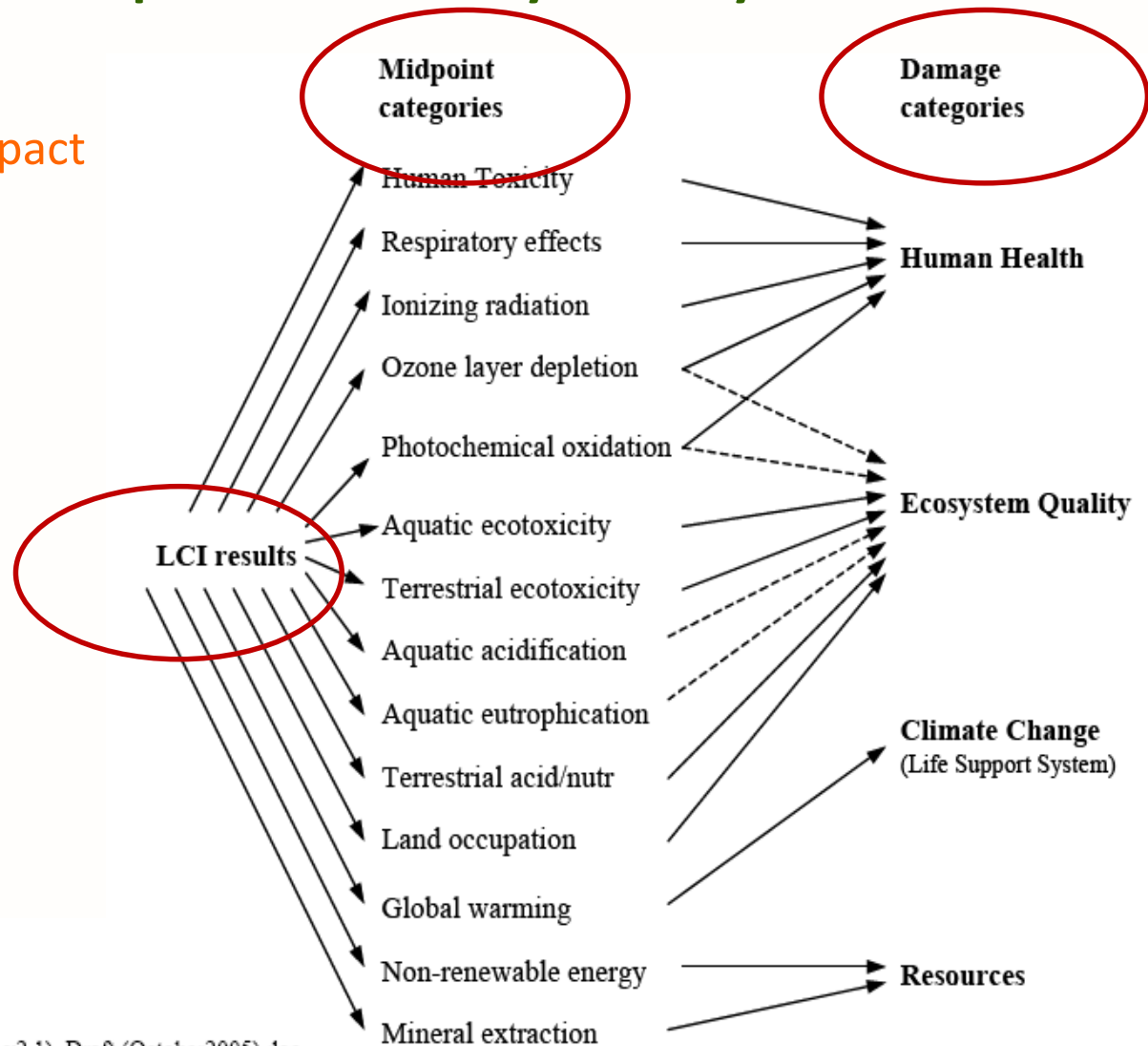
Règles d'allocation

- Evaluation d'un procédé sans règles d'allocation entre ses différents co-produits

