

## EXEMPLE D'APPLICATION PROSIMPLUS

# PROCEDE DE PRODUCTION DE POMMES DE TERRE SURGELEES

### INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple présente la simulation d'un procédé de production de pommes de terre surgelées. Une analyse pincement eau est réalisée et les propositions de nouveaux réseaux d'eau sont simulées pour évaluer les réductions de consommations et de rejets d'eau du procédé.

<b>DIFFUSION</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Libre Internet</b>	<input type="checkbox"/> <b>Réservé clients ProSim</b>	<input type="checkbox"/> <b>Restreinte</b>	<input type="checkbox"/> <b>Confidentiel</b>
------------------	---	--	--	--

<b>FICHIERS PROSIMPLUS CORRESPONDANTS</b>	<p><i>PSPS_EX_FR-V1-Procédé-PdT-Sans-Réutilisation.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V2-Procédé-PdT-Actuel.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V3-Procédé-PdT-Intégré.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-V4-Procédé-PdT-Intégré-Avec-Régénération.pmp3</i></p>
---	---

*Il est rappelé au lecteur que ce cas d'utilisation est un exemple et ne doit pas être utilisé à d'autres fins. Bien que cet exemple soit basé sur un cas réel il ne doit pas être considéré comme un modèle de ce type de procédé et les données utilisées ne sont pas toujours les plus exactes disponibles. ProSim ne pourra en aucun cas être tenu pour responsable de l'application qui pourra être faite des calculs basés sur cet exemple.*

### Energy

#### Fives ProSim

Siège social : Immeuble Stratège A - 51 rue Ampère - 31670 Labège - FRANCE

Tél. : +33 (0)5 62 88 24 30

S.A.S. au capital de 147 800 € - 350 476 487 R.C.S. Toulouse - Siret 350 476 487 00037 - APE 5829C - N° TVA FR 10 350 476 487

[www.fivesgroup.com](http://www.fivesgroup.com) / [www.fives-prosim.com](http://www.fives-prosim.com)

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>MODELISATION DU PROCEDE .....</b>	<b>3</b>
1.1	Présentation du procédé .....	3
1.2	Schéma du procédé .....	5
1.3	Constituants.....	6
1.3.1	Constituant « Potato ».....	6
1.3.2	Constituant « COD » (Demande Chimique en oxygène) .....	7
1.3.3	Liste globale des constituants .....	8
1.4	Modèle thermodynamique .....	8
1.5	Conditions opératoires.....	9
1.6	Procédé sans réutilisation .....	10
1.6.1	Schéma de simulation .....	10
1.6.2	Conditions opératoires .....	10
1.6.3	Résultats.....	11
1.7	Procédé actuel.....	14
1.7.1	Schéma de simulation .....	14
1.7.2	Conditions opératoires .....	14
1.7.3	Résultats.....	15
1.8	Procédé intégré .....	16
1.8.1	Schéma de simulation .....	16
1.8.2	Conditions opératoires .....	17
1.8.3	Résultats.....	21
1.9	Procédé intégré avec unité de régénération .....	22
1.9.1	Schéma de simulation .....	22
1.9.2	Conditions opératoires .....	22
1.9.3	Résultats.....	23
<b>2</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>ANNEXE.....</b>	<b>26</b>

# 1 MODELISATION DU PROCEDE

## 1.1 Présentation du procédé

Cet exemple présente la simulation d'un site de production de pommes de terre surgelées ([GAR20] et [GAR21b]). Le processus de transformation est réalisé en plusieurs étapes détaillées ci-après.

Le procédé de production de pommes de terre surgelées est consommateur d'eau. Lors des différentes étapes, l'eau est utilisée principalement pour le lavage et le rinçage du produit. L'eau rejetée est chargée en contaminants ce qui rend le recyclage en eau complexe. En effet pour des raisons de qualité, l'« eau propre » (eau du réseau) est généralement utilisée pour limiter les risques de contamination de produit.

Compte-tenu de la pression croissante sur la ressource en eau, l'industrie alimentaire fait face à des défis majeurs concernant son approvisionnement.

A l'exception de l'eau utilisée comme ingrédient, une large part de l'eau utilisée par l'industrie agro-alimentaire se retrouve sous forme d'effluents plus ou moins chargés, pouvant inclure aussi l'eau contenue dans la matière première agricole. Le traitement et la gestion de ces effluents représente dans certains cas une charge lourde pour l'industriel, ainsi qu'une perte de matière première non négligeable.

Face à ces enjeux, la minimisation des consommations d'eau est nécessaire. L'optimisation et la reconception des réseaux d'eau incluant la possibilité de recycler les eaux peu chargées ou les flux aqueux après un traitement adéquat de purification (régénération) peuvent être des solutions intéressantes.

Une des méthodes d'intégration hydrique des procédés est la méthode du pincement eau. Cette méthode permet de réduire les consommations en eau des procédés via la méthode du pincement. Plus de détails sur le principe de cette méthode sont fournis en annexe (cf.4 Annexe). De même, il est possible de consulter la notice du module « Analyse pincement eau » dans ProSimPlus pour obtenir plus d'informations sur son utilisation dans ce simulateur de procédés continus en régime permanent.

L'objectif principal de cet exemple est de présenter la modélisation du procédé agro-alimentaire de production de pommes de terre surgelées en vue d'appliquer la méthode du pincement eau. Pour ce faire, la démarche est la suivante :

- Afin de vérifier la performance des réutilisations existantes, une première analyse du procédé (V1) est réalisée sans ces réutilisations existantes. Cette analyse pincement eau du procédé sans réutilisation est effectuée à l'aide du module « Analyse pincement eau ». L'objectif de cette analyse est de proposer de nouvelles réutilisations en eau. Les réutilisations ainsi trouvées pourront être comparées aux réutilisations déjà présentes sur le site. De plus, cette première analyse permet de déterminer la quantité maximale d'eau réutilisable, qui sert ainsi de référence dans la quantification de la performance du réseau d'eau.

- Dans un second temps (version V2), une analyse pincement eau est menée sur le procédé actuel (prise en compte des réutilisations existantes). Les réutilisations trouvées lors de cette 2<sup>ème</sup> étape vont s'ajouter aux réutilisations existantes du procédé. A la fin de cette étape, il n'y a, en théorie, plus de réutilisation directe possible (version V3). Le seul moyen de réduire encore la consommation d'eau est d'utiliser des unités de régénération afin de purifier un ou plusieurs rejet(s) en eau et ainsi de pouvoir le ou les réutiliser au sein du procédé [GAR21a].
  
- Lors de cette dernière étape de réduction des consommations d'eau, une unité de régénération par filtration membranaire est ajoutée au procédé pour traiter un des effluents. Une ultime analyse pincement eau est réalisée sur ce procédé avec régénération (version V4).

Au final, 4 versions du procédé sont présentées (4 fichiers de simulation au format « .pmp3 ») :

- Procédé sans réutilisation (V1).
- Procédé actuel (V2).
- Procédé intégré (V3).
- Procédé intégré avec une unité de régénération (V4).

## 1.2 Schéma du procédé

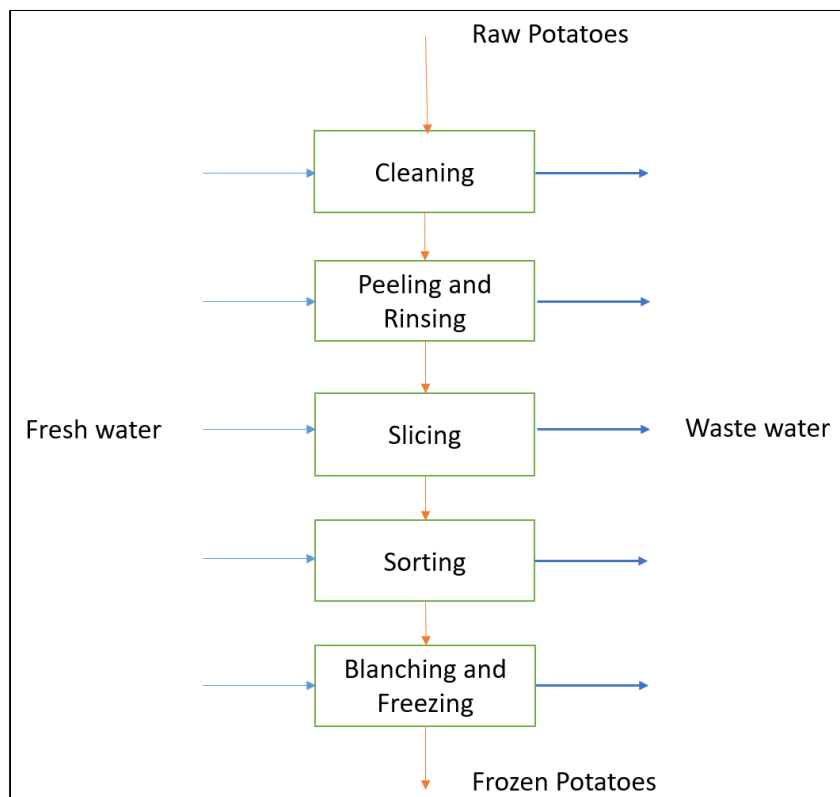
Ce procédé agro-alimentaire permet de passer d'un légume brut fraîchement récolté à un produit surgelé en 5 étapes principales :

- Lavage.
- Pelage et rinçage.
- Découpe.
- Triage optique.
- Blanchiment et surgélation.

