

# PinCH Tutoriel 1

Bienvenue ! L'équipe PinCH de la Haute Ecole Spécialisée de Lucerne propose des tutoriels pour le logiciel PinCH afin de vous présenter les possibilités du logiciel et la manière de l'utiliser. Grâce à ces tutoriels, vous apprendrez les bases de l'utilisation de PinCH pour l'optimisation de l'énergie et des coûts dans les procédés industriels :

<a href="#">PinCH Tutoriel 0</a>	Aperçu rapide
<b><a href="#">PinCH Tutoriel 1</a></b>	<b>Procédé continu</b>
<a href="#">PinCH Tutoriel 2</a>	Cas de fonctionnement multiples
<a href="#">PinCH Tutoriel 3</a>	Procédé discontinu
<a href="#">PinCH Tutoriel 4</a>	Intégration de stockages d'énergie thermique

Les tutoriels sont séquentiels. Si vous utilisez PinCH pour la première fois, nous vous recommandons de commencer par ce [Tutoriel 0](#) intitulé "Aperçu rapide".

Les tutoriels et les fichiers PinCH associés "complétés" peuvent être téléchargés à partir du site [www.pinch-analyse.ch/fr](http://www.pinch-analyse.ch/fr). Les tutoriels peuvent être exécutés avec la version d'essai de PinCH (version complète, mais limitée à huit flux de procédé). Pour obtenir la version d'essai, veuillez envoyer un courriel à [pinch@heig-vd.ch](mailto:pinch@heig-vd.ch).

Les tutoriels sont disponibles en allemand, anglais et français. Les intitulés dans les diagrammes d'écoulement (process flow diagrams) et les noms des procédés, des flux, etc., ainsi que les termes liés au logiciel, sont toujours en anglais. La devise utilisée est l'Euro.

**Les tutoriels se concentrent sur l'utilisation du logiciel PinCH.** On suppose que vous connaissez les principes de base de l'Analyse Pinch (aussi appelée méthode du pincement). Nous recommandons les ouvrages suivants comme introduction ou pour un approfondissement de l'Analyse Pinch.

- F. Brunner, P. Krummenacher: Introduction à l'intégration énergétique de procédés par l'Analyse Pinch - Manuel pour l'analyse de procédés continus et de procédés batch. Office fédéral de l'énergie OFEN, 2017 [Manuel - Pinch - OFEN](#) (téléchargeable depuis [www.pinch-analyse.ch/fr](http://www.pinch-analyse.ch/fr))
- R. Smith : Chemical Process Design and Integration. 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 2016 ; Analyse Pinch à partir du chapitre 15 (ISBN 9781119990130)
- I. C. Kemp : Pinch Analysis and Process Integration – A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007 (ISBN 978-0-7506-8260-2)

Vous travaillez actuellement le [Tutoriel 1](#). Le tutoriel concerne l'analyse et l'optimisation d'un procédé de production dans l'industrie chimique, qui opère en continu. Le contenu de ce tutoriel est structuré comme suit :

## Table des matières

I. Introduction au <b>Tutoriel 1</b>	2
II. Étude de cas : procédé chimique	3
III. 10 étapes dans PinCH	7
IV. Procédé optimisé	28

### I Introduction au **Tutoriel 1**

**Objectif d'apprentissage :** Effectuer une analyse **PinCH** d'un procédé continu

**Durée :** 2 à 3 heures

Pour débiter avec le logiciel **PinCH**, nous considérons dans ce tutoriel un procédé continu. Le cas étudié est donc simplifié pour des raisons didactiques. Ce **Tutoriel 1** vous guide à travers une analyse Pinch, afin de vous familiariser avec l'utilisation et les fonctionnalités de ce logiciel. Pour l'optimisation énergétique et économique d'un procédé continu, vous passerez par les étapes suivantes (**les étapes 2, 7 et 9** ne sont pas nécessaires pour le cas étudié) :

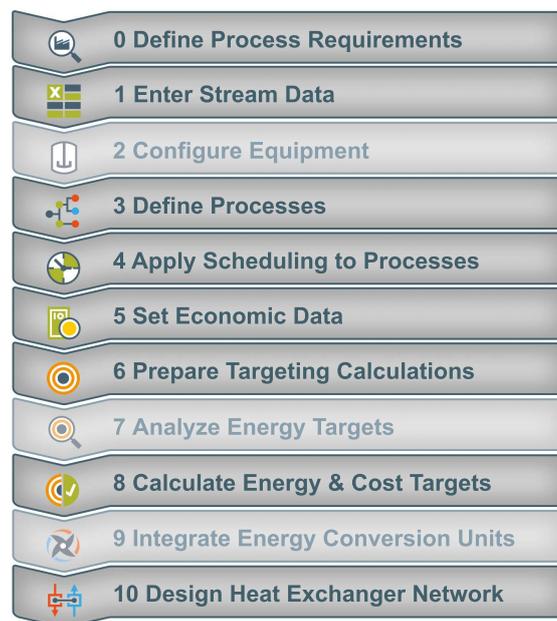


FIGURE 1 – Etapes de travail dans **PinCH** pour l'optimisation d'un procédé continu.

L'équipe **PinCH** de la Haute Ecole Spécialisée de Lucerne espère que vous trouverez ce tutoriel instructif et vous souhaite beaucoup de succès !

## II Étude de cas : procédé chimique

### Description du procédé

Dans une usine de production de la société *Chimie Fine SA*, deux réactifs (Reactant A et Reactant B) sont combinés ensemble dans un réacteur pour produire un produit chimique de base. Ensuite, le mélange réactionnel résultant (Reaction Mixture) est séparé en un produit C (Product C) et un flux de recyclage (Recycling Stream) dans une colonne de distillation. Le mélange réactionnel est préchauffé avant d'entrer dans la colonne et le produit C et le flux de recyclage sont refroidis après avoir quitté la colonne. Le diagramme d'écoulement du procédé est illustré à la Figure 2. Toutes les données nécessaires à l'analyse Pinch sont résumées dans la Table 1.

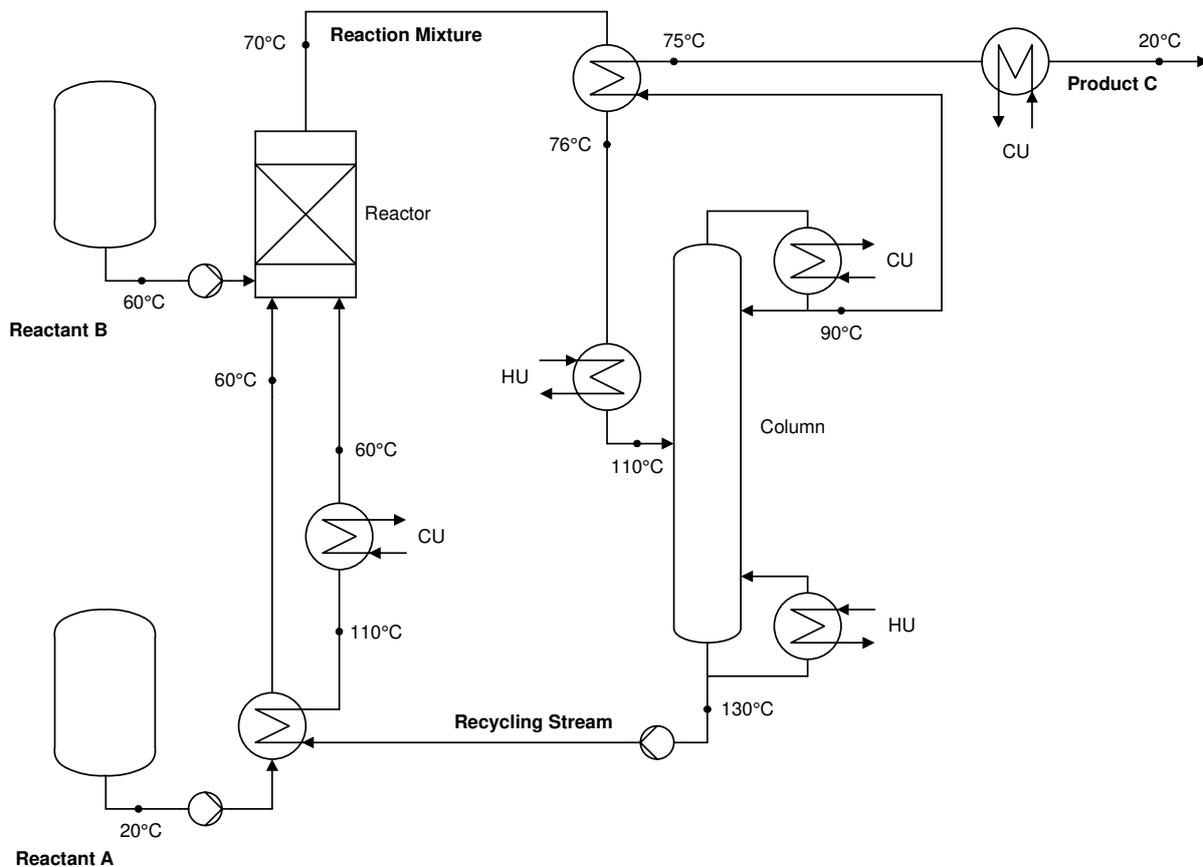


FIGURE 2 – Diagramme d'écoulement du procédé existant

TABLE 1 – Flux de procédé

Process Streams	$\dot{m}$ [kg/s]	$c_p$ [kJ/(kg K)]	$\alpha$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
Reactant A	1	2.5	1'000
Reactant B	0.5	1.9	1'000
Reaction Mixture	4	2.4	1'000
Product C	1.5	2.5	1'000
Recycling Stream	2.5	2.0	1'000

## Calendrier d'exploitation

Ce procédé chimique (Chemical Process) travaille en continu avec une durée de fonctionnement annuelle  $\tau = 7'000$  h/an.