Eco-conception des procédés : Analyse de Cycle de Vie

Exemple de méthode
d'évaluation de l'impact

IMPACT 2002+

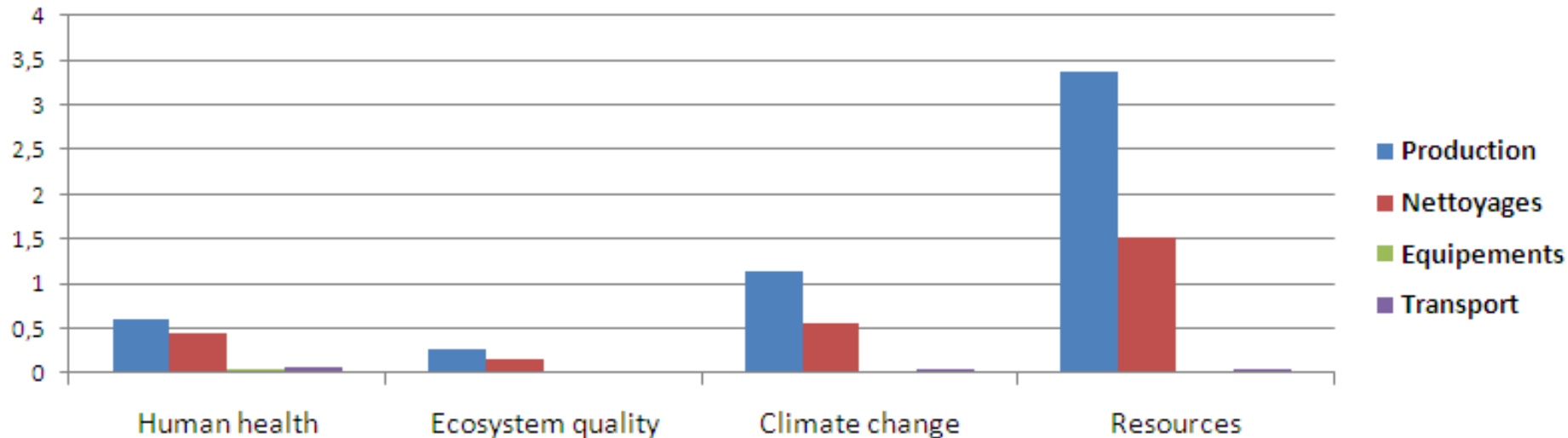


IMPACT2002+ UserGuide (for v2.1), Draft (October2005).doc

Figure 2-3.1:

Overall scheme of the IMPACT 2002+ framework, linking LCI results via the midpoint categories to damage categories, based on Joliet et al. (2003a)

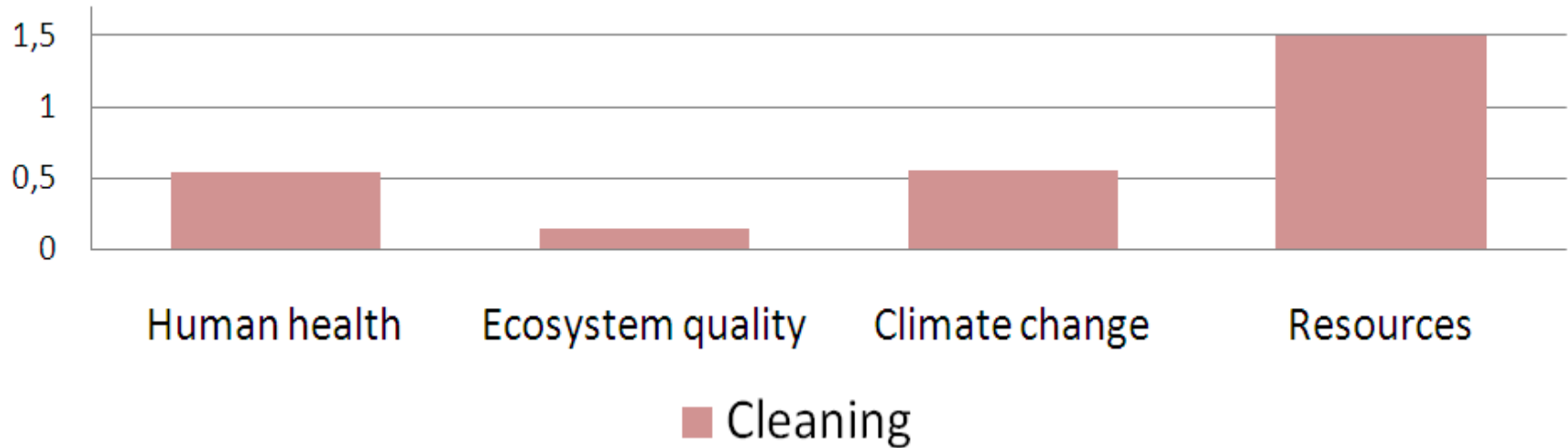
ACV du procédé à membrane initial (4 sous-systèmes)



