Fractionnement du lait
Eco-efficacité des opérations membranaires

Geneviève Gésan-Guiziou

UMR1253 Science et Technologie du Lait et de l'œuf
INRA – Agrocampus Ouest Rennes

Contexte / Cuisine « Note à Note »

Produits purs / Fractions enrichies

Critères techniques

Critères économiques

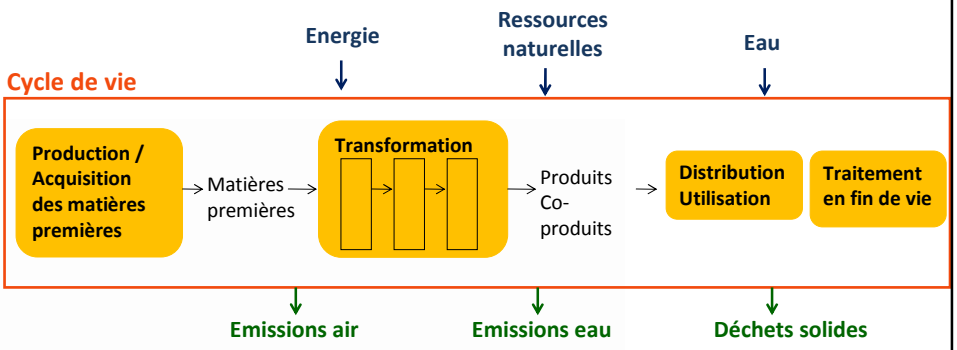
Conception de produits / procédés « durables »
(Eco-conception)

Critères environnementaux

Critères sociaux

Eco-conception : Intégration de la dimension « environnementale » dans la conception ou la re-conception d'un produit ou d'un procédé

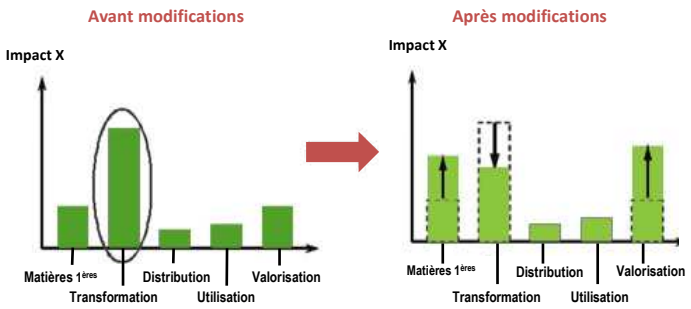
Eco-conception : définition



Eco-conception : Approche multicritère
prise en compte sur tout le cycle de vie du produit / du procédé
Démarche préventive

Eco-conception : définition

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



Pourquoi l'éco-conception de procédés alimentaires ?

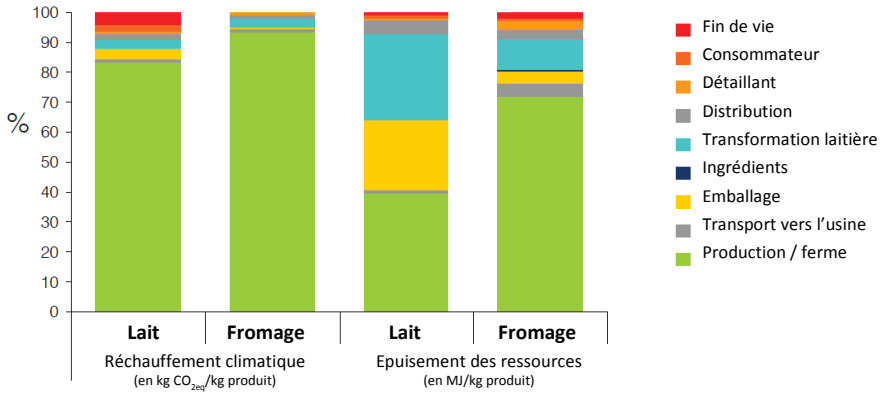
Un **constat** établi sur la base d'analyses de cycle de vie, ACV de produits alimentaires transformés «simples» (Roy *et al.*, 2009)

La transformation d'un produit alimentaire « simple » représente rarement l'impact environnemental le plus grand

Pourquoi l'éco-conception de procédés alimentaires ?