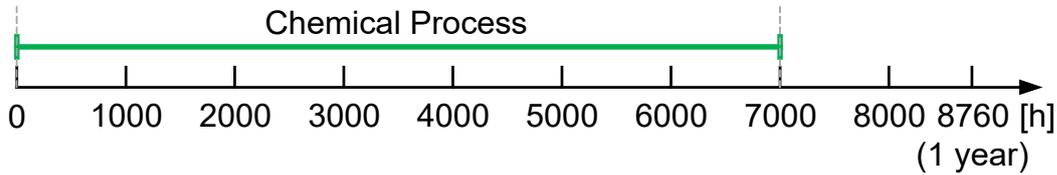


FIGURE 3 – Diagramme de Gantt du procédé

## Utilités (alimentation en énergie)

Pour chauffer et refroidir les flux de procédé, les Flux d'utilité (Tableau 2) sont à disposition. L'utilité chaude (Hot Utility (HU)) utilisée est de la vapeur saturée. De cette manière, la température de l'utilité chaude est constante et ne comprend qu'une enthalpie de condensation sur ce flux. Ainsi, l'utilité chaude est définie par  $x$  (titre de vapeur) pour les valeurs de  $T_{in}$  et  $T_{out}$  et par  $p$  (pression). De l'eau glacée est utilisée comme utilité froide (Cold Utility (CU)).

TABLE 2 – Utilités

Utilities	$T_{in}$ [°C]	$T_{out}$ [°C]	$p$ [bar(a)]	$\alpha$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$c$ [€/MWh]
Hot Utility	$x=1$	$x=0$	4	5'000	70
Cold Utility	6	12	3	2'000	40

Les coûts d'exploitation annuels  $C_{Op}$  [€/an] correspondent aux coûts énergétiques totaux  $C_{En}$  [€/an], supposant les coûts de maintenance et de personnel négligeables (voir équation 1). Dans cette équation,  $\tau$  [h/an] correspond à la durée de fonctionnement annuelle,  $\dot{Q}$  [kW] est la demande en utilité chaude (HU) et froide (CU) alors que  $c$  [€/MWh] est le prix des utilités.

$$C_{Op} = C_{En} = \tau \left( \dot{Q}_{HU} \cdot c_{HU} + \dot{Q}_{CU} \cdot c_{CU} \right) \quad (1)$$

L'installation existante présente une demande en utilité chaude  $\dot{Q}_{HU} = 326$  kW, respectivement  $\dot{Q}_{CU} = 456$  kW pour l'utilité froide. Les coûts d'exploitation annuels correspondants sont  $C_{Op} = 287'420$  €/an.

## Coûts d'investissement

Dans notre exemple, seuls sont considérés les coûts des échangeurs de chaleur (HEX) pour la récupération de chaleur (RC) et pour les utilités. Si un système de conversion d'énergie (groupe de cogénération, pompe à chaleur, ...) est intégré au procédé, les coûts associés  $C_{ECU}$  sont également pris en considération dans le calcul. Dans l'exemple nous avons :

$$C_{Inv} = C_{HEN} + C_{ECU} \text{ avec } C_{ECU} = 0 \quad (2)$$

où les coûts du réseau d'échangeurs de chaleur (HEN) sont définis comme :

$$C_{HEN} = \sum_{HEX} C_{HEX} = \sum_{HEX} \left( C_0 + C_b \cdot \left( \frac{A_{HEX}}{A_b} \right)^m \right) \quad (3)$$

Pour notre exemple, nous considérons les données suivantes :

- Coût fixe d'un échangeur de chaleur (indépendamment de la surface de l'échangeur) :  $C_0 = 0 \text{ €}$
- Coût de base d'un échangeur de chaleur de référence (b = base) :  $C_b = 110'000 \text{ €}$
- Surface de transfert de l'échangeur de chaleur de référence :  $A_b = 100 \text{ m}^2$
- Facteur d'économie d'échelle :  $m = 0.71$

L'équation 3 définit le coût d'un échangeur de chaleur de surface de transfert  $A$  en fonction d'un échangeur de chaleur de référence dont le coût de base  $C_b = 110'000 \text{ €}$  pour une surface de  $A_b = 100 \text{ m}^2$ .

Les coûts d'investissement prennent également en compte les coûts d'installation et de mise en service des HEX.

Dans PinCH, la surface  $A$  est calculée selon l'équation 4. Le coefficient global de transfert de chaleur  $k$  est calculé en utilisant les deux coefficients de convection  $\alpha$  (avec l'hypothèse d'une résistance thermique négligeable des parois des HEX) et de la différence de température logarithmique moyenne  $\Delta T_{lm}$  (voir références à la page 1).

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T_{lm}} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (4)$$

## Coûts totaux

Les coûts totaux annuels  $C_{tot}$  [€/an] sont calculés par l'équation 5 avec les coûts annuels d'amortissement des investissements (annuités) et les coûts annuels d'exploitation.  $a$  est le facteur d'annuité.

$$C_{tot} = a \cdot C_{Inv} + C_{Op} \quad \text{avec} \quad a = \frac{Z \cdot (1 + Z)^n}{(1 + Z)^n - 1} \quad (5)$$

Dans notre exemple :

- Taux d'intérêt :  $Z = 6\%$
- Durée d'amortissement :  $n = 3 \text{ ans}$

Étant donné que nous considérons une installation de production existante et que nous supposons que celle-ci est déjà amortie, les coûts totaux (avant la mise en oeuvre de mesures d'optimisation) se résument aux seuls coûts d'exploitation, soit  $C_{tot} = C_{Op} = 287'420 \text{ €/an}$ .

## Description du problème

Dans le procédé existant, des mesures de récupération de chaleur ont déjà été mises en place ; cependant, un potentiel de récupération supérieur reste inexploité. Il est difficile de déterminer "manuellement" la récupération de chaleur optimale minimisant les coûts totaux (coûts d'amortissement et coûts d'exploitation). Dans ce tutoriel, nous montrons comment la solution peut être développée de manière rapide et systématique à l'aide du logiciel [PinCH](#). En appliquant le principe **Targets before Design!** (ciblage avant conception), les valeurs cibles d'énergie et de coûts sont calculées, puis utilisées pour concevoir un réseau d'échangeurs permettant d'atteindre ces cibles.



### Step 0: Define Process Requirements

Avant de commencer avec [PinCH](#), nous devons déterminer les informations clés nécessaires à l'analyse, en particulier les [exigences de procédé](#).

**Information supplémentaire:** Au sens de l'Analyse Pinch, une exigence de procédé correspond à un besoin de chauffage ou de refroidissement d'un média donné (par exemple : air, eau, solvant, etc.). Le besoin est défini par le débit de matière  $\dot{m}$ , la chaleur spécifique  $c_p$  ainsi que par les températures d'entrée et de sortie  $T_{in}$  et  $T_{out}$

La base pour définir les exigences de procédé consiste en l'analyse des documents tels que schémas de principe, diagrammes d'écoulement, fiches techniques des équipements, données d'exploitation, etc. Pour d'avantage d'informations concernant cette étape clé, nous vous recommandons de prendre connaissance du chapitre 9 du [Manuel - Pinch - OFEN](#)

Essayez d'identifier les données pertinentes pour l'analyse Pinch à partir de la description de l'installation et du diagramme d'écoulement correspondant, et de définir les exigences de procédé en matière de chauffage et de refroidissement. Notez que pour des raisons de contrôlabilité, *Chimie Fine SA* souhaite que l'évaporateur et le condenseur de la colonne de distillation ne soient pas pris en compte dans l'analyse Pinch.

Le résultat de l'extraction des données du procédé est présenté à la Table 3 et à la Figure 4.