Domages normalisés d'après la méthode IMPACT 2002+

La charge environnementale du procédé est due majoritairement aux sous-systèmes « transformation » (2/3) et « nettoyage » (1/3)

ACV du procédé à membrane (sous-système nettoyage)



Dommmages normalisés d'après la méthode IMPACT 2002+

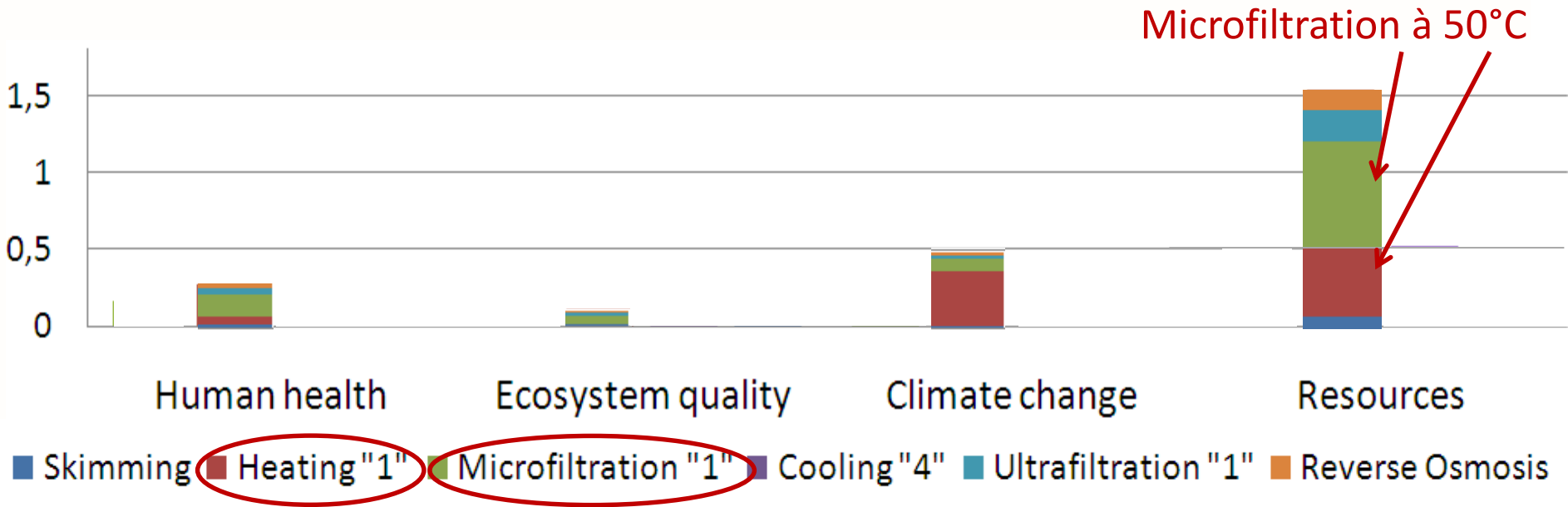
→ **Epuisement des ressources**

- électricité consommée pour le traitement des effluents (STEP)
- chauffage et production des solutions à usage unique (membrane)

→ **Sous-estimation** de l'impact des nettoyages car non-prise en compte l'impact environnemental

- des prélèvements d'eau douce
- et de certains constituants de solutions détergentes par les méthodes/bases de données ACV

ACV du procédé à membrane initial (sous-système transformation)



Domages normalisés d'après la méthode IMPACT 2002+

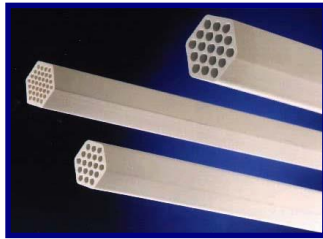
La charge environnementale du sous système « Transformation » est due majoritairement à des opérations communes aux 2 voies (membrane et chromato):