Pourtant un **intérêt grandissant** … parce que

1- le constat peut être pondéré selon l'indicateur retenu



Contribution des différentes phases du cycle de vie pour les indicateurs réchauffement climatique et épuisement des ressources
(pour 1 kg de lait ou 1 kg de fromage)

Bull IDF (2009) n°436

Pourquoi l'éco-conception de procédés alimentaires ?

Pourtant un intérêt grandissant … parce que

1- le constat peut être pondéré selon l'indicateur retenu

2- la demande industrielle est croissante

- augmentation du coût de l'énergie, des traitements des déchets, de la taxe sur les rejets …
- au nom de l'affichage environnemental

Loi « Grenelle » 2 (LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010) - Spécificité française
Généralisation de l'affichage environnemental des produits de grande consommation
→ **Produits alimentaires**

3- des améliorations au niveau industriel sont parfois simples et efficaces

4- les choix qui sont faits au niveau industriel peuvent affecter les performances environnementales d'autres étapes du produit (sélection de matières premières ; développement / design produit)

L'éco-conception de procédés : une priorité de l'INRA
…dans un domaine de recherche émergent

Historique de l'éco-conception des procédés/produits
➔ Premières directives 1994

véhicules hors d'usage

électronique

bâtiments

matériaux

Dans le secteur alimentaire : focus sur emballage
3 raisons possibles :
- designers
- grande proportion des emballages provient des emballages alimentaires (50 %, Staley and Barlaz, 2009)
- sur-estimation de l'impact de l'emballage / produit

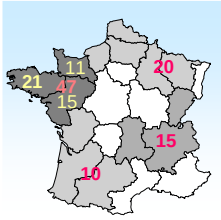
Contexte socio-économique

La filière laitière française

Caractéristiques

- Place importance sur l'échiquier européen
  - Chiffre d'affaires 18 M€ (20 % CA IAA)
  - 160 000 emplois
  - 24 ML lait (CNIEL, 2009)
- Excédentaire → exportatrice
- Concentrée dans le «Grand Ouest » (Produits «basiques»)

2nd rang derrière l'Allemagne
20 % production de l'UE



% production nationale

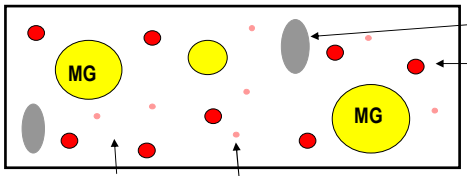
Menaces

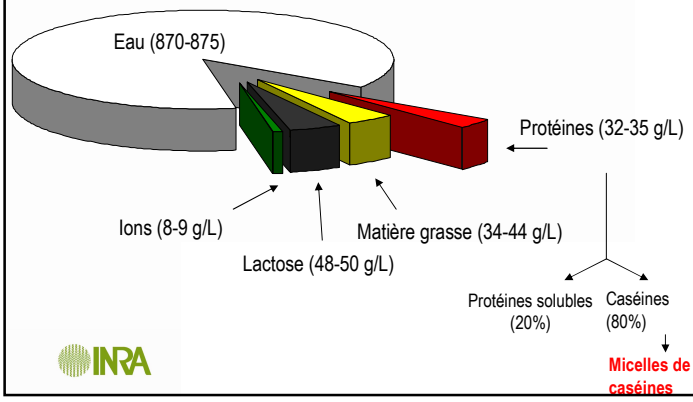
- Pression sur les marchés national et international
  - Extension de l'UE : pays de l'Est
  - Réforme de la Politique Agricole Commune
  - Grande distribution
- Pression d'ordre environnemental
  - Augmentation des taxes sur les rejets
  - Sévérité de la réglementation européenne (décharge; épandage)

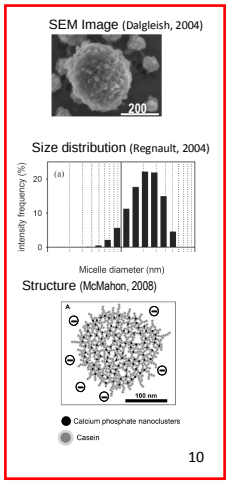
Diversification; Innovation; Maîtrise des coûts