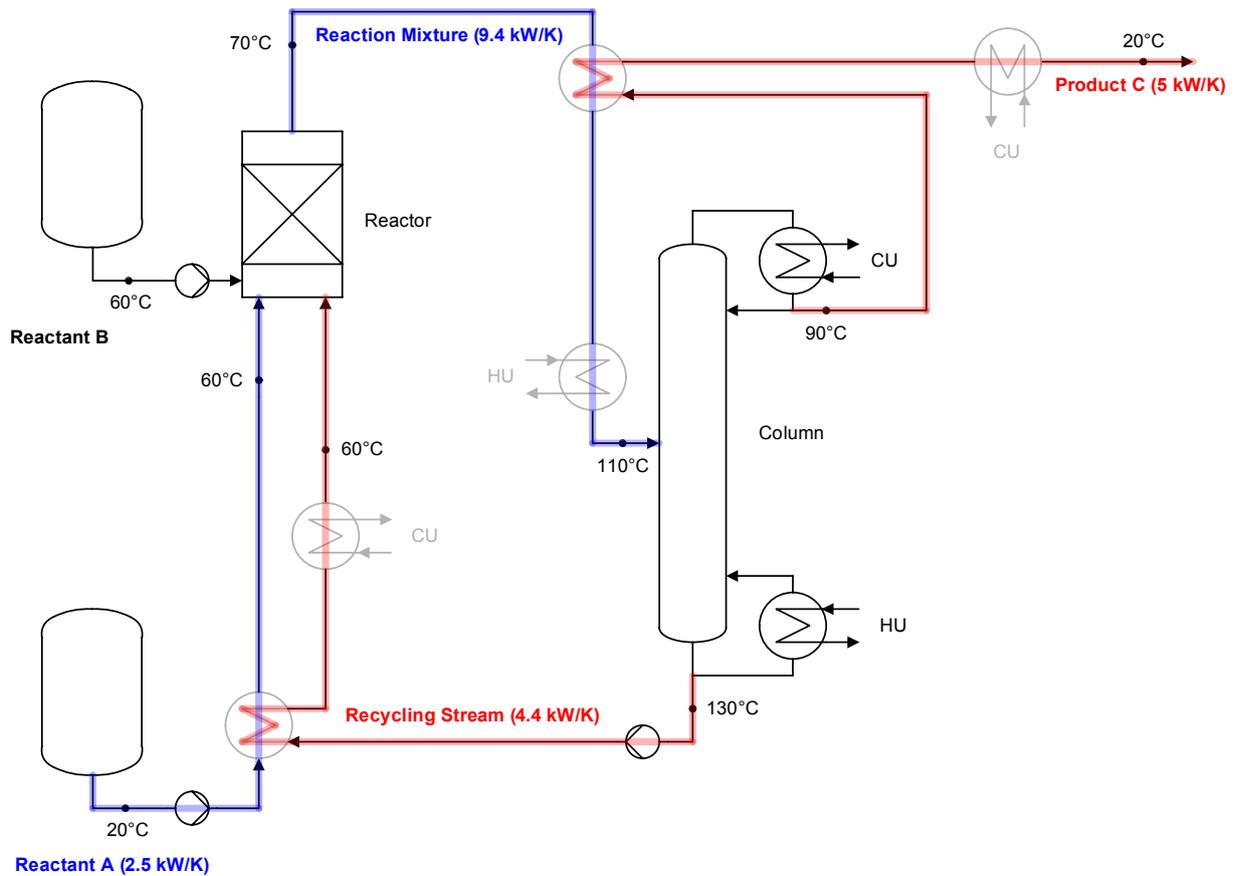


FIGURE 4 – Diagramme d'écoulement du procédé et ses besoins thermiques (flux)

TABLE 3 – Besoins thermiques (flux de procédé)

Process Stream	$T_{in}$ [°C]	$T_{out}$ [°C]	$\alpha$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$\dot{m}$ [kg/s]	$c_p$ [kJ/(kg K)]
Reactant A	20	60	1'000	1.0	2.5
Reaction Mixture	70	110	1'000	4.0	2.4
Product C	90	20	1'000	1.5	2.5
Recycling Stream	130	60	1'000	2.5	2.0

**Information supplémentaire:** Reactant B ayant déjà une température de 60 °C lorsqu'il entre dans le procédé, il n'a plus besoin d'être chauffé. Ce n'est donc pas un besoin du procédé.

### III 10 étapes dans PinCH

#### C'est parti!

Pour commencer, démarrez le logiciel [PinCH](#). Avant de commencer le projet proprement dit, il est recommandé de vérifier les réglages de base et les ajuster si nécessaire. Dans ces tutoriels, les coûts étant exprimés en €, vous devez modifier les paramètres correspondant à cette devise dans l'onglet *Currencies* du menu *Settings*. Laissez inchangé le taux de change de 1.1 CHF/€. De plus, les unités kW/MWh seront utilisées. La marche à suivre est précisée dans le [Tutoriel 0](#).

Ce tutoriel suit les **10 étapes de PinCH** (voir [Tutoriel 0](#)). Les données importantes sont renseignées au cours des étapes **1 à 5** dans le [Project Explorer](#). Créez un nouveau projet et renommez le projet "Chemical Process" comme décrit ci-dessous :

- ☞ File ☞ New Project
- ☞ Sélectionner [New PinCH Project](#) dans le Project Explorer
- ☞ Appuyer sur la touche F2
- ☞ Changer le nom en "Chemical Process"



### Step 1: Enter Stream Data

La saisie des données des flux est nécessaire pour spécifier les besoins thermiques du procédé identifiés lors de la phase d'extraction des données. Saisissez ces données dans [Process Stream Table](#).

Ouvrir *Process Stream Table* en cliquant sur

- ☞ l'onglet [Process Stream Table](#) en haut de la fenêtre principale
- ou en double cliquant sur
- ☞ *Process Stream Table* dans la fenêtre *Project Explorer*.

Pour définir un nouveau flux cliquer sur

- ☞ l'icône 

ou avec

- ☞ clic droit dans l'espace vide, à l'intérieur de *Process Stream Table*
- ☞ sélectionner [Add Continuous Process Stream](#) (voir Figure 5)

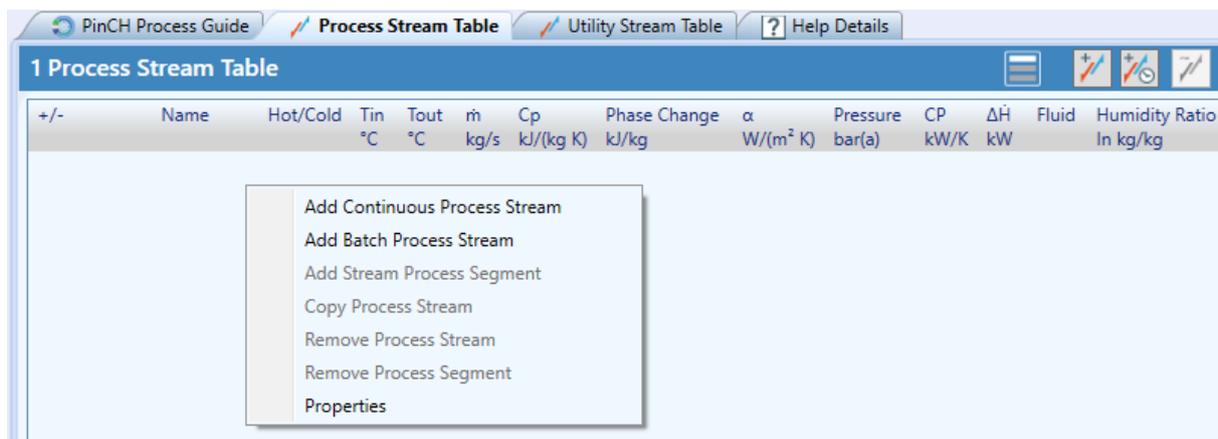


FIGURE 5 – Ajouter un flux continu au tableau de flux de procédé

Renommez un flux de procédé et modifiez les données par défaut du flux :

- ☞ Sélectionner [New Process Stream 1](#)
- ☞ Saisir le nom du flux, par exemple "Reactant A".
- ☞ Sélectionner les autres cellules pour changer les valeurs par défaut de  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $\dot{m}$ ,  $c_p$  et  $\alpha$ . Contrôler que les unités des variables correspondent aux grandeurs saisies.

**Note:** Vous pouvez également utiliser la touche « tabulation » du clavier pour naviguer entre les cellules.

Vous constatez qu'à la saisie d'un flux froid (qui a besoin d'être chauffé) la flèche dans la colonne *Hot/Cold* devient bleue. En Analyse Pinch, les flux devant être chauffés sont appelés des flux froids et ceux qui nécessitent un refroidissement des flux chauds.