MF 0.1 µm (céramique T=50°C) et traitement thermique

ACV=> Préconisations de re-conception sur la base d'impacts environnementaux

- Changement de mode de conduite
- Changement de procédé
- Recyclage de certains fluides

Exemple MF 0.1 μm de lait écrémé



MF 0.1 μm , 50°C
Membrane minérale

Système UTP Uniform Transmembrane Pressure

(Feasibility : Fauquant *et al.*, 1988)

Lait écrémé



UF 800 kDa - MF 0.3 μm , < 10°C
Membrane organique (PVDF)

Pas de UTP

(Faisabilité: Lawrence *et al.*, 2006)

$v > 7 \text{ m s}^{-1}$; $\Delta P = 0.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
à FRV = 3; $J = 75\text{-}80 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$; $\text{Tr}_{\text{prot}} = 65\text{-}80\%$; 8-10 h
(Saboya et Maubois, 2000; Nelson and Barbano, 2005; Zulewska et al, 2009)

$v \approx 0.5 \text{ m s}^{-1}$; $\Delta P = 1\text{-}1.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
à FRV = 3; $J < 10 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$; $\text{Tr}_{\text{prot}} \approx 20\text{-}50 \%$
(Lawrence et al., 2006, 2008; Govindasamy-Lucey et al., 2007; Zulewska et al, 2009)

→ Des différences nombreuses et importantes

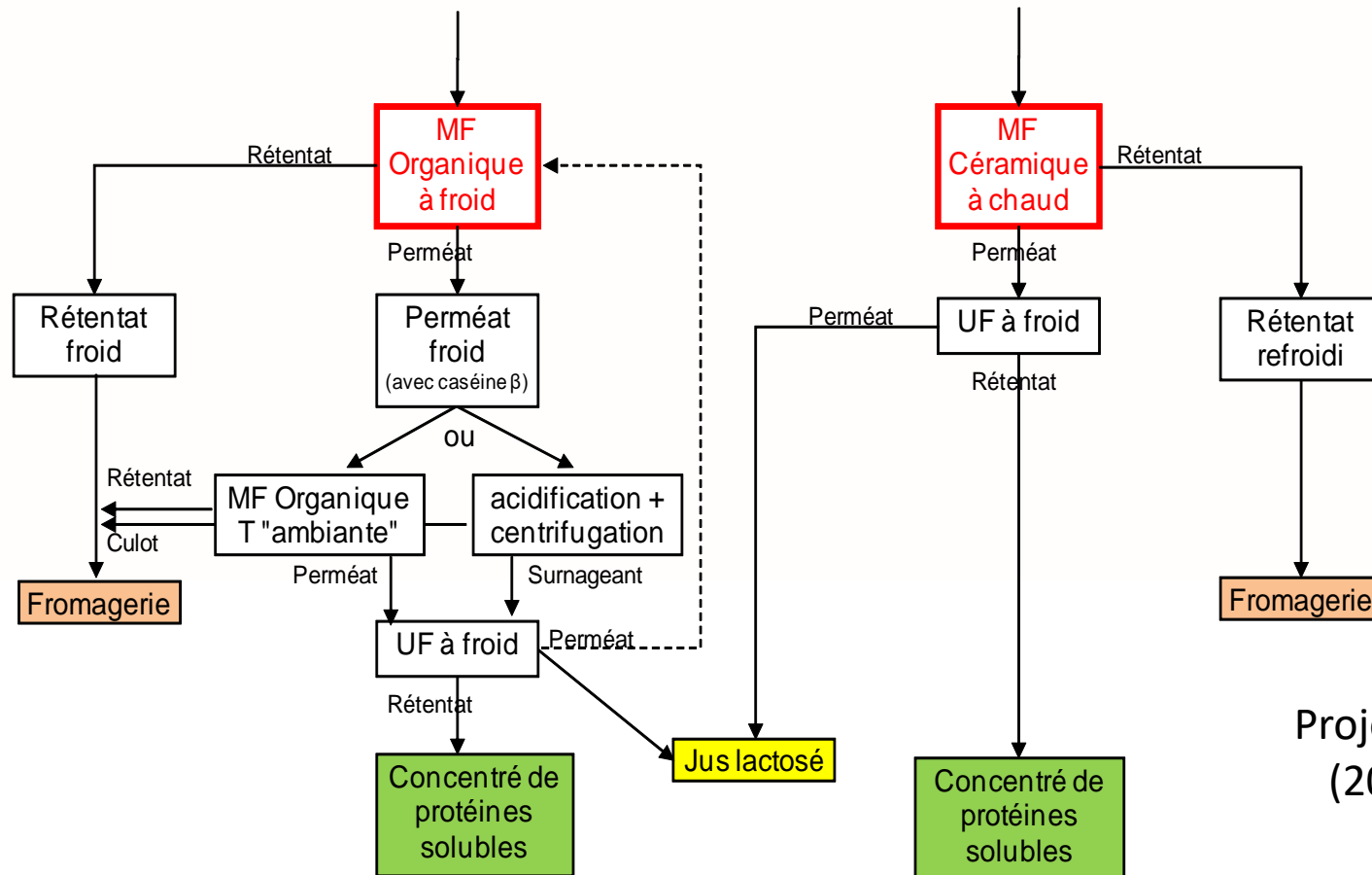
- Surface membranaire
- Puissance installée et consommation énergétique
- Transmission des protéines (=> diafiltration pour membranes organiques avec perméat d'UF => modification du schéma de process)
- Transmission des caséines: A froid passage de caséine β (=> précipitation sélective à pH=4.1-4.6 avant utilisation du perméat)
- Nettoyage des membranes organiques moins maîtrisé, et de plus en plus enzymatique