Composition du lait bovin

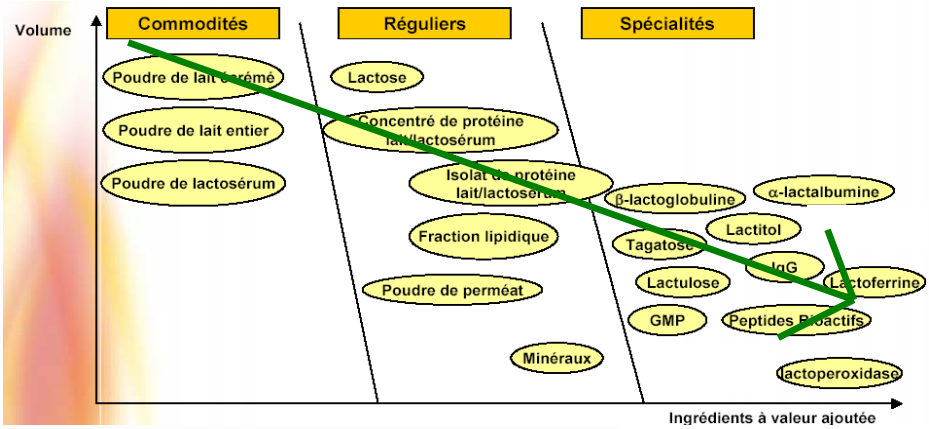
Lait







Contexte socio-économique : Les ingrédients laitiers



1ère génération
1940-1970
Début industrialisation

2nde génération
1970-1990
Développement des technologies à membrane et du fractionnement

3ème et 4ème générations
1990 et futur
Nutrition et alimentation optimales, santé

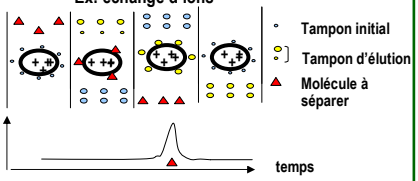
Source : Université Laval (Québec, Canada), Lemoine (2005)

Techniques de fractionnement des protéines

Chromatographie

Novasep- Process

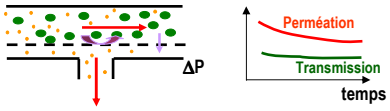
Ex: échange d'ions



☺ **. Fractions protéiques de grande pureté**
. Forme native
→ Référence

☹ **. Forts volumes et charge d'effluents**
. Coût de revient élevé
Ex: α-LA (90%) ≈ 20 € HT/kg
β-LG (90%) ≈ 15 € HT/kg

Opération de séparation à membrane

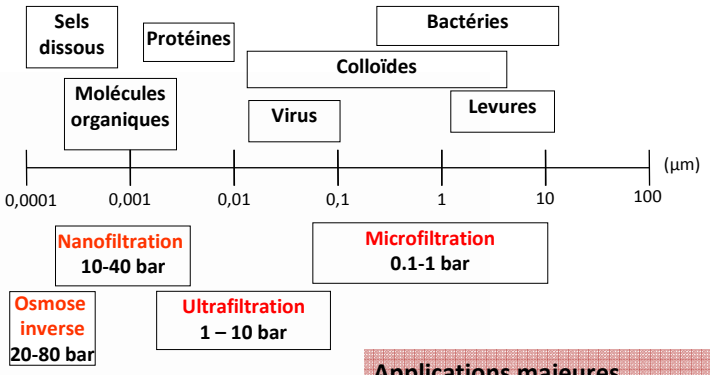


☺ **. Attractif sur les plans environnemental et économique**
. Faisabilité scientifique

☹ **. Sélectivité faible / chromatographie**
→ cascade, couplage
. Structure & fonctionnalités des fractions protéiques obtenues inconnues

Opérations à membranes (gradient de pression)