**Note:** pour supprimer un flux du tableau de flux, il faut :

- ☞ Sélectionner le flux à supprimer et cliquer sur l'icône

Vous pouvez également :

- ☞ Clic droit sur le flux en question
- ☞ Sélectionner [Remove Process Stream](#)

Une fois complété, le tableau de flux doit ressembler à la figure ci-dessous :

1 Process Stream Table																
+/-	Name	Hot/Cold	T <sub>in</sub> °C	T <sub>out</sub> °C	m kg/s	C <sub>p</sub> kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m <sup>2</sup> K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	ΔH kW	Fluid	Humidity Ratio ln kg/kg	Soft	tstart h	tstop h
	Reactant A	↕	20	60	1	2.5	-	1000	-	2.5	100	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Product C	↗	90	20	1.5	2.5	-	1000	-	3.75	262.5	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Recycling Stream	↗	130	60	2.5	2	-	1000	-	5	350	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Reaction Mixture	↕	70	110	4	2.4	-	1000	-	9.6	384	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-

FIGURE 6 – Tableau de flux de procédé

**Note:** Il est possible de sélectionner différents fluides dans la colonne *Fluid*, la capacité thermique ( $c_p$ ) et les enthalpies de vaporisation/condensation sont ainsi calculées automatiquement. Dans ce cas, pour permettre la résolution des équations thermodynamiques sous-jacentes, la pression de fonctionnement doit être renseignée dans la colonne *Pressure*. La colonne *Humidity Ratio* n'est à compléter que lorsqu'on a affaire à de l'air humide (fluide "HumidAir"). Si le fluide "Simple" est sélectionné dans la colonne *Fluid*, tous les paramètres peuvent être saisis manuellement. La colonne *Soft* permet de qualifier un flux "soft", ce qui signifie que sa température finale est indicative mais pas impérative. Un flux *soft* est généralement un effluent du procédé présentant un potentiel de récupération de chaleur mais dont la température finale n'est pas imposée par le procédé. Les colonnes *tstart* et *tstop* servent à définir le timing d'un procédé discontinu (batch), ce dont nous n'avons pas besoin pour notre exemple. Le tableau de flux est dynamique, mettant automatiquement à jour les données aussitôt que les informations saisies définissent complètement les degrés de liberté. Par exemple, PinCH calcule, par défaut, le débit de capacité thermique  $CP$  et les variations d'enthalpie. Il est également possible de saisir d'autres combinaisons de données comme  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $c_p$  et  $\Delta \dot{H}$ . Dans ce cas le débit  $\dot{m}$  est calculé par PinCH. Les cellules vertes sont celles contenant des valeurs calculées. Le débit de capacité thermique  $CP$  est le produit du débit massique et de la chaleur spécifique.

**Note:** Les flux de procédé peuvent être importés depuis un tableau Excel :

☞ File ☞ Import Stream Table

Pour garantir le format correct du tableau utilisé dans Excel, il est recommandé d'exporter un tableau de flux vide (depuis PinCH vers Excel), de le compléter dans Excel avant de l'importer à nouveau dans PinCH :

☞ File ☞ Export Stream Table

Dans un second temps, les **utilités** du procédé (média de chauffage et de refroidissement) doivent être saisies dans le tableau des utilités (**Utility Stream Table**). Pour équilibrer le bilan d'énergies, un procédé a besoin d'au moins 2 utilités par défaut (une chaude "suffisamment chaude" et une froide "suffisamment froide"). PinCH peut alors calculer toutes les grandeurs nécessaires.

Pour ouvrir le tableau des utilités il faut :

☞ Sélectionner l'onglet *Utility Stream Table* en haut de la fenêtre principale.

Celui-ci est également accessible dans la fenêtre *Target Explorer* :

☞ Double clic gauche sur l'icône *Utility Stream Table* dans la fenêtre *Target Explorer*.

Pour ajouter un nouveau flux d'utilité à la liste :

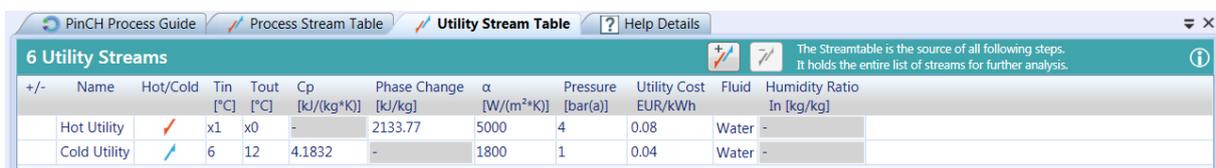
☞ Cliquer sur l'icône 

☞ Renommer les flux et modifier les valeurs par défaut afin qu'elles correspondent aux valeurs présentées dans le Tableau 2.

Comme pour le tableau de flux de procédé, il est possible de sélectionner différents fluides dans la colonne *Fluid*. L'eau (vapeur de chauffage, eau de refroidissement) ou les réfrigérants tels que R134a, R717, etc. sont souvent utilisés comme fluides d'utilité. Les fluides en condensation ou évaporation peuvent être décrits par le titre de vapeur  $x_{in}$  et  $x_{out}$ , et par la pression  $p$ . Pour notre exemple, sélectionnez "Water" dans la colonne *Fluid* pour les utilités chaudes et froides. Pour l'énergie de condensation de l'utilité chaude il faut entrer  $x1$  (100 % de vapeur, vapeur saturée) dans la cellule  $T_{in}$  et  $x0$  (0 % de vapeur, liquide saturé sans sous refroidissement) dans la colonne  $T_{out}$ . Pour de la vapeur humide ayant un titre de 50 % il faut noter  $x0.5$  dans la cellule correspondante. Notez que pour inscrire le titre de vapeur dans les cellules, il faut préalablement avoir sélectionné le bon média dans la colonne *Fluid* ("Water" dans notre cas). Les fluides "Simple" et "HumidAir" ne supportent pas la notation  $x1$  et  $x0$ .

**Note:** Les coûts d'utilités permettent, dans une étape ultérieure, de calculer les coûts annuels.

Une fois complété, le tableau des flux d'utilité doit ressembler à la figure ci-dessous :



+/-	Name	Hot/Cold	T <sub>in</sub> [°C]	T <sub>out</sub> [°C]	C <sub>p</sub> [kJ/(kg·K)]	Phase Change [kJ/kg]	α [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Pressure [bar(a)]	Utility Cost EUR/kWh	Fluid	Humidity Ratio ln [kg/kg]
	Hot Utility		x1	x0	-	2133.77	5000	4	0.08	Water	-
	Cold Utility		6	12	4.1832	-	1800	1	0.04	Water	-

FIGURE 7 – Tableau des flux d'utilités

## Step 2: Configure Equipement

Dans PinCH, un **équipement** représente soit une conduite, une gaine ou une cuve dans laquelle une ou plusieurs exigence(s) de procédé existe(nt). Il existe des exemples (procédés batch notamment) dans lesquels plusieurs flux de procédé (besoin de transfert de chaleur) ont lieu dans le même équipement (étant supposé que ces flux n'existent pas simultanément). En assignant correctement les exigences de procédé ayant lieu dans un même équipement, il est possible de tenir compte de la réutilisation de la surface de transfert de chaleur, réduisant ainsi le coût des échangeurs de chaleur nécessaires pour satisfaire ces exigences de procédé.

**Information supplémentaire:** Pour les procédés batch, l'étape 2 est primordiale. Grâce à la définition des équipements, PinCH permet d'analyser le recouvrement temporel des lots consécutifs et d'optimiser le taux d'utilisation de l'installation.

Des informations détaillées et des exemples pratiques liés à l'assignation des flux de procédé aux équipements sont disponibles dans le [Manuel - Pinch - OFEN](#).

Dans le cas présent, une affectation des flux de procédé aux différents équipements n'est pas nécessaire car il s'agit d'un procédé continu. Cette étape est revue en détails dans les [Tutoriel 2](#) et [Tutoriel 3](#).



## Step 3: Define Processes

La définition de plusieurs procédés permet de considérer plusieurs scénarios : les procédés peuvent être optimisés séparément (individuellement) ou ensemble. L'optimisation du système global (c'est-à-dire tous les procédés ensemble) est aussi possible (voir [Tutoriel 2](#)).

Pour permettre l'optimisation énergétique de sites industriels exploitant plusieurs installations techniquement et/ou spatialement distinctes, il est nécessaire de répartir les flux de procédé en différents groupes logiques (procédés). Au sens de l'Analyse Pinch, un procédé est un "cluster" de flux. Cette répartition des flux en différents procédés permet d'analyser le potentiel de récupération de chaleur et les utilités associées de l'entier du site mais aussi de manière indépendante pour chaque procédé ou groupement de procédés. De plus, la définition de plusieurs procédés offre la possibilité à l'utilisateur d'évaluer les effets, sur l'entier du site, de modifications apportées individuellement à l'un ou l'autre des procédés – autrement dit de réaliser une analyse de cas de fonctionnements multiples (MOC).

Pour ce tutoriel, il n'est pas nécessaire de répartir en plusieurs procédés les flux définis dans le Tableau de flux de procédé (Figure 6). Utilisez le [Process 1](#) prédéfini et renommez-le en "*Chemical Process*".

-  Dans *Project Explorer*, sélectionner [Process 1](#) (noeud  *Processes* de l'arborescence, sous *Base Case*)
-  Presser la touche F2
-  Changer le nom : "*Chemical Process*"

Pour assigner au procédé les flux définis préalablement :

-  Double-cliquer sur [Chemical Process](#) (noeud  *Processes* de l'arborescence)
-  Sélectionner les flux du procédé, situés dans la moitié supérieure de la fenêtre
-  Cliquer sur 

**Note:** Méthode alternative : glisser, à l'aide de la souris, les flux désirés depuis la fenêtre supérieure, vers la fenêtre inférieure. Plusieurs flux de procédé peuvent être sélectionnés, puis assignés simultanément en gardant la touche *ctrl* enfoncée.