Lors de l'étape de lavage, les impuretés restantes sont retirées du légume, comme par exemple la terre. Puis les légumes sont pelés et rincés, afin d'éliminer la peau et la terre restante sur les pommes de terre. Ensuite, celles-ci sont découpées, par exemple en forme de frites ou de chips. Les légumes mal découpés ou ne répondant pas au cahier des charges sont triés. En sortie de l'étape de triage, les frites sont blanchies avec de la vapeur, pour améliorer leur aspect visuel et la conservation du produit. Pour finir, elles sont congelées.

Initialement, les impuretés se trouvent dans le flux de transport des pommes de terre. Mais au cours de chaque opération la concentration des impuretés dans ce flux va diminuer, tandis que les courants d'eau vont se charger en impuretés ([GAR20] et [GAR21b]).

Il est important de noter la prépondérance de l'utilisation de l'eau dans toutes ces étapes et donc l'intérêt de réaliser une analyse de la consommation en eau du procédé.



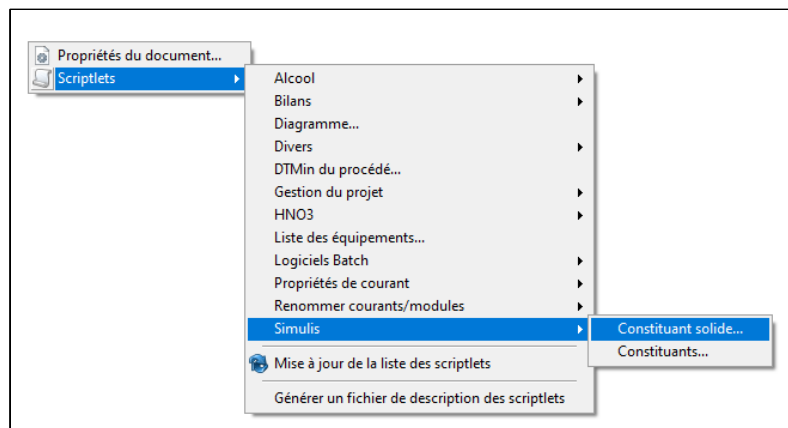
## 1.3 Constituants

### 1.3.1 Constituant « Potato »

La pomme de terre est composée à 75% d'amidon et 25% de matière sèche. Plus précisément la composition de l'amidon est décrite ci-dessous :

Elément	Pourcentage massique (%)
Carbone (C)	44.4
Hydrogène (H)	6.2
Oxygène (O)	49.4
Total	100

Le constituant « Pomme de terre » n'est bien entendu pas présent dans la base de données standard de ProSimPlus [WIL21]. Il doit donc être créé en tant que nouveau composé afin de réaliser la simulation via ProSimPlus. Pour cela, il existe le scriptlet « Constituant solide... », dont un exemple d'utilisation a été fourni dans l'exemple « PSPS\_EX\_FR-Central-CCGI ».

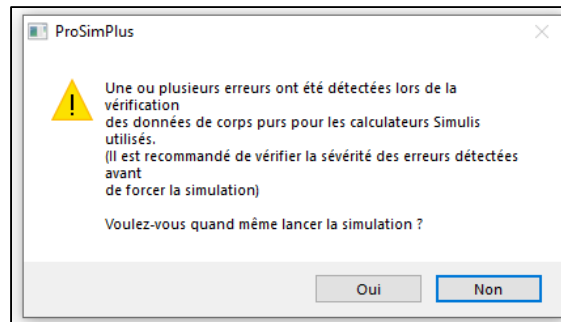


La matière sèche est modélisée par de la silice (Si) et la composition globale retenue pour créer le constituant « Potato » (pomme de terre) est la suivante :

Elément	Pourcentage massique (%)
Carbone (C)	33.30
Hydrogène (H)	4.65
Oxygène (O)	37.05
Silice (Si)	25.00
Total	100

Cette composition est renseignée via le scriptlet « Constituant solide... », afin de créer automatiquement ce nouveau constituant.

Lors de la création du constituant « Potato », certaines propriétés ne sont pas calculées et l'utilisateur doit les renseigner afin d'éviter l'avertissement suivant lors du démarrage de la simulation.



Les propriétés (de la pomme de terre) décrites ci-dessous sont manquantes :

- Viscosité liquide.
- Viscosité vapeur.
- Conductivité thermique liquide.
- Conductivité thermique vapeur.
- Tension superficielle.
- Température critique.

Pour ce cas d'étude, les propriétés ci-dessus sont renseignées à l'aide des propriétés du constituant Glucose présent dans ma base de données standard [WIL21]. Ces propriétés ne sont pas utilisées pour l'analyse du cas d'étude.

*Commentaire : il est également possible de ne pas renseigner les propriétés ci-dessus et d'utiliser le mode « Standard » ou « Médium » pour les formats d'impression dans le paramétrage du rapport de simulation.*

### 1.3.2 Constituant « COD » (Demande Chimique en oxygène)

Dans le cas du traitement de pommes de terre, il existe de nombreux contaminants, tel que le glucose, le fructose et divers matières organiques. Pour un souci de simplicité et pour illustrer la méthode du pincement eau, l'ensemble des contaminants est agrégé via un pseudo constituant « COD ». Ce pseudo-constituant permet de représenter la Demande Chimique en Oxygène (DCO). La DCO représente tout ce qui est susceptible de consommer de l'oxygène dans l'eau. Cette DCO représente la contamination qui limite les réutilisations d'eau au sein du procédé.

Pour ce cas d'étude, la DCO est majoritairement due à la présence importante de glucose. Le constituant « Glucose » est donc utilisé pour modéliser l'ensemble des sucres présents et la DCO de manière générale.

### 1.3.3 Liste globale des constituants

En résumé, les constituants pris en compte dans la simulation ainsi que leurs origines et leurs numéros CAS<sup>1</sup> sont présentés dans le tableau ci-après.

Constituant	Origine	Numéro CAS <sup>1</sup>
Potato	Constituant créé	55000-00-5
COD	Base de données standard (Glucose renommé)	50-99-7
WATER	Base de données standard	7732-18-5

<sup>1</sup>CAS Registry numbers® are the intellectual property of the American Chemical Society and are used by ProSim SA with the express permission of ACS. CAS Registry Numbers® have not been verified by ACS and may be inaccurate

### 1.4 Modèle thermodynamique

Le profil thermodynamique « Applications bio avec solides » est sélectionné. Ce profil thermodynamique est spécifiquement utilisé pour simuler les bio procédés pour lesquels il existe peu d'informations au sujet des composés solides.

De plus, l'objectif principal de cet exemple est de réaliser un bilan massique en eau du procédé. Les aspects équilibres thermodynamiques et calculs thermiques ne sont pas pris en compte. En effet, tous les calculs sont réalisés à 25°C et 1 atm (sauf l'étape de filtration du paragraphe « Filtre membrane spiralé » réalisée sous pression, cf. 1.8 Procédé intégré).

Ainsi le choix du modèle thermodynamique n'est-il pas déterminant pour l'analyse de ce cas d'étude.



## 1.5 Conditions opératoires

Dans toutes les versions simulées, le courant d'alimentation de pommes de terre et les paramètres des séparateurs de constituants sont identiques.

✓ Alimentation en pomme de terre

		Inlet Potatoes
Pourcentage massique	Potato	95.5
	COD	4.5
Débit massique total (t/h)		4.0
Température (°C)		25
Pression (atm)		1

✓ Séparateurs de constituants

		Cleaning	Peeling and Rinsing	Slicing	Sorting	Blanching and Freezing
Taux en tête	Potato	1	1	1	1	1
	COD	0.400335	0.5986	0.288256	0.979994	0.58843
	Water	0	0	0	0	0

Pour chaque séparateur de constituants, le produit de tête est le courant de pommes de terre, tandis que le produit de pied est l'eau rejetée.