Démarche d'éco-conception: scénarii alternatifs basés sur l'ACV

. Utilisation de MF organique à 8-12°C / MF céramique à 50°C

MF organique à « froid » : 15 % de charge environnementale supplémentaire
2,5 x plus d'eau

Cause : qualité de produits différente → schéma technologique plus complexe



Projet OPTIMAL
(2017-2020)

Démarche d'éco-conception: scénarii alternatifs basés sur l'ACV

- . Utilisation de MF organique à 8-12°C / MF céramique à 50°C
 - MF organique à « froid » : 15 % de charge environnementale supplémentaire
2,5 x plus d'eau
 - Cause : qualité de produits différente → schéma technologique plus complexe
- . Mise en place de scénarii d'optimisation des nettoyages :
 - . réutilisation de l'eau de l'OI avec mise en place d'un polisher (300 m³/j)
 - . diminution de la fréquence de renouvellement des sol. NEP (hors membrane) (facteur 3-4)
 - . Suppression de phases acides pour les nettoyage membranes
 - . diminution de températures des NEP alcalines de 10°C

→ baisse de ≈20 % des impacts dus au nettoyage
baisse > 1/3 des volumes d'eau utilisée pendant le nettoyage
- . Positionnement procédé à membrane / référence (chromatographie)

Conclusions / perspectives

Approches actuelles de l'éco-conception de procédés

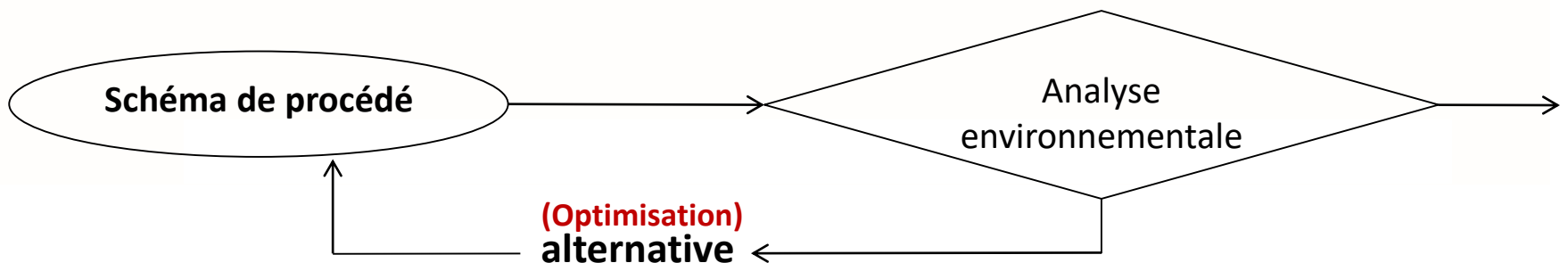
1- Objectif prioritaire : économie

➔ on traite le critère environnemental comme une contrainte de l'optimisation économique

Ex : « Bon sens » : diminution de la consommation d'énergie, d'eau, de matières premières mises en œuvre...