Une fois complété, le procédé *Chemical Process* doit ressembler à la figure ci-dessous :

1 Process Stream Table																
+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	m kg/s	Cp kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	$\alpha$ W/(m <sup>2</sup> K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	$\Delta H$ kW	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg	Soft	tstart h	tstop h
	Reactant A		20	60	1	2.5	-	1000	-	2.5	100	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Product C		90	20	1.5	2.5	-	1000	-	3.75	262.5	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Recycling Stream		130	60	2.5	2	-	1000	-	5	350	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Reaction Mixture		70	110	4	2.4	-	1000	-	9.6	384	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-

3 Process Streams - Petrochemical Process																
+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	m kg/s	Cp kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	$\alpha$ W/(m <sup>2</sup> K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	$\Delta H$ kW	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg	Soft	tstart h	tstop h
	Reaction Mixture		70	110	4	2.4	-	1000	-	9.6	384	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Recycling Stream		130	60	2.5	2	-	1000	-	5	350	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Product C		90	20	1.5	2.5	-	1000	-	3.75	262.5	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Reactant A		20	60	1	2.5	-	1000	-	2.5	100	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-

FIGURE 8 – Procédé *Chemical Process* entièrement défini

**Note:** Pour supprimer un flux du procédé *Chemical Process* :

Sélectionner le flux à supprimer et cliquer sur

Ou

Clic droit sur le flux à supprimer

Sélectionner *Deassign Process Stream*



#### Step 4: Apply Scheduling to Processes

Les [horaires et calendrier d'exploitation](#) sont nécessaires pour définir le programme temporel des procédés configurés à l'étape 3. Par exemple, le nombre d'heures de fonctionnement d'un procédé sur une année permet de calculer le coût annuel d'exploitation.

**Information supplémentaire:** Dans le cas où l'on a affaire à plusieurs procédés, il existe en général plusieurs cas d'exploitation ou [multiple operating cases \(MOC\)](#) pour lesquels différents flux (besoins de chauffage et/ou de refroidissement) peuvent exister. Dans ce cas, le calendrier de chaque procédé doit être défini précisément. Les [Tutoriels 2 et 3](#) abordent ce thème plus en détails. Un [procédé discontinu ou batch](#) (discontinuous process streams) contient déjà intrinsèquement plusieurs cas de

fonctionnement. On parle alors de **Time Slices (TSs)** ou tranches de temps du procédé. La définition du déroulement temporel d'un procédé batch nécessite alors des informations supplémentaires.

Revenons à l'étude de cas : pour un procédé continu, il n'y a qu'un seul cas de fonctionnement et la définition de la durée de fonctionnement annuelle est nécessaire et suffisante. Les interruptions de l'équipement de production pendant la nuit ou le week-end ne doivent pas être prises en compte pour ce tutoriel.

Ouvrez l'onglet **OC Schedule 1**.

Double clic sur **OC Schedule 1** (dans *Project Explorer* sous *BaseCase* **Operating Cases Scheduling**)

Entrez la durée d'exploitation annuelle (en heures) du procédé défini à l'étape 3.

Dans la colonne **Timebase** choisir "Cont. Year"

Sélectionner la cellule **Duration**

Entrer le nombre d'heures souhaité

Renseignez l'onglet **OC Schedule 1** pour le procédé *Chemical Process* débutant la semaine 1 du calendrier, le lundi matin à 00:00 et pour une durée de 7'000 h sans interruption.

**Note:** La colonne **Production Campaign Start** définit l'instant de démarrage du procédé au début de l'année. Dans la colonne **Production Campaign End**, il s'agit du moment auquel le procédé s'arrête. Le **Gross Operation Time** indique la durée de fonctionnement totale du procédé, y compris les interruptions (différence entre le début et la fin de la campagne de production). Le **Net Operation Time** indique le nombre effectif d'heures de fonctionnement du procédé par ex. hors interruptions pendant la nuit, fins de semaine, etc.). Le **Net Operation Time** définit la durée effective totale d'exploitation du procédé par an et est utilisé pour le calcul des coûts énergétiques.

Pour la présente étude de cas, l'onglet **OC Schedule 1** doit correspondre à :



Process	Timebase	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su	Daytime Start h:mm	CW Start week	# Weeks	Duration h	Prod. Campaign Start h	Prod. Campaign End h	Gross Op. Time h/y	Net Op. Time h/y
Chemical Process	Cont. Year	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	00:00	1	-	7'000.00	0.00	7'000.00	7'000.00	7'000.00					

FIGURE 9 – Programme temporel du procédé



## Step 5: Set Economic Data

La définition des données économiques est requise pour le calcul des investissements et des coûts annuels d'exploitation. PinCH calcule les coûts d'investissement pour les échangeurs de chaleur, comme expliqué à la section "Coûts d'investissement", page 5. Quatre groupes de paramètres de fonction de coûts peuvent être définis :

- Pour un HEX entre flux de procédé
- Pour un HEX entre une utilité chaude (HU) et un flux de procédé
- Pour un HEX entre un flux de procédé et une utilité froide (CU)
- Pour un HEX entre une boucle intermédiaire de stockage de chaleur et un flux de procédé

Ouvrez l'onglet **Economic Data**.

Double clic sur **Economic Data** (dans *Project Explorer* sous *BaseCase Economic Data*)  
 Modifiez les données économiques de *Heat Exchanger Costs* conformément aux données du problème.

- ☞ Sélectionner la cellule
- ☞ Changer la valeur

Les échangeurs d'utilités du procédé existant (pour le chauffage à la vapeur et le refroidissement à l'eau glacée) peuvent être réutilisés. Par conséquent, la valeur  $C_b$  pour le coût des échangeurs d'utilité chaude et froide (Hot/Cold Utility Heat Exchanger Costs) vaut zéro. La durée d'amortissement **Pay off period** et le taux d'intérêt **Interest rate** sont définis comme spécifiés.

**Note:** Les coûts pour les HEXs entre boucle(s) intermédiaire(s) de stockage thermique et flux de procédé (ISSPs-HEX), pour les stockages de chaleur et pour le média de stockage, ne sont pas utilisés dans cet exemple.

**Information supplémentaire:** Les coûts d'électricité, les coûts fixes généraux ainsi que les frais de personnel et d'entretien peuvent au besoin également être renseignés. Les coûts d'électricité sont particulièrement importants pour l'intégration ultérieure d'une éventuelle pompe à chaleur. Cependant, ces paramètres ne sont pas utiles pour la détermination du  $\Delta T_{min}$ , car ils représentent un montant constant, indépendant du  $\Delta T_{min}$ . "Electric Power" permet, le cas échéant, de spécifier une consommation électrique constante (ruban de consommation, par exemple pompes, ventilateurs, brasseurs) à prendre en compte dans les coûts d'exploitation.

L'ensemble des données économiques devrait correspondre à la figure suivante :

The screenshot shows the 'Economic Data' window in PinCH software. It contains several sections for defining costs:

- Heat Exchanger Costs:** A table with columns: Type, Fixed Cost  $C_0$  (EUR), Base Cost  $C_b$  (EUR), Base Area  $A_b$  ( $m^2$ ), and Exponent  $m$ . Rows include Process, Hot Utility, Cold Utility, and ISSP Heat Exchanger Costs.
- Storage: Tank Costs:** A table with columns: Storage, Fixed Cost  $C_0$  (EUR), Base Cost  $C_b$  (EUR), Base Volume  $V_b$  ( $m^3$ ), Exponent  $m$ , and Storage Type. Rows include FTVM and Stratified.
- Storage: Media Costs and Media Properties:** A table with columns: Media, Base Cost  $C_b$  (EUR), Density ( $kg/m^3$ ),  $\alpha$  ( $W/(m^2 K)$ ), and  $c_p$  ( $kJ/(kg K)$ ). Rows include Water and Heat Transfer Oil.
- Amortisation Parameters:** Input fields for Pay Off Period (3 y), Interest Rate (6 %), Annuity (0.374 1/y), Independent (0 EUR), Personnel (0 %/y Investment Costs), and Maintenance (0 %/y Investment Costs).
- Electricity:** Input fields for Electricity Cost (110.000 EUR/MWh) and Electric Power (0 kW).

FIGURE 10 – Données économiques

Votre *Project Explorer* devrait maintenant avoir la structure suivante :

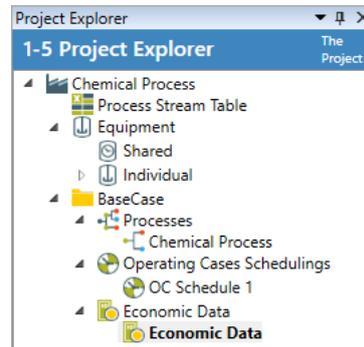


FIGURE 11 – Project Explorer

## Step 6: Prepare Targeting Calculations

Après avoir achevé les étapes **1 à 5**, toutes les données et informations du procédé ainsi que les paramètres économiques pour l'analyse Pinch sont définis. Il est maintenant possible de calculer les valeurs cibles d'énergie et de coûts dans le [Target Explorer](#) en créant tout d'abord un [Target Group](#).