## 1.6 Procédé sans réutilisation

L'objectif de cette partie est de réaliser un bilan d'eau et une analyse de pincement eau sur un procédé sans prendre en compte les réutilisations existantes. Ce cas sert ainsi de référence pour quantifier les réductions d'eau des réseaux d'eau proposés lors des différentes versions étudiées.

### 1.6.1 Schéma de simulation

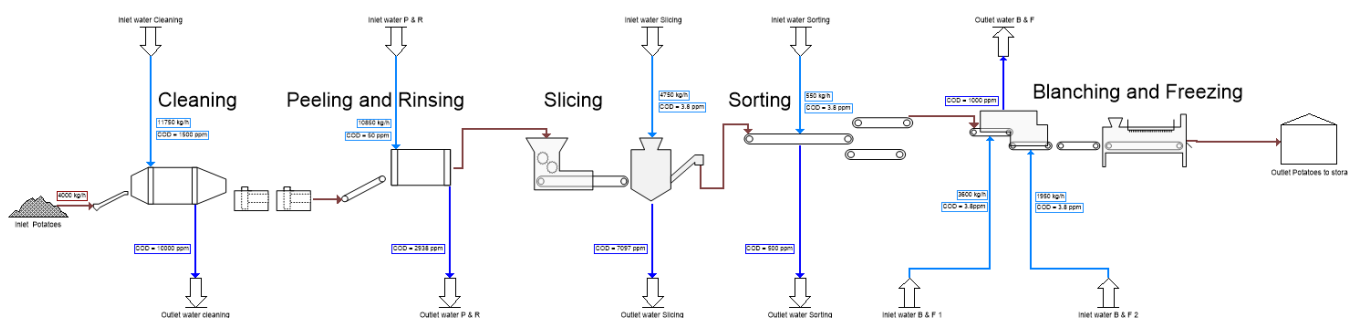


Schéma de simulation sans réutilisation

### 1.6.2 Conditions opératoires

Généralement, l'eau de ville ou domestique (« eau propre ») est utilisée en entrée des étapes des procédés agro-alimentaires. Cette eau est caractérisée par une absence de contamination (sans impureté pour le procédé). Dans cette configuration, il est impossible de réaliser une analyse de pincement eau. Plus précisément, il n'y a aucun recouvrement entre les courbes composées des puits et des sources du procédé et donc aucune amélioration n'est possible (cf.4 Annexe).

L'enjeu est de déterminer les opérations pouvant fonctionner avec un niveau de contamination plus élevé afin de proposer des réutilisations au sein du procédé.

Pour ce procédé, les étapes de lavage et de rinçage ont été identifiées comme étant des opérations pouvant fonctionner avec de l'eau chargée en contaminants (en DCO) sans effet sur les performances des appareils. C'est la raison pour laquelle le pourcentage massique en DCO de l'alimentation du lavage et du rinçage est plus important que celui des autres appareils.

✓ Alimentations en eau

		Inlet water					
		Cleaning	P & R	Slicing	Sorting	B & F 1	B & F 2
<b>Débit (kg/h)</b>		11 750	10850	4750	550	3600	1950
<b>Température (°C)</b>		25	25	25	25	25	25
<b>Pression (atm)</b>		1	1	1	1	1	1
<b>Pourcentage massique</b>	<b>Water</b>	99.85	99.995	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962
	<b>COD</b>	0.15	0.005	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038

### 1.6.3 Résultats

#### ✓ Bilan eau

<b>Bilan eau (consommation d'eau)</b>	m <sup>3</sup> /h	33.5
	kg/h	33 432

La quantité d'eau consommée pour le procédé sans la prise en compte des réutilisations existantes est de 33.5 m<sup>3</sup>/h (cette valeur servira de référence pour les comparaisons entre les différentes versions).

#### ✓ Analyse pincement eau

L'ensemble des puits et des sources avec leur débits et fractions massiques en contaminants est présent dans le rapport du module :

NOM DU COURANT	TYPE DE COURANT	DEBIT MASSIQUE (F) (kg/h)	MESURE DU CONTAMINANT (C) (-)
<a href="#">Out cleaning</a>	Source	11850.9	9.999996E-03
<a href="#">Out P &amp; R</a>	Source	10881.4	2.938492E-03
<a href="#">Out slicing</a>	Source	4783.93	7.096971E-03
<a href="#">Out sorting</a>	Source	550.273	4.999893E-04
<a href="#">Out B &amp; F</a>	Source	5555.53	9.999978E-04
<a href="#">In cleaning</a>	Puits	11750.0	1.500000E-03
<a href="#">In P &amp; R</a>	Puits	10850.0	5.000000E-05
<a href="#">In slicing</a>	Puits	4750.00	3.800001E-06
<a href="#">In sorting</a>	Puits	550.000	3.800001E-06
<a href="#">In B &amp; F 1</a>	Puits	3600.00	3.800001E-06
<a href="#">In B &amp; F 2</a>	Puits	1950.00	3.800001E-06

Analyse pincement eau	
<b>MWR : Quantité maximale d'eau réutilisable (kg/h)</b>	10 317
<b>FW : Quantité minimale d'eau propre (kg/h)</b>	23 133
<b>WW : Quantité minimale d'eau rejetée (kg/h)</b>	23 305

Les consommations actuelles en eau propre et les rejets actuels peuvent être calculés de la façon suivante :

$$\text{Consommation actuelle en eau} = \text{MWR} + \text{FW}$$

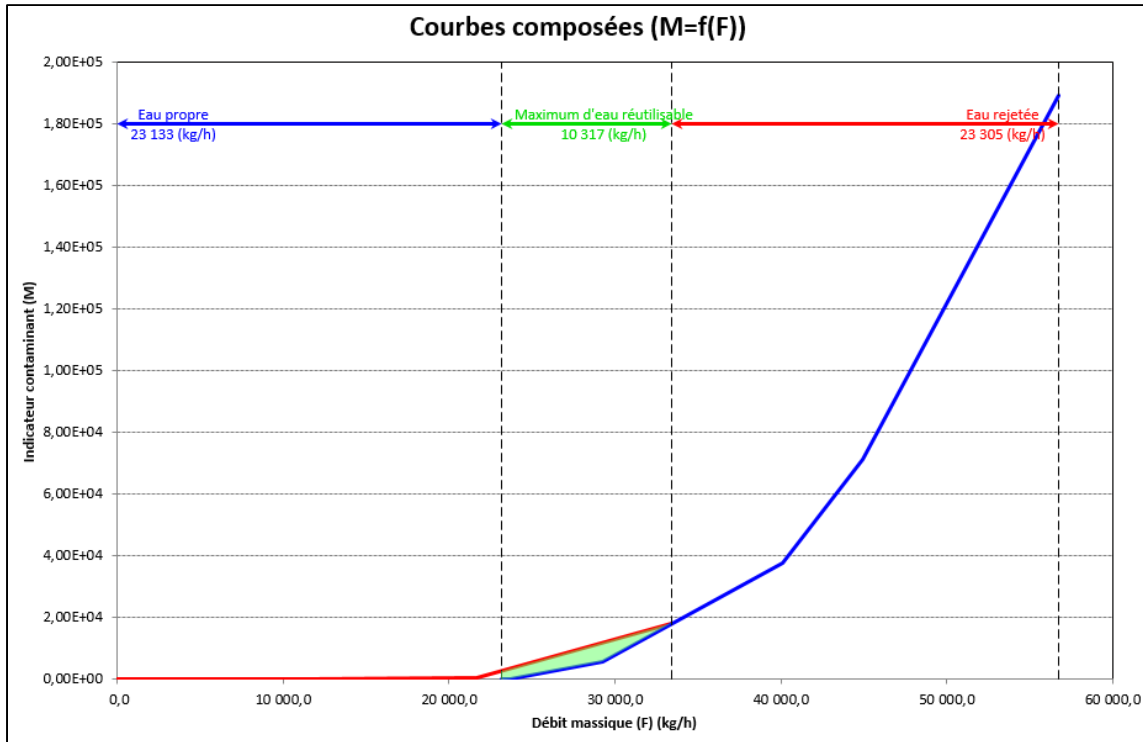
$$\text{Rejet actuel en eau} = \text{MWR} + \text{WW}$$

<b>Consommation en eau (kg/h)</b>	33 450
<b>Rejet en eau (kg/h)</b>	33 622

Remarque : Le module « Bilan eau » fournit des consommations et les rejets en eau du procédé sans prendre en compte les autres constituants. Le module « Analyse pincement eau » fournit le débit total des courants d'eau en prenant en compte les impuretés (contamination en DCO dans le cas présent). C'est la raison pour laquelle, les résultats ne sont pas exactement identiques entre le module « Bilan eau » et le module « Analyse pincement eau ». Dans tous les cas, la consommation d'eau du module « Bilan eau » est utilisée comme référence dans la suite du document.