2- Objectif prioritaire : environnement

➔ on traite les critères environnementaux comme les principaux objectifs, tout en prenant en compte la faisabilité économique



Futurs besoins en éco-conception de procédés

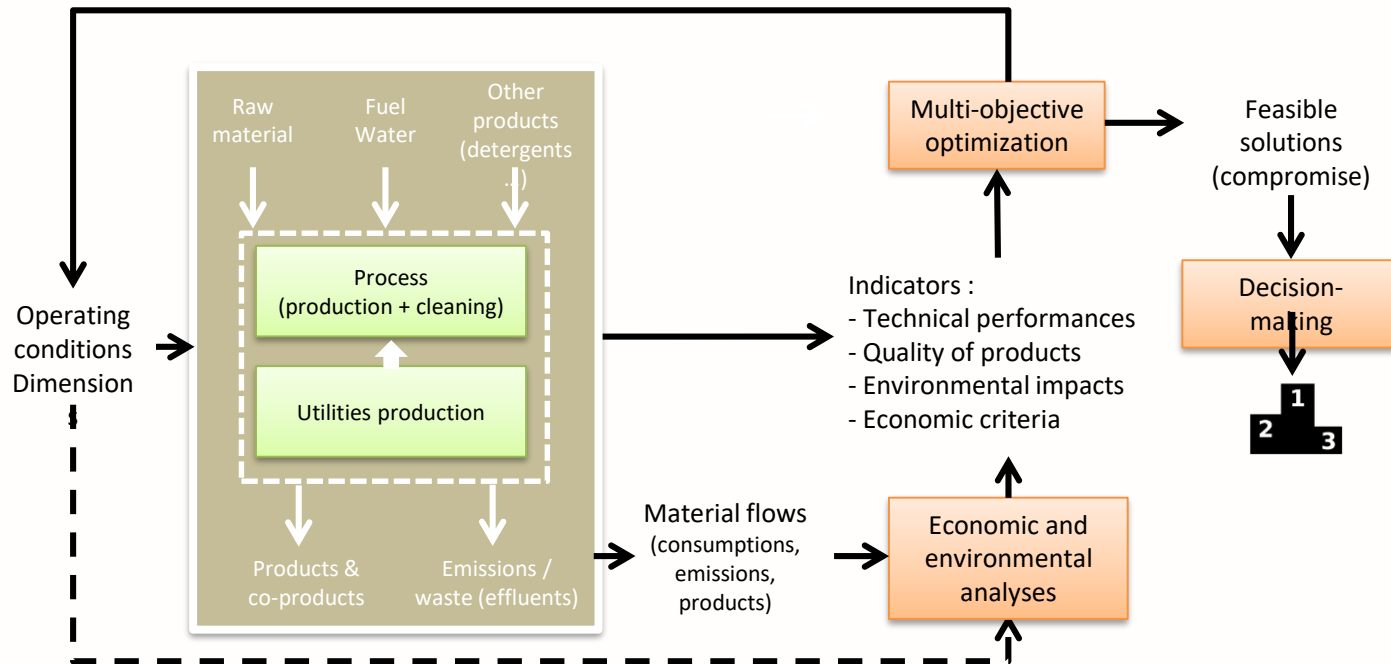
- Enrichir les bases de données de données fiables sur les procédés
- Développer des outils simplifiés d'aide à l'évaluation environnementale sur la base de l'ACV
- Développer des méthodologies d'évaluations multicritères (relier/agréger des indicateurs hétérogènes)
- Développer l'optimisation-multi-objectif appliquée aux procédés agro-alimentaires (description experte, modélisation, simulation)



Means-INRA
platform

... vers une nouvelle approche pour l'éco-conception des procédés agro-alimentaires