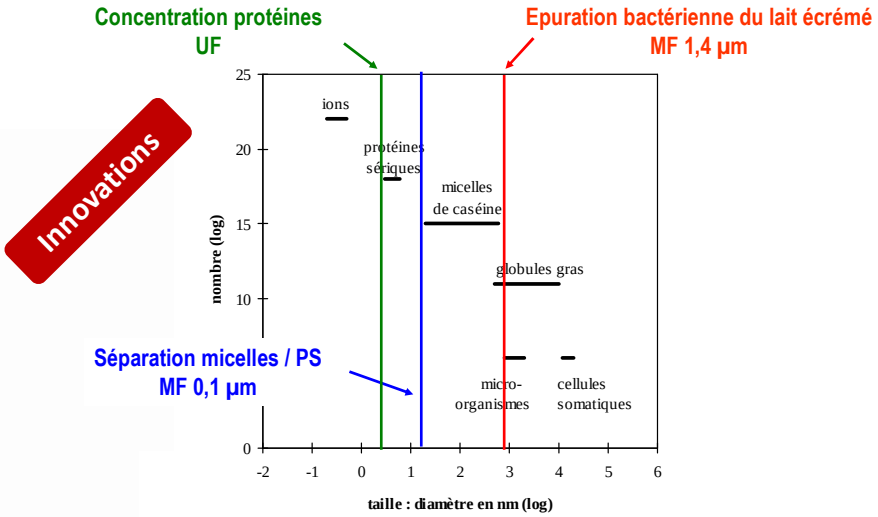
par référence à une échelle de taille



Applications majeures
-clarification, épuration bactérienne
-concentration
-fractionnement

Opérations à membranes en industrie laitière

Raisons d'une "Success story" (1)



Lait : composition complexe,
mais permet une application privilégiée des techniques à membranes

Opérations à membranes en industrie laitière

Raisons d'une "Success story" (2)

Opération unitaire	Consommation énergétique kWh/t d'eau /perméat éliminé
Opération membranaire	
Ultrafiltration	3 à 4
Nanofiltration	5 à 7
Osmose inverse	9 à **10**
Evaporation sous vide	**100** à 300
Séchage par atomisation	**1000** à 2000
Lyophilisation	5000 à 10000

Définition des procédés d'étude

Objectif : comparaison de 2 options technologiques

ANR EcoProM (2007-2010)

Système étudié

Lait -entrée usine

Prétraitement – stockage - standardisation → Crème

Séparation micelles / protéines du lactosérum → Micelles de caséine (Transformation fromagère)

Concentration + purification protéines du lactosérum (UF+OI)

Concentrés protéiques

Voie membrane

Précipitation sélective
+ Séparation par membrane
+ Concentration/ Diafiltration
+ séchage

Fractions enrichies de β-Lg et α-La

Pur β-Lg > 95 % Pur α-La >> 70 % (α/β > 15)
Rdt β-Lg > 75 % Rdt α-La > 80 %

Voie chromatographie

Chromatographie échange d'ions
+ Concentration/ diafiltration
+ séchage
Novasep Process

Fractions enrichies de β-Lg et α-La

Pur β-Lg > 95 % Pur α-La > 70 %

Définition des procédés d'étude

Production du lait

Frontières du système

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)

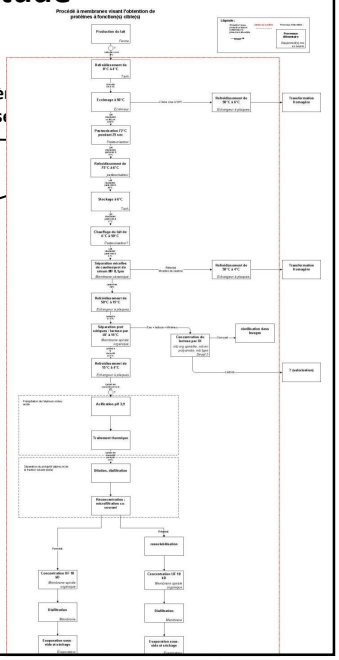
Traitement des effluents

Poudre enrichie en α-LA

Poudre de β-LG

Commercialisation, consommation

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



Définition des procédés d'étude

Production du lait

Frontières du système

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

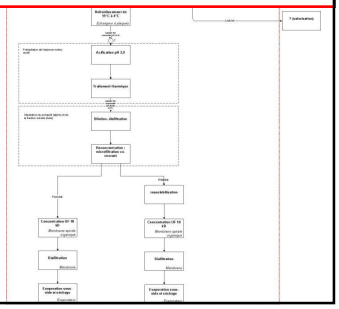
Poudre de β-LG

Commercialisation, consommation

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

4 sous-systèmes

- → **Transformation**
- → **Nettoyage / effluents**
- → **Equipements**
- → **Transport**