## ✓ Courbes composées

Les courbes composées sont tracées automatiquement dans l'onglet « Profils » de ProSimPlus :



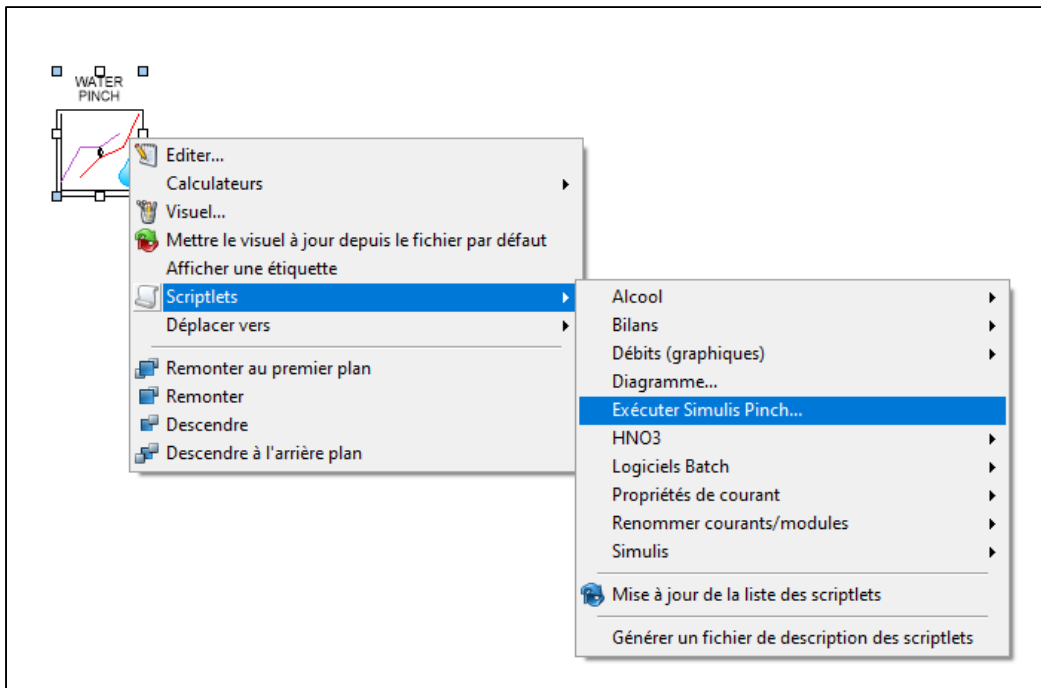
Le tracé des courbes composées est un des résultats principal de l'analyse de pincement eau. Pour cet exemple, il est possible de constater l'existence d'un potentiel de réutilisation (MWR) d'environ 10.3 t/h.

*Remarque : le graphique ci-dessus est extrait des résultats obtenus avec le logiciel Simulis Pinch Water.*

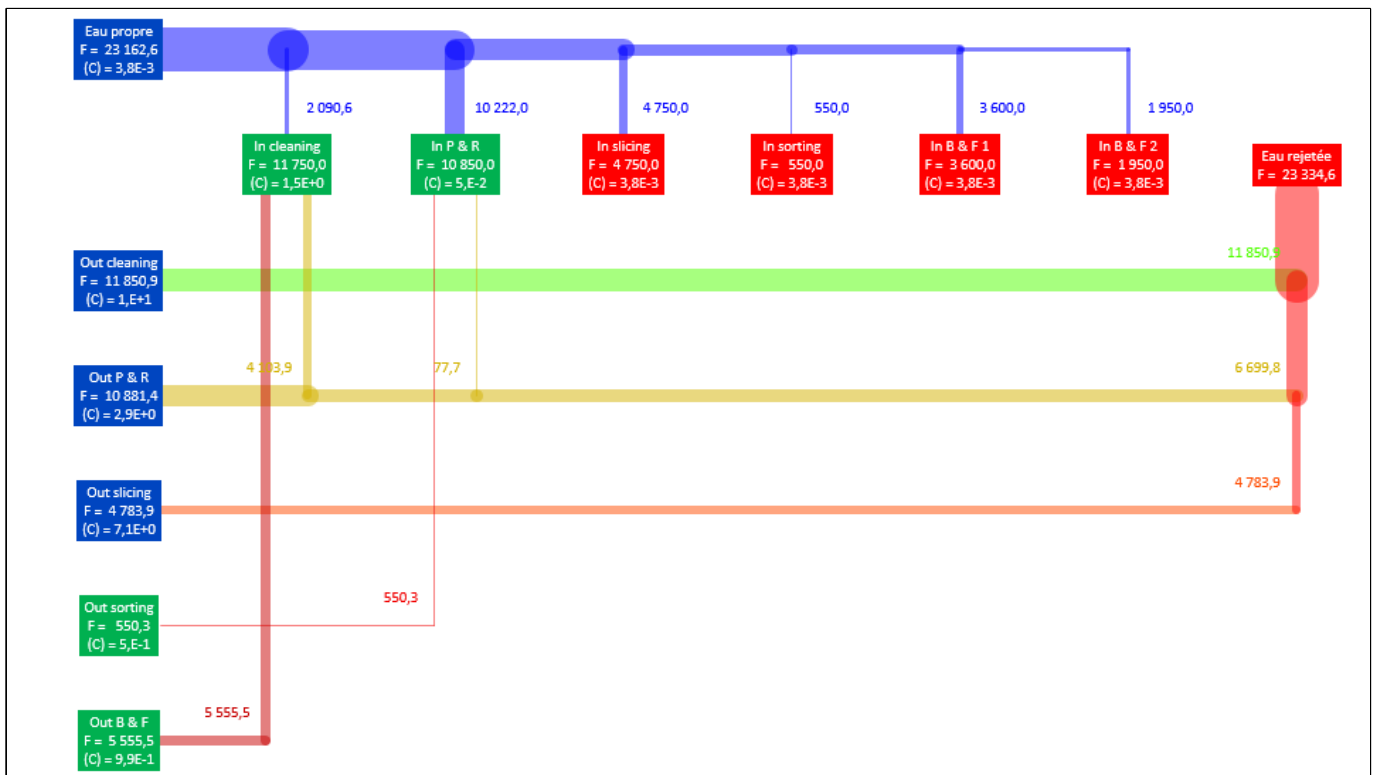
## ✓ Réseau d'eau

L'analyse pincement eau est un diagnostic en eau du procédé. Cette méthode ne propose pas directement un nouveau réseau d'eau permettant de réduire les consommations et les rejets en eau. ProSim a développé un outil permettant de répondre à cette problématique : Simulis Pinch. Cet outil fonctionne dans l'environnement Microsoft Excel®. Il existe 2 modules : « Simulis Pinch Energy » pour la proposition de réseaux d'échangeurs fondée sur la méthode du pincement thermique et « Simulis Pinch Water » pour la proposition de réseaux d'eau fondée sur la méthode du pincement eau.

Il est possible d'utiliser Simulis Pinch via un scriptlet dans l'environnement ProSimPlus. Après un clic droit sur le module « Analyse pincement eau » :



L'utilisation de Simulis Pinch Water permet de déterminer un nouveau réseau d'eau (une licence de ce logiciel est requise pour ce faire) :



Le réseau propose de réutiliser les courants de sortie de blanchiment et de tri optique afin de remplacer partiellement les entrées des opérations de lavage et pelage. De plus, les rejets d'eau de l'étape de pelage/rinçage pourraient être

réutilisés en partie pour alimenter également les opérations de lavage et de pelage. Dans ce cas, 99.71 % de l'eau est réutilisée soit  $\approx 10.3$  t/h

Le procédé actuel présente déjà des réutilisations directes entre les rejets des étapes de blanchiment et tri optique et les alimentations en eau des étapes de lavage et de pelage/rinçage. Les réutilisations existantes sont cohérentes avec le réseau proposé par Simulis Pinch Water : ces réutilisations sont donc pertinentes.

## 1.7 Procédé actuel

Cette seconde version (V2) permet de modéliser le procédé dans sa configuration actuelle. Une analyse pincement eau et les données de la version précédente (V1) vont permettre de quantifier les performances du procédé actuel.