**Information supplémentaire:** Un *Target Group* se compose d'une combinaison d'un ou plusieurs procédé(s), des utilités, un calendrier d'exploitation et des données économiques. Plusieurs scénarios peuvent être analysés en utilisant des combinaisons différentes de données définies aux étapes **1 à 5**, qui génèrent des valeurs cibles d'énergie et de coûts différentes. Lorsque seuls un procédé, une HU et une CU ont été définis, PinCH les assigne automatiquement au *Target Group*.

Pour créer un *Target Group*, procédez comme suit :

-  Clic droit sur *BaseCase* dans le *Target Explorer*
-  Sélectionner [Add Target Group](#)

Si cela n'est pas déjà fait automatiquement, affectez au *Target Group* le procédé "Chemical Process" défini à l'étape **3** :

-  Double-clic sur le [Target Group 1](#)
-  Clic droit sur *Processes*
-  Sélectionner [Assign Process](#)  "Chemical Process"

Si cela n'est pas déjà fait automatiquement, affectez au *Target Group* au minimum une utilité chaude et une utilité froide :

-  Clic droit sur *Utilities*
-  Sélectionner [Assign Utility Definition](#)  *Hot Utility* et *Cold Utility*

**Note:** Pour affecter d'autres données économiques ou un autre calendrier d'exploitation au "Target Group 1" il faut :

- ☞ Clic droit sur le *Target Group 1*
- ☞ Sélectionner [Reassign Operating Cases Schedule / Reassign Economic Data](#)

Cette action n'est possible que si d'autres calendriers d'exploitation et/ou d'autres données économiques ont été préalablement définis dans le *Project Explorer*.

Le *Target Explorer* devrait ressembler à :

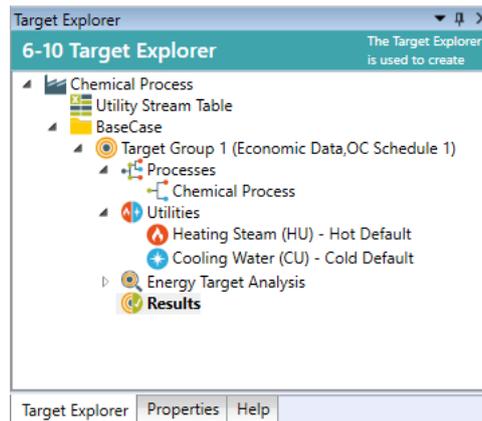


FIGURE 12 – Target Explorer



## Step 7: Analyze Energy Targets

Une fois les préparatifs de l'**étape 6** terminés, tout est prêt pour le calcul des valeurs cibles d'énergie et de coûts. Avant de calculer ces résultats à l'**étape 8**, l'outil [Energy Targeting Analysis](#) peut être utilisé pour analyser de manière exhaustive le potentiel de récupération de chaleur (RC) du scénario considéré.

**Information supplémentaire:** L'outil *Energy Target Analysis* permet, entre autres, d'étudier la contribution des différents procédés au potentiel total de RC, lorsqu'il existe plusieurs procédés en partie synchrones. En outre, pour les procédés batch, une comparaison entre le potentiel de RC directe (entre flux simultanés) et indirecte (entre flux asynchrones) peut être effectuée. L'*Energy Target Analysis* est particulièrement utile pour les systèmes complexes, pour lesquels plusieurs cas de fonctionnement doivent être optimisés du point de vue énergétique.

La présente étude de cas ne comportant qu'un seul procédé continu avec un seul cas de fonctionnement, une telle analyse détaillée (**étape 7**) n'est pas nécessaire.



## Step 8: Calculate Energy Cost Targets

Un aspect clé de l'Analyse Pinch est le calcul des valeurs cibles d'énergie et de coûts avant d'étudier les mesures individuelles de récupération de chaleur (RC).

**Note:** Un principe fondamental en Analyse Pinch s'appelle : **valeurs cibles avant conception!** (*Targets before Design*)

À l'étape 8, la minimisation des coûts totaux annuels (compromis optimal entre coûts d'amortissement et coûts d'exploitation) permet de définir les **valeurs cibles** de RC maximale, de consommation d'utilité, la surface de transfert minimale, le nombre minimum d'échangeurs et les coûts totaux annuels minimum correspondants.

Démarrez le calcul des valeurs cibles :

 Clic droit sur **Results**

 Sélectionner **Calculate Target Result with...**  **Separate Design**

L'onglet **Sep. Design 1\_1** s'ouvre automatiquement (voir Figure 13) ; il comprend les fenêtres d'information suivantes :

- **Time Charts** : L'*Overall Gantt Chart* affiche le calendrier d'exploitation du procédé considéré sur une année. L'*OC Gantt Chart* affiche, pour le cas de fonctionnement (OC) choisi, le planning d'exploitation du procédé au cours d'une semaine.
- **OC Charts** : Sur la base des différents *OC Charts*, il est possible d'étudier le potentiel d'optimisation énergétique et économique des cas de fonctionnement respectifs.
- **OC Data** : Ici, les résultats les plus importants sont affichés sous forme de tableau.

Ci-après, l'accent est mis sur les figures et les schémas essentiels pour la présente étude de cas.

S'agissant d'un procédé continu avec un seul cas de fonctionnement, les *Time Charts* ne sont pas pertinents. Il est possible de les masquer.

 Décocher les cases **Processes** et **OC's**

La taille des fenêtres peut être modifiée en déplaçant manuellement le bord de chaque fenêtre. Par exemple, agrandissez la fenêtre *OC Charts* tout en réduisant la taille des *Time Charts*.

 Placer la souris sur le bord supérieur de la fenêtre *OC Charts* (une double flèche apparaît)

 Cliquer et faire glisser le bord de la fenêtre vers le haut

Dans la fenêtre *OC Charts*, il s'agit maintenant d'analyser le diagramme **CC** - *Composite Curves* (courbes composites chaude et froide) et les coûts **Cost curve** (voir Figure 13).

 Cocher la case **Costs** et désélectionner la case **GCC** (*Grand Composite Curve*)

Les courbes composites chaude et froide sont représentées sur la figure **Composite Curves** (diagramme  $T - \Delta\dot{H}$ ). Dans la plage où les deux courbes se chevauchent verticalement, une récupération de chaleur interne au procédé est possible. Le [Manuel - Pinch - OFEN](#) explique en détails la construction et l'interprétation des courbes composites. Les besoins de chauffage et de refroidissement (utilités) correspondants peuvent être affichés par :

 Clic droit sur le diagramme *Composite Curves*

 Sélectionner **Display Utilities**

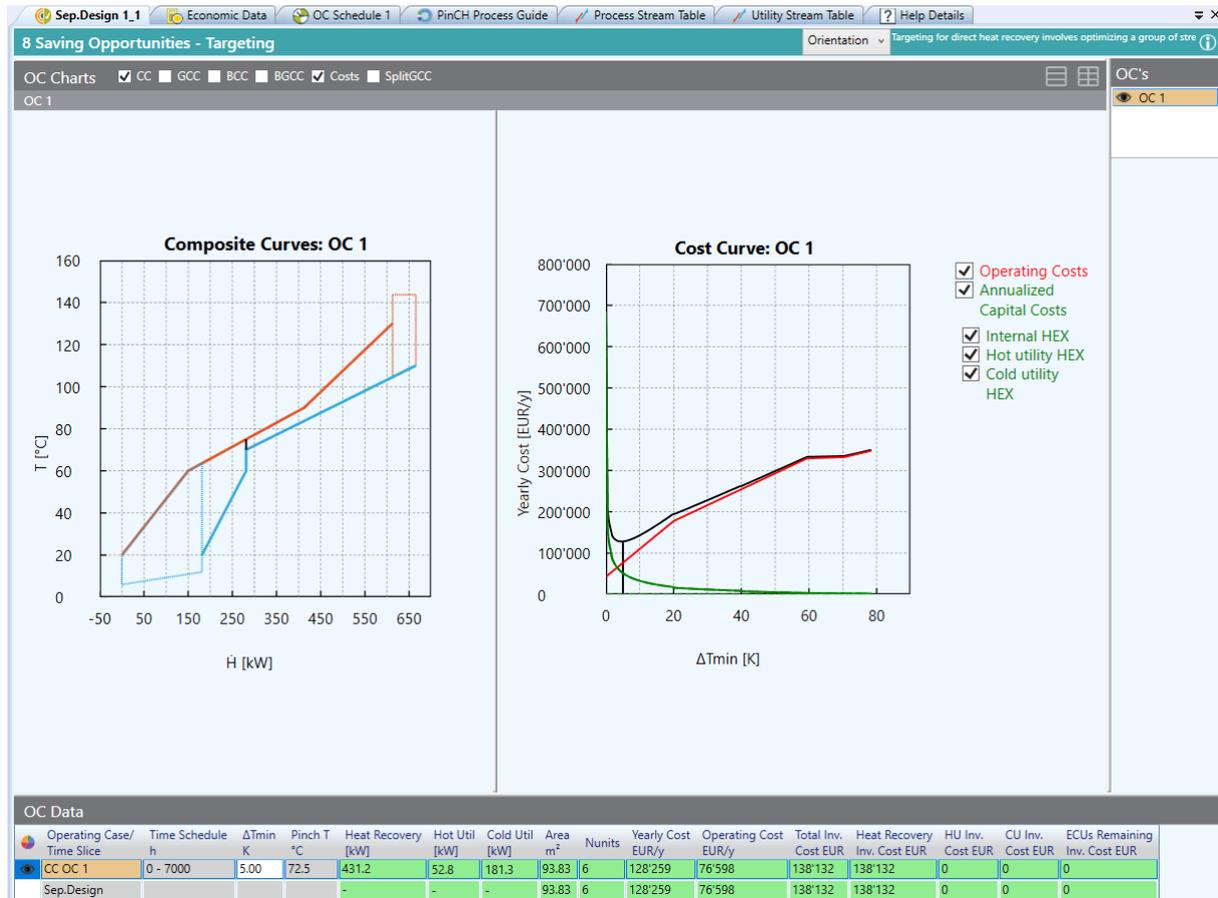


FIGURE 13 – Courbes composites, courbes des coûts et OC data (en rouge : cc chaude ; en bleu : cc froide)