Analyse de Cycle de Vie, ACV du procédé

norme ISO 14040 – 14044, 2006

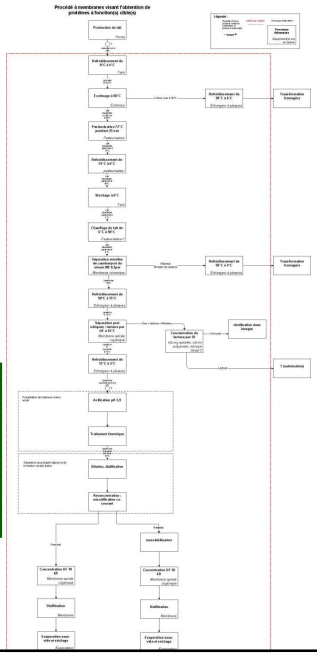
Objectif : identifier les faiblesses et définir les recommandations d'éco-conception (comparaison d'options technologiques)

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)

logiciel SD²P



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

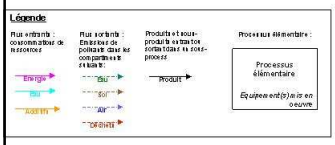
(Méthode IMPACT 2002+ associée à un indicateur de flux de consommation d'eau (Q_{eau} /L_{lait}) avec logiciel SimaPro 7.2)

ACV du procédé initial

Inventaires des flux entrants et sortants

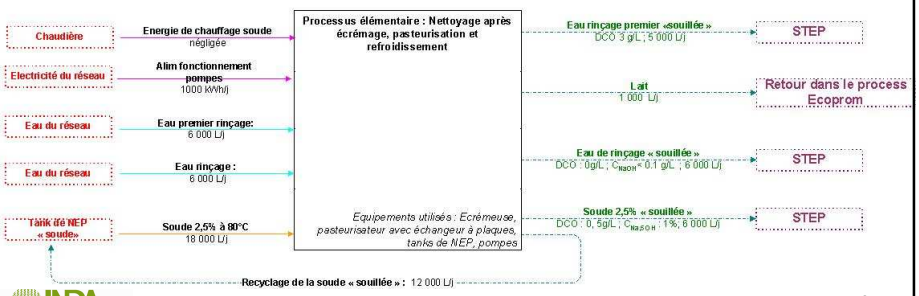
Processus élémentaire :

Ecrémage, Pasteurisation, Refroidissement en ligne
en phase de nettoyage



Données :

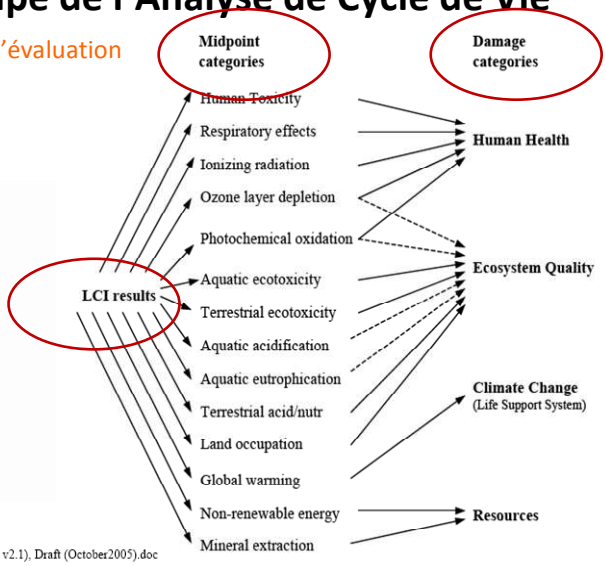
Unité fonctionnelle : Préparation de 10,5 tonnes/j de lactosérum concentré 4°C.
Durée du processus élémentaire : 1h30 à 1h45
Débit : 35 m3/h