### 1.7.1 Schéma de simulation

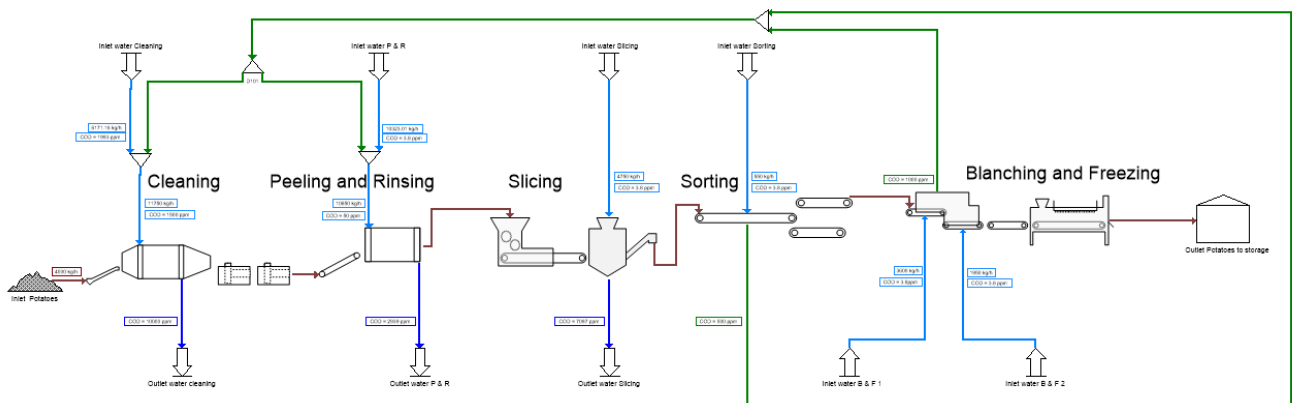


Schéma de simulation du procédé actuel

### 1.7.2 Conditions opératoires

✓ Alimentations en eau

		Inlet water					
		Cleaning	P & R	Slicing	Sorting	B & F 1	B & F 2
Débit (kg/h)		6 171	10 323	4 750	550	3 600	1 950
Température (°C)		25	25	25	25	25	25
Pression (atm)		1	1	1	1	1	1
Pourcentage massique	Water	99.8007	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962
	COD	0.1993	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038

✓ Diviseur du courant de recyclage

<b>Paramètres opératoires</b>	D101
<b>Type de spécification</b>	Débit massique
<b>Débit massique d'eau pour le rinçage (kg/h)</b>	527

### 1.7.3 Résultats

✓ Bilan eau

<b>Bilan d'eau (consommation d'eau)</b>	m³/h	27.4
	kg/h	27 332

✓ Analyse pincement eau

NOM DU COURANT	TYPE DE COURANT	DEBIT MASSIQUE (F) (kg/h)	MESURE DU CONTAMINANT (C) (-)
<a href="#">Out Slicing</a>	Source	4783.93	7.097024E-03
<a href="#">out Cleaning</a>	Source	11850.9	1.000009E-02
<a href="#">Out P &amp; R</a>	Source	10881.4	2.938514E-03
<a href="#">In Cleaning</a>	Puits	6171.16	1.993000E-03
<a href="#">In P &amp; R</a>	Puits	10323.0	3.800000E-06
<a href="#">In Slicing</a>	Puits	4750.00	3.800001E-06
<a href="#">In Sorting</a>	Puits	550.000	3.800001E-06
<a href="#">In B &amp; F 1</a>	Puits	3600.00	3.800001E-06
<a href="#">In B &amp; F 2</a>	Puits	1950.00	3.800001E-06

Les réutilisations déjà présentes sur le site ont pour effet de réduire le nombre de sources, passant de 5 à 3. De plus les débits et concentrations de certains puits ont diminué avec la prise en compte des réutilisations existantes.

<b>Analyse pincement eau</b>	
<b>MWR : Quantité maximale d'eau réutilisable (kg/h)</b>	4 212
<b>FW : Quantité minimale d'eau propre (kg/h)</b>	23 132
<b>WW : Quantité minimale d'eau rejetée (kg/h)</b>	23 304
<b>Consommation en eau (kg/h)</b>	27 344
<b>Rejet en eau (kg/h)</b>	27 516

L'analyse du pincement eau permet de montrer qu'il existe encore un potentiel d'intégration (MWR) pour le procédé actuel. Ainsi le réseau d'eau actuellement présent sur le site n'est-il pas le réseau optimal. Il reste ≈40% du MWR calculé lors de la première étape (simulation V1). L'outil Simulis Pinch Water permet de proposer une réutilisation supplémentaire entre les rejets de l'étape de pelage/rinçage et l'entrée en eau du lavage. Cette réutilisation est mise en place dans la version V3.

## 1.8 Procédé intégré

Pour cette version, le procédé actuel avec la réutilisation supplémentaire entre l'étape de pelage/rinçage et le lavage est mise en place. Grâce à cette réutilisation, 99.3 % de l'eau est réutilisée au sein du procédé via des réutilisations directes (sans unité de régénération). En l'état, il est impossible de diminuer significativement la consommation d'eau en ajoutant de nouvelles réutilisations ( $MWR \approx 0$  kg/h).

Néanmoins, pour continuer à réduire les consommations en eau, il est possible d'utiliser une ou plusieurs unité(s) de régénération. Les unités de régénération ont pour but de purifier un ou plusieurs rejet(s) en eau (en éliminant les contaminants) afin de pouvoir le ou les réutiliser au sein du procédé.

La version V3 permet de modéliser le réseau d'eau intégré présenté dans les résultats de la version V2 ainsi qu'une unité de régénération.

En analysant les concentrations et les débits des rejets, le rejet de l'étape de pelage/rinçage est la plus pertinente pour tester la mise en place d'une unité de régénération. Un filtre à membrane (unité de régénération) est ajouté pour traiter le rejet de l'étape pelage/rinçage.

L'intérêt de ce filtre à membrane est de diminuer la charge en contaminants afin de réutiliser le flux traité au sein du procédé.