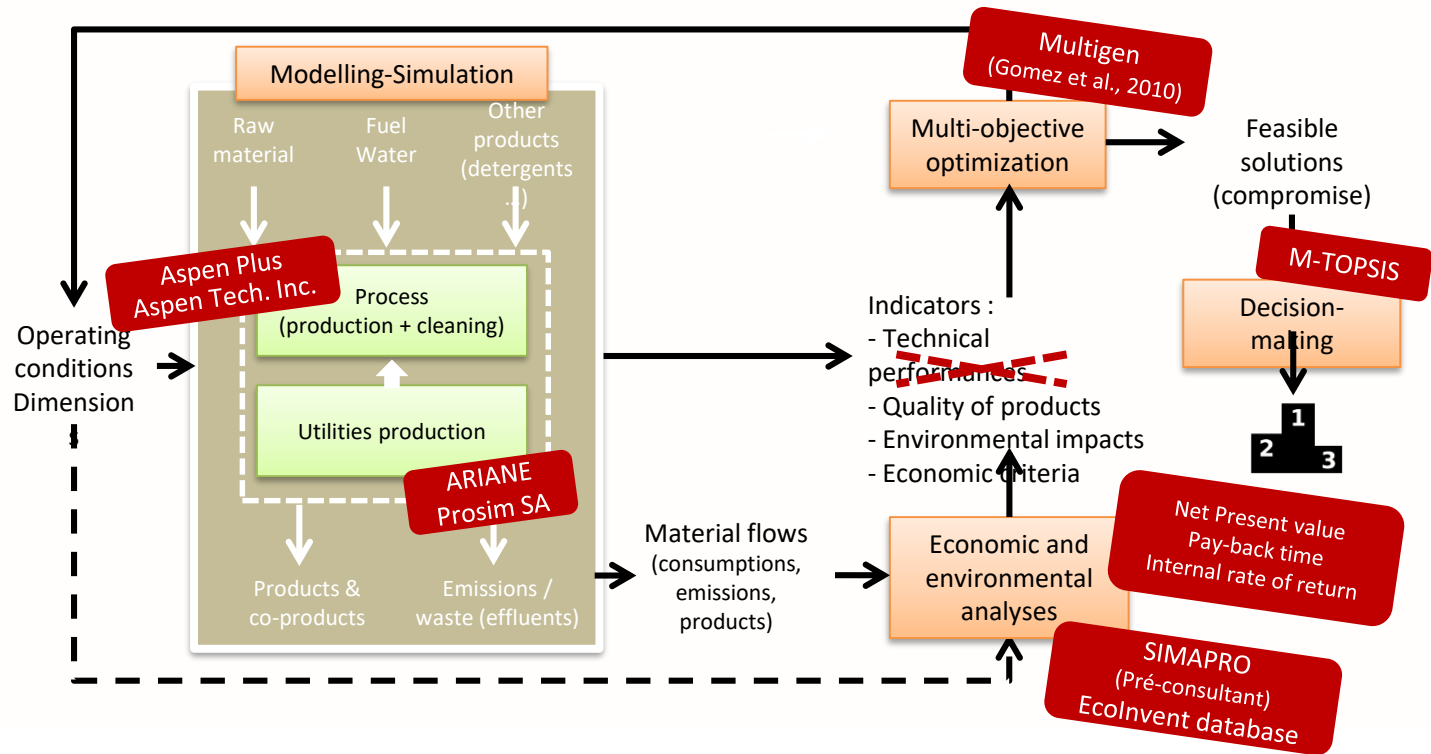
Optimisation multi-objectifs



. Simultaneous optimization of conflicting objectives

Démarche en émergence dans le domaine des procédés chimiques

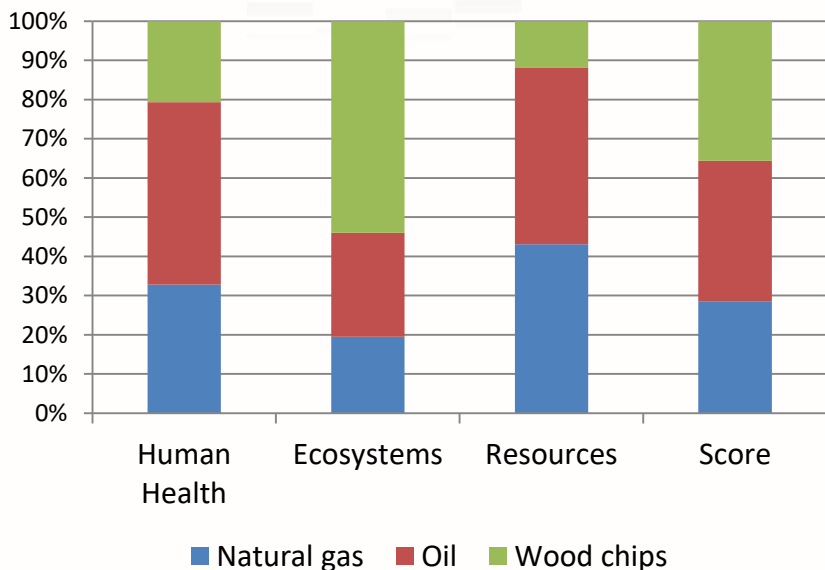
Exemple éco-conception d'un évaporateur Lait



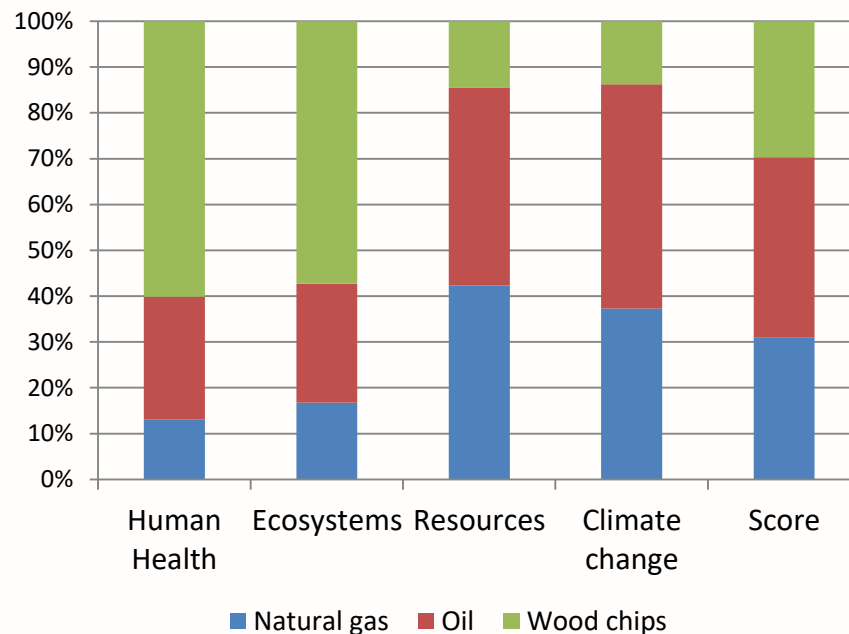
Choice of the primary source of energy

Indicateurs économiques et environnementaux

ReCiPe



Impact 2002+



	Net Present Value (M€)	Pay-back time (years)	Internal Rate of Return
Natural Gas (reference)	8,26	3,6	47%
Oil	9,34 (+13%)	3,4 (-7%)	51% (+9%)
Wood Chips	9,54 (+16%)	4,0 (+9%)	42% (-10%)

Choice of the primary source of energy

Multicriteria analysis (M-TOPSIS)

	Combustible		
	Natural gas	Oil	Wood chips
Net Present Value, Single score ReCiPe	1	3	2
Net Present Value, Single score Impact 2002+	2	3	1
3 economic criteria, 3 Endpoint scores ReCiPe	2	3	1

Conclusions / perspectives

Eco-conception / innovation de procédés alimentaires

Approche incrémentale sur des opérations unitaires

Avantages

Gains *récurrents* en énergie et eau



Vision systémique

sur le procédé combinant

- des évaluations multi-critères (environnemental, économique, social)
- des outils de modélisation des procédés,
- des méthodes d'optimisation multi-objectif et d'aide à la décision

- sur la chaîne de valeur combinant

- des évaluation multi-critères
- du recueil de *données expertes*
- des méthodes d'optimisation multi-objectifs et d'aide à la décision
- une *participation de l'ensemble des acteurs de la chaîne*