Principe de l'Analyse de Cycle de Vie

Exemple de méthode d'évaluation de l'impact

IMPACT 2002+

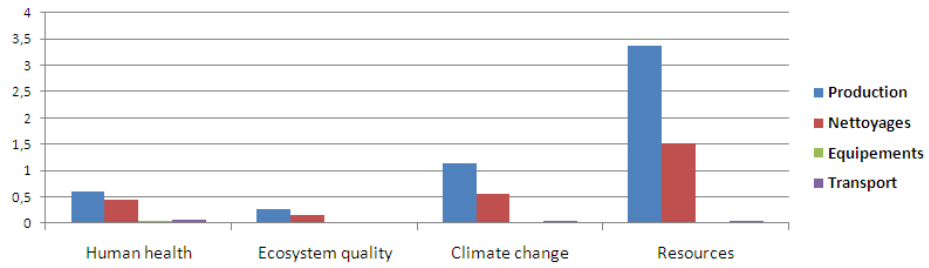


IMPACT2002+ UserGuide (for v2.1), Draft (October2005).doc

Figure 2-3.1: Overall scheme of the IMPACT 2002+ framework, linking LCI results via the midpoint categories to damage categories, based on Jolliet et al. (2003a)

22

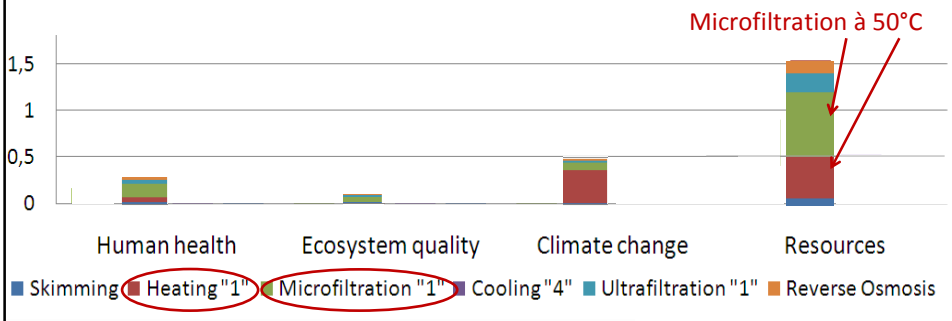
ACV du procédé à membrane (4 sous-systèmes)



Dommages 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 transformation)

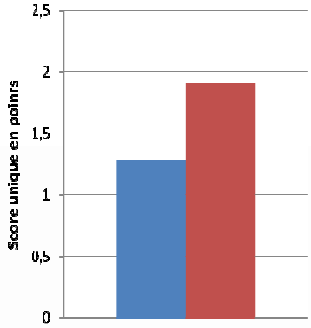


Dommages normalisés d'après la méthode IMPACT 2002+

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

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

Comparaison ACV des procédés à membrane /chromatographie



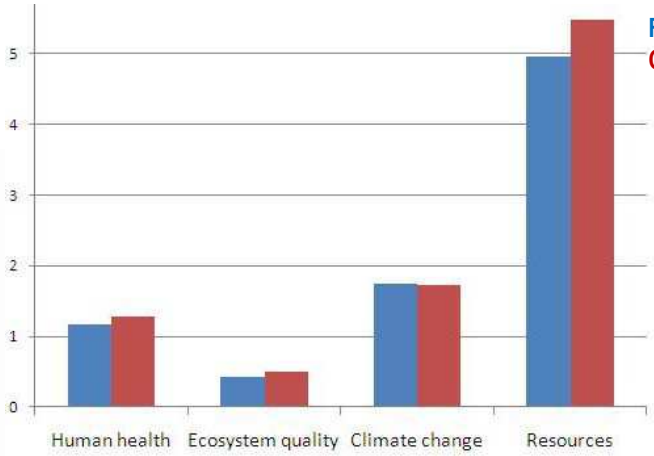
Filtration
Chromatographie

Charge environnementale de la purification des protéines (prod, nett, equip)
(Méthode IMPACT 2002+, logiciel SimaPro 7.2)

Sous estimation de l'impact environnemental de la chromatographie:
- par non prise en compte de l'impact de la quantité de sel non recyclée
- 15% de consommation d'eau supplémentaire