### 1.8.1 Schéma de simulation

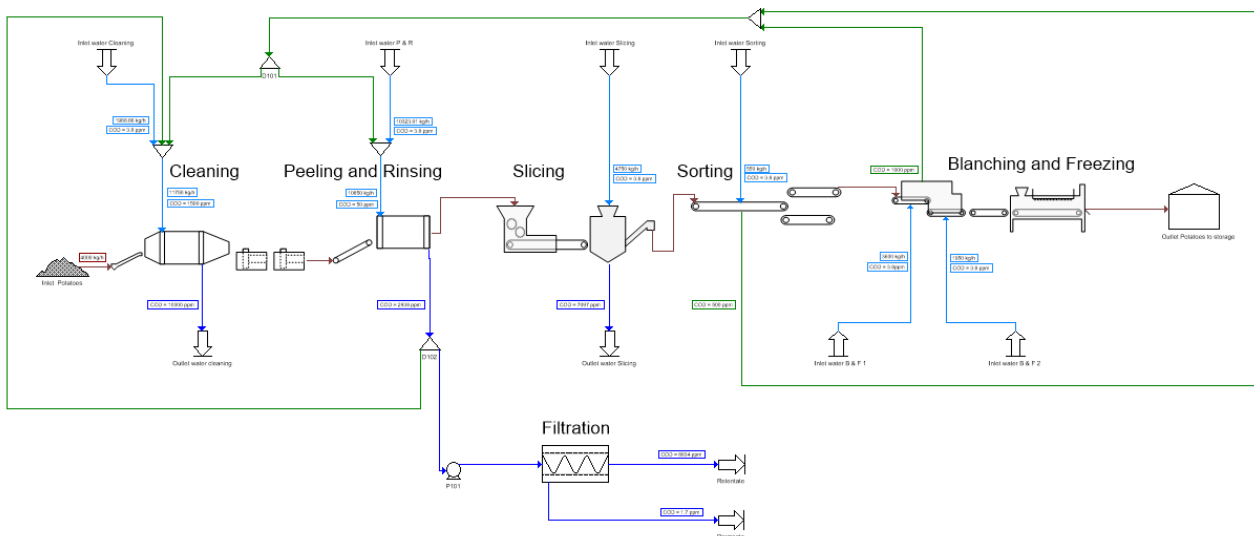


Schéma de simulation du procédé intégré



### 1.8.2 Conditions opératoires

✓ Alimentations en eau

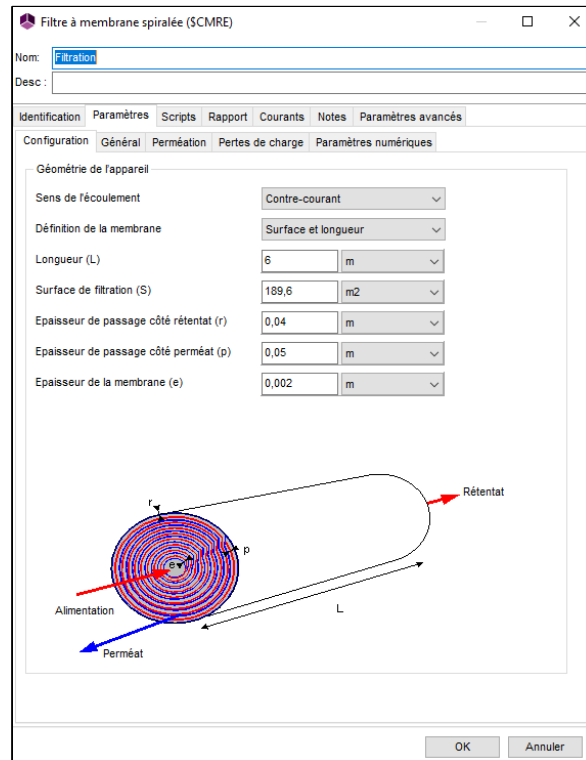
		Inlet water					
		Cleaning	P & R	Slicing	Sorting	B & F 1	B & F 2
<b>Débit (kg/h)</b>		1 989	10 323	4 750	550	3 600	1 950
<b>Température (°C)</b>		25	25	25	25	25	25
<b>Pression (atm)</b>		1	1	1	1	1	1
<b>Pourcentage massique</b>	<b>Water</b>	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962
	<b>COD</b>	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038

✓ Pompe centrifuge

<b>Pression de refoulement (bar)</b>	6.5585
<b>Efficacités volumétrique</b>	0.65
<b>Efficacités mécanique</b>	0.95
<b>Efficacités électrique</b>	0.99

✓ Filtre membranaire spiralé

Les paramètres de design et opératoires du filtre sont présentés dans les 5 onglets suivants:



## 1. Configuration

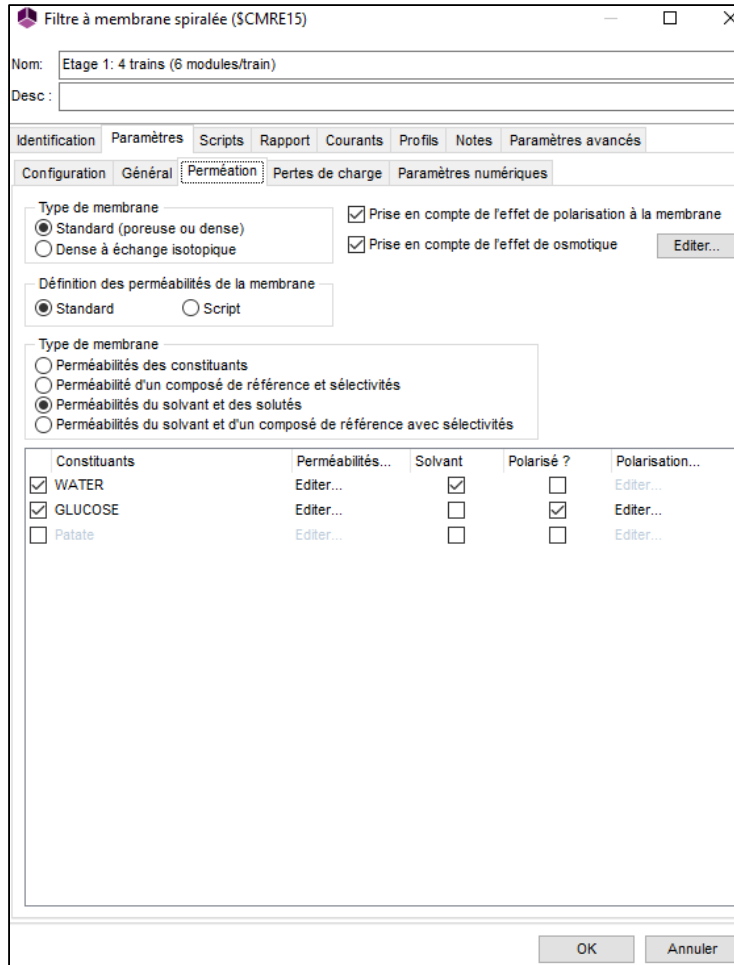
<b>Sens de l'écoulement</b>	Contre-courant
<b>Définition de la membrane</b>	Surface et longueur
<b>Longueur (m)</b>	6
<b>Surface (m<sup>2</sup>)</b>	189.6
<b>Epaisseur de passage coté rétentat (m)</b>	0.04
<b>Epaisseur de passage coté perméat (m)</b>	0.05
<b>Epaisseur de la membrane (m)</b>	0.002

## 2. Général

<b>Température (°C)</b>	25
<b>Etat physique</b>	Liquide
<b>Pression coté perméat (bar)</b>	1

### 3. Perméation

L'ensemble des cases suivantes doivent être cochées :



Les valeurs par défaut pour la définition de l'effet osmotique sont utilisées. En revanche les valeurs de perméabilités et de polarisation, de l'eau et du composé « COD » sont renseignées comme suit :

Perméabilité de l'eau	
Modèle de perméation	Pression partielle
Type de définition	Constant
Type	Volume
Perméabilité molaire (m <sup>2</sup> /h/atm)	1.058 × 10 <sup>-5</sup>

Perméabilité COD	
Modèle de perméation	Concentration
Perméabilité (m/s)	$1.65 \times 10^{-9}$
Polarisation COD	
Modèle pour le calcul du coefficient de transfert de masse (ki)	Constant
ki (m/s)	$2.02 \times 10^{-5}$

4. Pertes de charge

Les valeurs par défaut sont utilisées.

5. Paramètres numériques

Seul le nombre de cellules est modifié à 200.

✓ Diviseurs du courant pour les réutilisations

Paramètres opératoires	D101
Type de spécification	Débit massique
Débit massique d'eau pour le rinçage (kg/h)	527

Paramètres opératoires	D102
Type de spécification	Débit massique
Débit massique d'eau pour le lavage (kg/h)	4182.3

### 1.8.3 Résultats

✓ Bilan eau

<b>Bilan d'eau (consommation d'eau)</b>	m³/h	23.2
	kg/h	23 162

✓ Analyse pincement eau

NOM DU COURANT	TYPE DE COURANT	DEBIT MASSIQUE (F) (kg/h)	MESURE DU CONTAMINANT (C) (-)
<a href="#">Out Cleaning</a>	Source	11850.9	9.999992E-03
<a href="#">Out Slicing</a>	Source	4783.93	7.096953E-03
<a href="#">Retentate</a>	Source	2196.90	8.834321E-03
<a href="#">Permeate</a>	Source	4501.99	1.744950E-06
<a href="#">In Cleaning</a>	Puits	1988.86	3.800000E-06
<a href="#">In P &amp; R</a>	Puits	10323.0	3.800000E-06
<a href="#">In Slicing</a>	Puits	4750.00	3.800001E-06
<a href="#">In Sorting</a>	Puits	550.000	3.800001E-06
<a href="#">In B &amp; F 1</a>	Puits	3600.00	3.800001E-06
<a href="#">In B &amp; F 2</a>	Puits	1950.00	3.800001E-06

La concentration de tous les puits est de 3.8 ppm. Seule une source ayant une concentration inférieure à cette valeur pourrait être utilisée afin de créer une réutilisation supplémentaire. La concentration du perméat est de 1.7 ppm. Donc une réutilisation est possible.

<b>Analyse pincement eau</b>	
<b>MWR : Quantité maximale d'eau réutilisable (kg/h)</b>	4 513
<b>FW : Quantité minimale d'eau propre (kg/h)</b>	18 649
<b>WW : Quantité minimale d'eau rejetée (kg/h)</b>	18 820
<b>Consommation en eau (kg/h)</b>	23 162
<b>Rejet en eau (kg/h)</b>	23 333

L'unité de régénération permet de diminuer la concentration du rejet pelage/rinçage de 2938 ppm à 1.7 ppm. Dans ces conditions (le courant de perméat avec faible concentration), le module « Analyse pincement eau » permet de montrer qu'une réutilisation d'environ 4.5 t/h est possible.

## 1.9 Procédé intégré avec unité de régénération

Dans cette ultime version, le procédé totalement intégré avec les différentes réutilisations et l'unité de régénération est simulé. Le module « Bilan eau » est utilisé comme dans les versions précédentes afin de déterminer la consommation d'eau et ainsi quantifier l'amélioration du réseau d'eau.