L'endroit où la distance verticale entre les deux courbes composites est la plus petite est appelé **point de pincement**. Cette différence de température minimale peut être modifiée en déplaçant la courbe composite froide vers la gauche ou la droite. PinCH recalcule automatiquement les valeurs cibles d'énergie et de coûts. Cependant, qu'on déplace la courbe composite froide vers la gauche ou la droite, les coûts totaux annuels augmentent dans tous les cas (ceci se vérifie dans le tableau *OC Data*). Notez que le logiciel a déjà déterminé automatiquement la différence de température minimale optimale  $\Delta T_{min,opt}$ , en se basant sur la courbe de coût (courbe en noir sur le graphique *cost curve*).

**Information supplémentaire:** L'optimisation économique de la différence de température minimale  $\Delta T_{min}$  est appelée **Supertargeting**. Les coûts totaux annuels sont fonction du  $\Delta T_{min}$ . Cette fonction est représentée dans le diagramme **Cost Curve**. Lorsque  $\Delta T_{min}$  augmente, les coûts d'exploitation (courbe rouge) augmentent car la récupération de chaleur diminue. Dans le même temps, les charges annuelles d'amortissement (courbe verte continue) diminuent car la surface de transfert de chaleur des échangeurs est réduite. PinCH calcule automatiquement les coûts totaux annuels (courbe noire) à partir desquels le  $\Delta T_{min}$  est déterminé.

Les valeurs cibles d'énergie et de coûts peuvent être lues dans le tableau *OC Data*. La différence de température optimale est  $\Delta T_{min,opt} = 4.57$  K (arrondissez cette valeur à 5 K pour simplifier). Ce pincement donne alors la valeur cible de **récupération de chaleur (RC)** de 431 kW. La puissance minimale d'utilité chaude est de 53 kW, respectivement de 181 kW pour l'utilité froide. Le minimum des coûts totaux annuels (charges d'amortissement et coûts d'exploitation) est de 128'000 €/an.

La courbe grande composite (*Grand Composite Curve - GCC*) est une représentation complémentaire. La GCC se calcule à partir des courbes composites, pour une valeur  $\Delta T_{min}$  fixée.

Cocher la case **GCC** et désactiver les cases **CC** et **Costs** de *OC Charts*

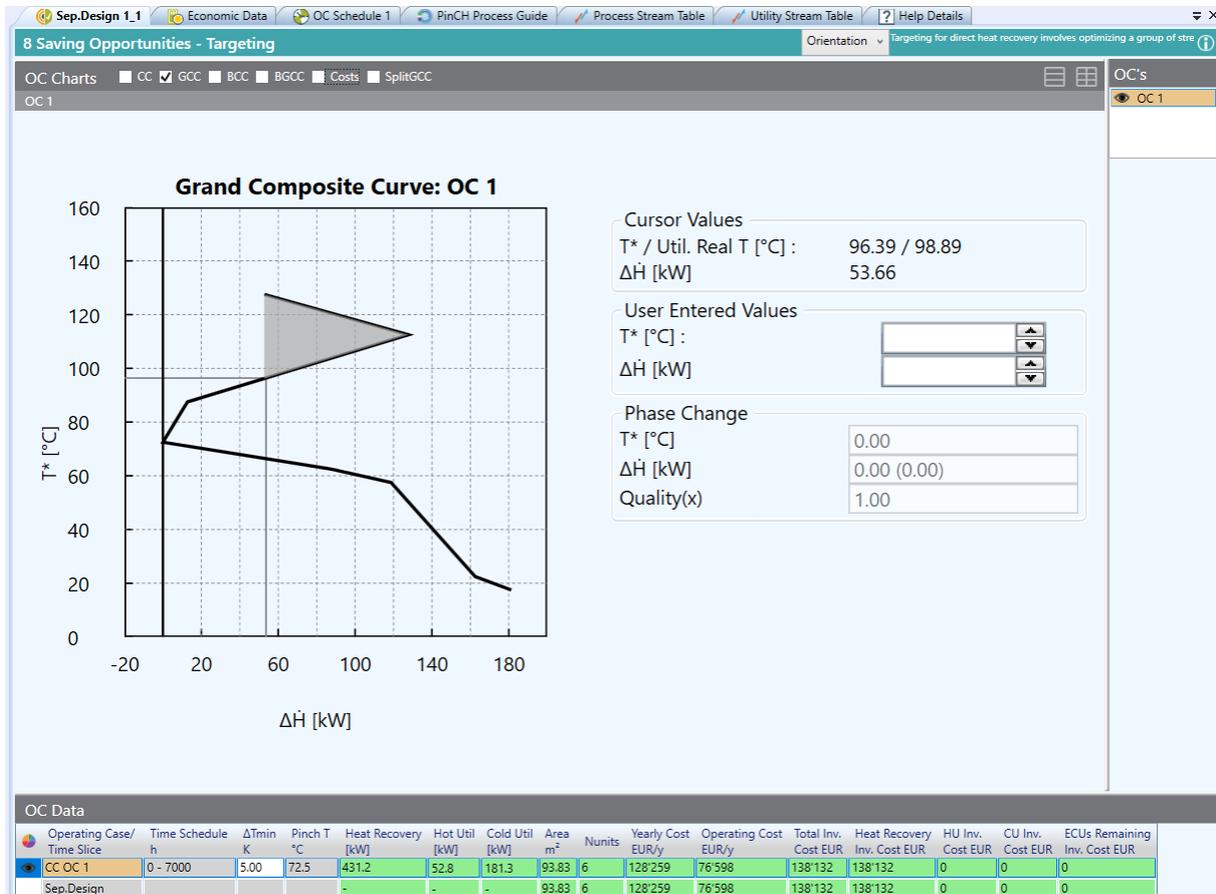


FIGURE 14 – Courbe Grande Composite

- La GCC représente le bilan net cumulé entre les apports de chaleur des flux chauds et les besoins de chaleur des flux froids, lorsque la chaleur est transférée sous  $\Delta T_{min}$ .
- Au point de pincement ( $T = 72.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), la GCC touche l'axe des températures ( $\Delta \dot{H} = 0 \text{ kW}$ ).

Sur la Figure 14, au-dessus du pincement, la zone hachurée dans la plage de température de  $127 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $96.5 \text{ }^\circ\text{C}$  est appelée **zone neutre** (ou Pocket). Cette zone est un domaine de température pour lequel aucun apport externe de chaleur ou de refroidissement n'est nécessaire, l'excédent de chaleur dans la plage de température de  $127 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $113 \text{ }^\circ\text{C}$  compensant le déficit de chaleur de la plage de température de  $96.5 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $113 \text{ }^\circ\text{C}$ . La température minimale nécessaire de l'utilité chaude n'est donc pas de  $127 \text{ }^\circ\text{C}$ , mais de  $99 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Note:** De par sa construction, la GCC est un excellent outil pour étudier d'autres pistes d'optimisation, par exemple concernant l'approvisionnement en énergie (voir [Manuel - Pinch - OFEN](#)).

Il est possible d'afficher l'excédent de chaleur en dessous du pincement, respectivement le déficit de chaleur en dessus du pincement. Pour cela, indiquez les valeurs de la température translatée dans le champ  $T^*$  de la zone **User Entered Values**. A noter que la température  $T^*$  dépend de la température réelle comme suit :

- au-dessus du pincement :  $T^* = T - \Delta T_{min}/2$
- en dessous du pincement :  $T^* = T + \Delta T_{min}/2$

Dans le cas présent, une conclusion supplémentaire peut être tirée de la GCC : en dessous du pincement, dans la plage de température comprise entre 20 °C et 72.5 °C, une puissance excédentaire de 180 kW ne peut pas être valorisée pour le procédé et doit donc être transférée à l'utilité froide. Ici, il peut être intéressant d'élargir les limites du système étudié dans l'analyse Pinch et vérifier si d'autres procédés du site de production pourraient être des puits de chaleur dans cette plage de températures.

Pour plus de détails concernant la GCC ; se référer au [Manuel - Pinch - OFEN](#).