Normalisation des impacts environnementaux / charge env. annuelle d'un européen moyen pour ces mêmes catégories d'impact

Comparaison ACV des procédés à membrane /chromatographie



Filtration
Chromatographie

Profil environnemental similaire
Impacts des nombreux traitements thermiques, chauffage des solutions de nettoyage, fonctionnement des pompes …

(Méthode IMPACT 2002+, SimaPro 7.2)

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 complexe

. Mise en place de scenarii d'optimisation des nettoyages :
. réutilisation de l'eau de l'OI avec mise en place d'un polisher (300 m^3/j)
. diminution de la fréquence de renouvèlement des solutions de NEP (de 3-4)
. Suppression de phases acides pour les nettoyage membranes
. diminution de températures des NEP alcalines de 10°C

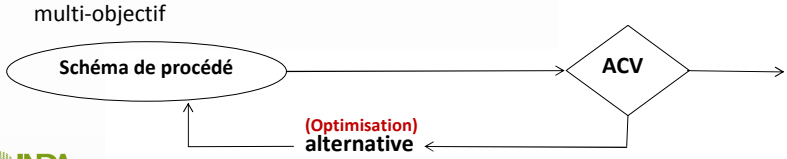
➔ baisse de ≈20 % des impacts dus au nettoyage
baisse > 1/3 des volumes d'eau utilisée pendant le nettoyage

. Positionnement procédé à membrane / référence (chromatographie)

Conclusions

- **Opérations à membranes**
  - Outil pertinent pour le fractionnement et la (pré-) concentration des composés laitiers et alimentaires
  - éco-efficacité = f^n (filière (marchés); produit (composition, propriétés); valorisations des co-produits; aptitude aux nettoyages des membranes; …)
  - éco-efficacité de ces opérations : à comparer aux techniques existantes, dans le contexte particulier de sa mise en œuvre
    ➔ aucune généralisation possible

- **Outil d'évaluation des impacts environnementaux = Analyse de cycle de vie**
  - Identification des « points noirs » ➔ orientations des questions de recherche
  - Démarche en émergence, mais démarche itérative, sans optimisation multi-objectif

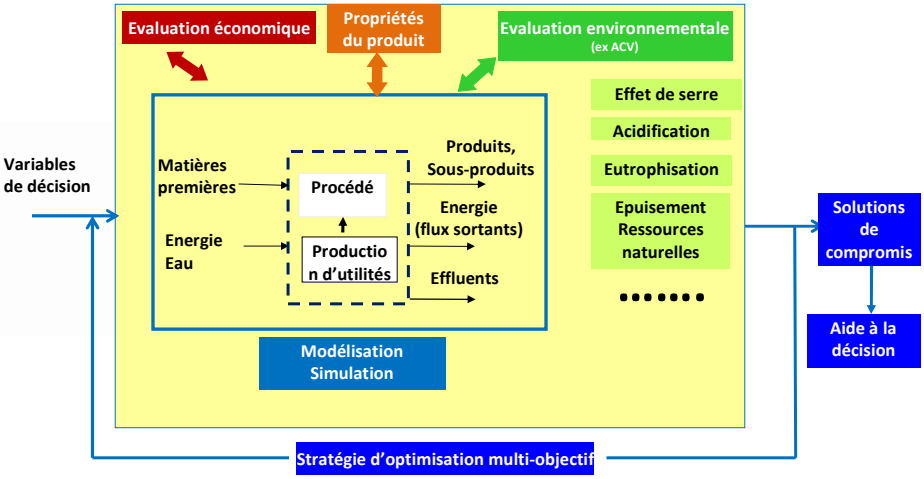


Perspectives

- **Vers le développement d'outils d'aide à la décision basés sur une optimisation multi-objectif**

➔ De nombreuses questions de recherche à explorer :
- Relation procédés – produits
  - En quoi le procédé joue sur les propriétés du produit ?
  - En quoi les propriétés du produit affectent les performances du procédé ?
- Valorisation des co-produits
- Modélisation des performances des procédés
- …

… vers une nouvelle approche pour l'éco-conception des procédés à l'INRA



Démarche en émergence dans le domaine des procédés chimiques

Merci de votre attention !