### 1.9.1 Schéma de simulation

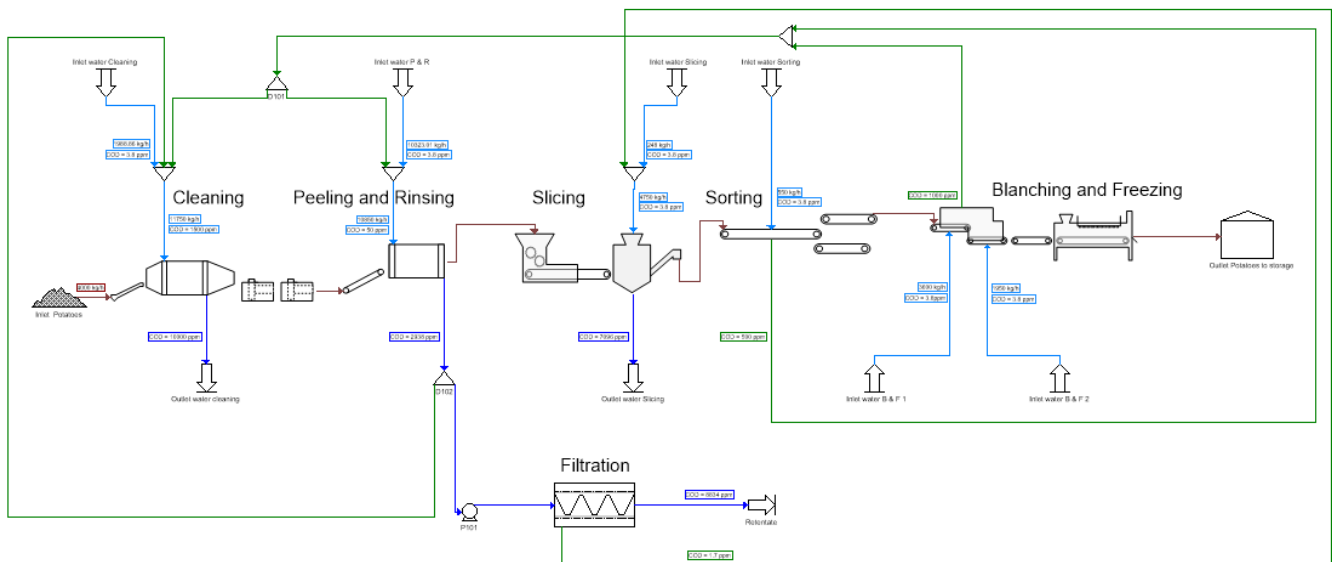


Schéma de simulation du procédé intégré avec unité de régénération

### 1.9.2 Conditions opératoires

✓ Alimentations en eau

		Inlet water					
		Cleaning	P & R	Slicing	Sorting	B & F 1	B & F 2
<b>Débit (kg/h)</b>		1 989	10 323	248	550	3 600	1 950
<b>Température (°C)</b>		25	25	25	25	25	25
<b>Pression (atm)</b>		1	1	1	1	1	1
<b>Pourcentage massique</b>	<b>Water</b>	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962	99.99962
	<b>COD</b>	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038

Les paramètres des diviseurs, des séparateurs de constituants et du filtre sont identiques à la version précédente (V3).

### 1.9.3 Résultats

#### ✓ Bilan eau

<b>Bilan d'eau (consommation d'eau)</b>	m <sup>3</sup> /h	18.7
	kg/h	18 660

#### ✓ Analyse pincement eau

NOM DU COURANT	TYPE DE COURANT	DEBIT MASSIQUE (F) (kg/h)	MESURE DU CONTAMINANT (C) (-)
<a href="#">Out Cleaning</a>	Source	11850.9	9.999934E-03
<a href="#">Retentate</a>	Source	2196.89	8.834283E-03
<a href="#">Out Slicing</a>	Source	4783.93	7.095524E-03
<a href="#">In Cleaning</a>	Puits	1988.86	3.800000E-06
<a href="#">In P &amp; R</a>	Puits	10323.0	3.800000E-06
<a href="#">In Slicing</a>	Puits	248.000	3.800001E-06
<a href="#">In Sorting</a>	Puits	550.000	3.800001E-06
<a href="#">In B &amp; R 1</a>	Puits	3600.00	3.800001E-06
<a href="#">In B &amp; R 2</a>	Puits	1950.00	3.800001E-06

Toutes les concentrations des puits sont inférieures à celles des sources. Il n'y a plus de réutilisation possible. Les débits des différents courants (alimentations et rejets en eau) ont diminué au cours des différentes versions, d'où l'intérêt de cette méthode.

<b>Analyse pincement eau</b>	
<b>MWR : Quantité maximale d'eau réutilisable (kg/h)</b>	10
<b>FW : Quantité minimale d'eau propre (kg/h)</b>	18 650
<b>WW : Quantité minimale d'eau rejetée (kg/h)</b>	18 822
<b>Consommation en eau (kg/h)</b>	18 660
<b>Rejet en eau (kg/h)</b>	18 832

La consommation et le rejet en eau sont inférieurs à ceux de la version sans filtre à membrane. La consommation en eau est réduite de 23.2 m<sup>3</sup>/h à 18.7 m<sup>3</sup>/h. Le filtre à membrane a permis de créer une source à faible concentration en contaminant (le perméat) afin de le réutiliser au sein du procédé.

## 2 CONCLUSION

Le tableau ci-dessous présente le comparatif des différentes versions du procédé de production de pommes de terre surgelées :

Nom	Procédé sans réutilisation	Procédé actuel	Procédé intégré	Procédé intégré avec unité de régénération
Version	V1	V2	V3	V4
Consommation électrique pompe (kW)	0	0	0	1.7
Consommation eau (m <sup>3</sup> /h)	33.5	27.5	23.3	18.6
Rejet en eau (m <sup>3</sup> /h)	33.7	27.6	23.4	18.9
Consommation spécifique (m <sup>3</sup> /t)	8.4	6.9	5.8	4.7
Réduction consommation en eau (%)	0	18.1	30.7	44.5

La consommation en eau du procédé de référence (sans réutilisation) est d'environ 33.5 m<sup>3</sup>/h.

La mise en place de réutilisations et d'une unité de régénération ont permis de diminuer les consommations en eau du procédé d'environ 44%. Par rapport aux consommations du procédé actuel (V2), la réduction est de 27.5 – 18.6 = 8.9 m<sup>3</sup>/h soit ≈ 26%.

L'utilisation d'unités de régénération (comme la filtration membranaire) permet de réduire les consommations en eau en augmentant les potentiels de réutilisation. En contrepartie, ces équipements sont souvent plus onéreux (coût de maintenance, remplacement de pièces, consommation électrique...) comparé à la mise en place de réutilisation directe à faible coût (coûts des tuyauteries et des pompes essentiellement). Une analyse technico économique est alors nécessaire pour évaluer les solutions proposées.

Les différentes améliorations proposées ont permis de diminuer la consommation spécifique en eau du procédé de 8.4 à 4.7 m<sup>3</sup> par tonne de pommes de terre surgelées.



### 3 BIBLIOGRAPHIE

- [CAN03] Ressources naturelles Canada, "L'analyse Pinch: pour l'utilisation efficace de l'énergie, de l'eau, de l'hydrogène" (2003).
- [GAR20] GARNIER C., GUIGA W., LAMELOISE M.L., DEGRAND L., FARGUES C., Toward the reduction of water consumption in the vegetable-processing industry through membrane technology: case study of a carrot-processing plant, SPRINGER (2020).
- [GAR21a] GARNIER C., GUIGA W., LAMELOISE M.L., DEGRAND L., FARGUES C., Treatment of cauliflower processing wastewater by nanofiltration and reverse osmosis in view of recycling, ELSEVIER (2021).
- [GAR21b] GARNIER C., "Recyclage d'eau au sein des industries agroalimentaires : Etude du traitement par procédés membranaires dans le cas de l'industrie des fruits et légumes surgelés", Thèse (NNT : 2020UPASA001) (2021).
- [WIL21] WILDING, W. V., KNOTTS, T. A., GILES, N. F., ROWLEY, R. L. DIPPR Data Compilation of Pure Chemical Properties; Design Institute for Physical Properties, AIChE, New York, NY (2021).

## 4 ANNEXE

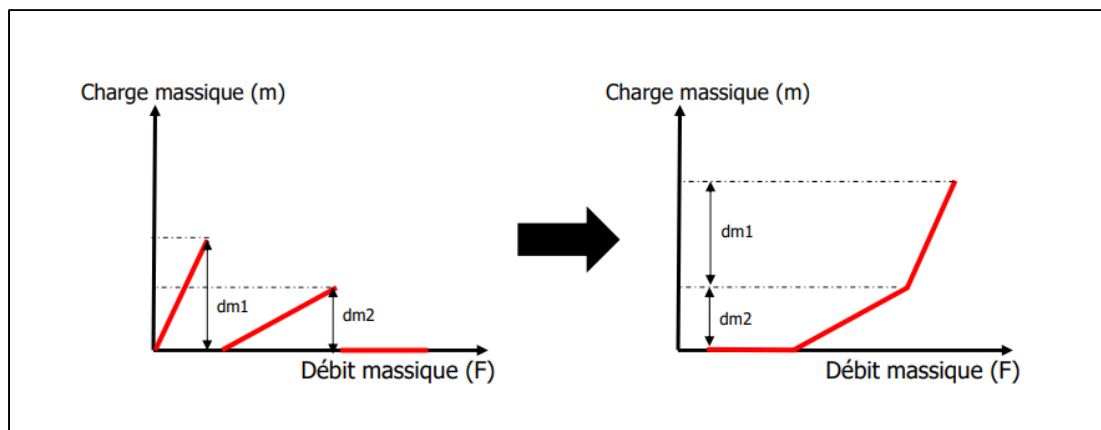
L'analyse pincement, ou analyse Pinch, est une méthode rigoureuse et structurée permettant d'optimiser la consommation et les rejets d'un procédé. Cette analyse (ou méthode) du pincement a été initialement développée et appliquée au domaine de l'énergie (pincement thermique).

La principale caractéristique de l'analyse Pinch est de permettre de déterminer, pour un procédé ou une usine donnée, la consommation minimale en énergie, en eau ou encore en hydrogène nécessaire à son fonctionnement. Il est donc possible d'évaluer le potentiel maximum d'amélioration, et ceci avant même de débiter des travaux de conception détaillée. L'approche peut être appliquée de manière systématique au niveau de chacun des procédés de l'usine ou de manière globale pour l'ensemble du site.

Les économies typiques identifiées dans le cadre d'une analyse Pinch dans des secteurs industriels tels que le raffinage de pétrole, la chimie, la sidérurgie, les pâtes et papiers, la pétrochimie et l'agroalimentaire sont de l'ordre de 10 à 35% [CAN03] pour l'application du pincement thermique.

La première étape de la méthode du pincement est de construire les courbes composées (aussi appelées courbes composites). Pour construire ces courbes via la méthode du pincement eau, il faut connaître les valeurs des débits  $F$  (en t/h par exemple), et les concentrations en contaminant  $C$  (en ppm par exemple) pour chaque courant d'entrée et de sortie du procédé. Les courbes composées représentent le profil des sources d'eau disponibles (« courbe composite source ») et le profil des besoins en eau (« courbe composite puits »). Selon leur forme et leur emplacement, ces courbes renseignent sur les possibilités de récupération d'eau au sein du procédé.

La figure suivante montre la construction de la courbe composée source sur un diagramme Charge massique-Débit massique. La courbe composite source est construite tout simplement en cumulant la charge et le débit des courants pris par valeur de charge croissante.



La construction est fondée sur la relation :

$$m = \frac{F \times C}{1000}$$

Avec :

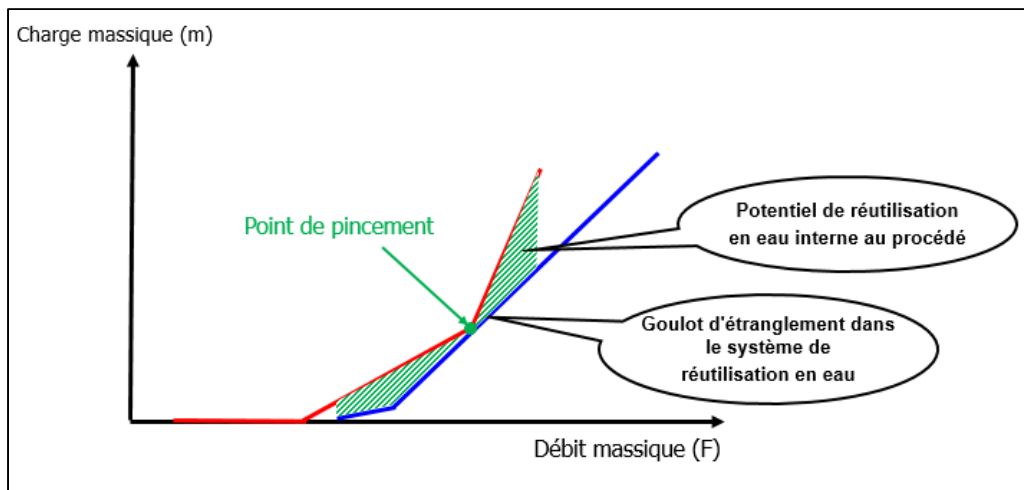
$m$  : Charge massique du contaminant (kg/h)

$F$  : Débit massique(t/h)

$C$  : Concentration en contaminant (ppm)

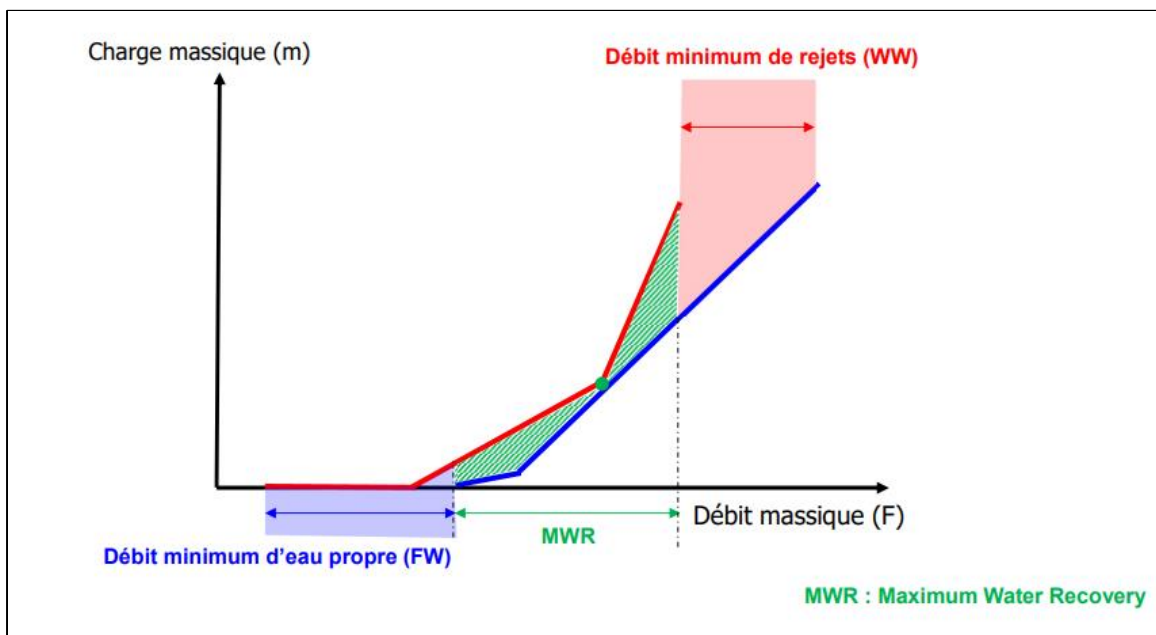
La courbe composée puits est obtenue de la même façon.

Pour établir les cibles de consommations et de rejets minimales d'eau du procédé étudié, la courbe composite puits (en rouge) est positionnée sur le même diagramme que celui de la courbe composite source (en bleue).



Les 2 courbes sont translattées horizontalement jusqu'à ce qu'elles se touchent. La courbe composée puits doit être au-dessus de la courbe composée source. Le point de contact entre les deux courbes est appelé « point de pincement ».

La zone de recouvrement des deux courbes représente la quantité maximale d'eau réutilisable (MWR : Maximum Water Reuse). Les zones à l'extérieur de la zone de recouvrement représentent respectivement le débit minimum d'eau propre (FW : Fresh Water) et le débit minimum de rejets (WW : Waste Water).



L'analyse Pinch permet donc d'établir les cibles de consommations et de rejets minimales d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins d'un procédé, et ce, avant même de commencer la conception du réseau de réutilisation d'eau. Cela permet d'identifier rapidement l'ampleur des économies d'eau qui peuvent être envisagées à un stade préliminaire de l'analyse. Cet avantage est probablement le plus intéressant qu'offre l'analyse Pinch.