### Step 9: Integrate Energy Conversion Units

Dans de nombreux procédés industriels, les besoins de chauffage et de refroidissement restent élevés et ce malgré la RC. Dans ces cas, il vaut la peine d'examiner l'intégration d'une [unité de conversion d'énergie](#) (Energy Conversion Unit - ECU). Une ECU peut être, par exemple, un groupe chaleur-force basé sur un moteur thermique. La chaleur rejetée est valorisée dans le procédé et remplace ainsi de l'utilité chaude, tandis que l'énergie mécanique du moteur thermique est convertie en énergie électrique dans un générateur. Une ECU peut également être une pompe à chaleur dans laquelle le compresseur "élève" la chaleur à un niveau de température plus élevé au moyen d'énergie électrique. La chaleur dégagée au condenseur alors tout ou partie de l'utilité chaude.

L'Analyse Pinch est un excellent outil pour analyser de l'adéquation d'une ECU et la prédimensionner. L'intégration correcte d'une pompe à chaleur, d'une unité de couplage chaleur-force ou d'une unité de recompression mécanique ou thermique de vapeur peut être modélisée dans [PinCH](#) pour optimiser (c-à-d réduire) les coûts de l'approvisionnement en énergie.

L'intégration d'une pompe à chaleur serait en principe imaginable. Mais nous renonçons à cette analyse dans le cadre du présent tutoriel d'introduction.



### Step 10: Design Heat Exchanger Network

Félicitations ! Vous avez déterminé les valeurs cibles correspondant à une optimisation énergétique et économique du procédé. Maintenant, une question cruciale se pose : comment les économies d'énergie et de coûts devraient-elles être réalisées en pratique ? À l'aide de [PinCH](#), l'ingénieur peut concevoir un réseau d'échangeurs de chaleur ([Heat Exchanger Network – HEN](#)). Le HEN est une représentation graphique schématique des flux et des échangeurs de chaleur réalisant le transfert de chaleur entre ceux-ci, à l'exception de toute autre information relative au diagramme d'écoulement (flowsheet). Cette représentation facilite le processus de conception d'un système optimisé.

Dans cet exemple, nous allons concevoir un [MER HEN](#) (réseau d'échangeurs de chaleur à récupération d'énergie maximale – Maximum Energy Recovery ou Minimum Energy Requirement).

 Clic droit sur [Sep. Design 1\\_1](#) () dans le *Target Explorer*

 Sélectionner [Add HEN...](#)  [Add MER HEN](#)

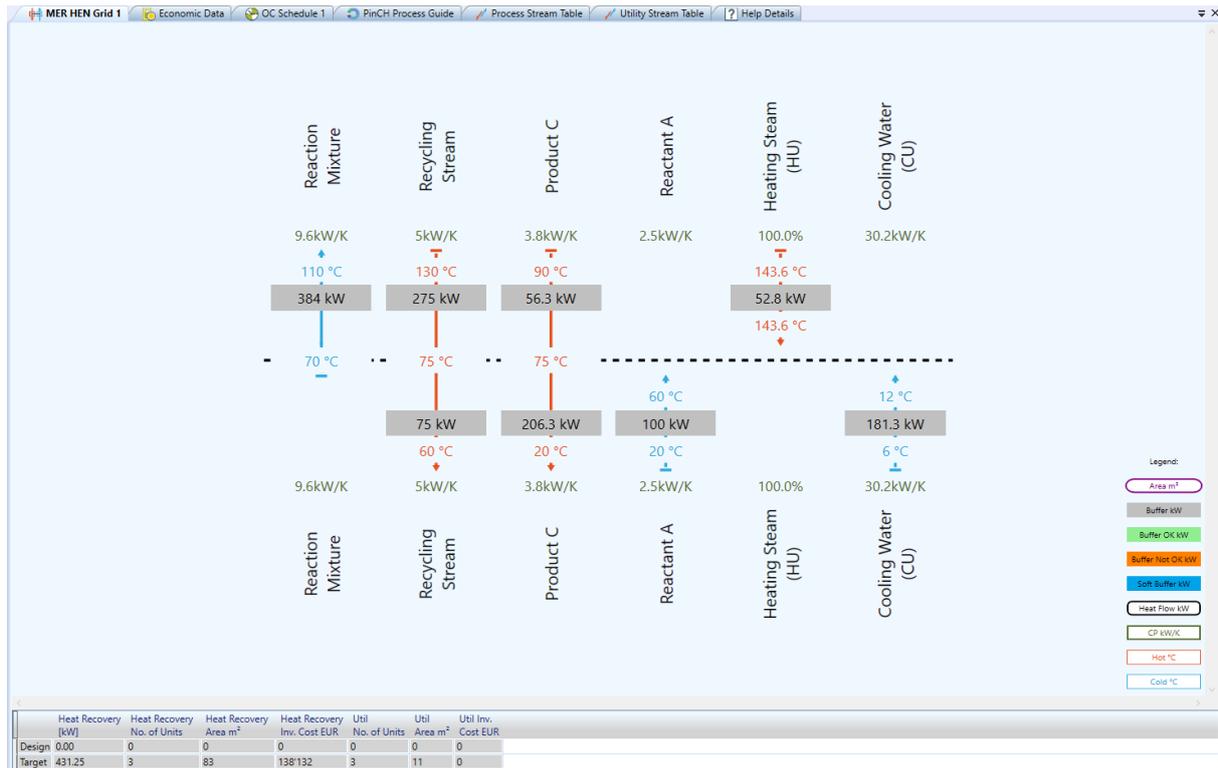


FIGURE 15 – Grille MER HEN vide

Le nouvel onglet **MER HEN Grid 1** apparaît. La direction des flèches et les couleurs des flux affichés dans le MER HEN indiquent s'ils doivent être chauffés (en bleu) ou refroidis (en rouge). Les valeurs de débit de capacité thermique ( $CP$ ) sont indiquées au-dessous ou au-dessus des noms du flux associé. Vous pouvez librement modifier l'ordre des flux par un glisser-déposer.

**Information supplémentaire:** Le MER HEN est strictement lié à la température de pincement. Autrement dit, les flux sont divisés en deux sous-systèmes, c-à-d au-dessus et en dessous du pincement. Il n'est pas possible de lier les flux à travers la ligne pointillée définissant le pincement et donc aucun transfert de chaleur à travers le pincement ne peut se produire. En outre, l'utilité chaude est disponible uniquement au-dessus du pincement et l'utilité froide uniquement en dessous. Les conceptions garantissent que lors de la création du MER HEN, les **trois règles d'or du pincement** ne sont pas enfreintes (voir [Manuel - Pinch - OFEN](#), chapitre 5).

Considérons d'abord le sous-système au-dessous du pincement. Selon les règles de conception d'un MER HEN (voir [Manuel - Pinch - OFEN](#), chapitre 7), il faut commencer avec le flux entrant dans le pincement qui a le plus grand débit de capacité thermique (le plus grand  $CP$ ). Dans notre exemple, il s'agit du flux Reactant A ( $CP = 2.5 \text{ kW/K}$ ), qu'il faut chauffer jusqu'à la température de pincement grâce à un échangeur de puissance aussi grande que possible. Le flux Product C ( $CP = 3.8 \text{ kW/K}$  (valeur arrondie en réalité  $CP = 3.75 \text{ kW/K}$ )) a suffisamment de chaleur et convient donc pour cet échange. Pour créer un échangeur de chaleur, nous avons besoin de deux "Heater / Cooler".

- ☞ En passant avec la souris sur le HEN, une ligne horizontale grise apparaît à certaines positions. En cliquant sur cette ligne, un espace est ajouté dans le HEN.
- ☞ Pour ajouter un "Heater / Cooler", cliquer sur la ligne bleue du flux Reactant A
- ☞ Puis cliquer sur la ligne rouge du flux Product C (verticalement aligné avec le Heater / Cooler placé sur le Reactant A)

Les *Heater / Cooler* apparaissent comme des rectangles arrondis. La puissance transférée (kW) est affichée au centre du rectangle arrondi de gauche, et la surface de transfert ( $m^2$ ) dans le rectangle arrondi de droite (voir Figure 16). Le rectangle bleu indique ici la température d'entrée du flux froid, et le rectangle rouge la température de sortie du flux chaud.



FIGURE 16 – Echangeur de chaleur avec deux *Heater / Cooler*

Connectez maintenant les deux *Heater / Cooler* :

- ☞ Lorsqu'on passe avec la souris sur les bords arrondis des ovals, ils apparaissent en gras. Cliquer sur l'arrondi pour commencer la connexion
- ☞ En maintenant le bouton de la souris enfoncé, faire glisser et relâcher sur l'arrondi de l'autre *Heater / Cooler* : une barre symbolisant le transfert par l'échangeur apparaît.
- ☞ Un double-clic sur l'un des *Heater / Cooler* permet de déterminer automatiquement la puissance maximale possible du HEX

Cette procédure s'appelle **Tick Off Rule** (voir [Manuel - Pinch - OFEN](#)) ; les trois règles d'or du pincement, ainsi que la différence de température minimale  $\Delta T_{min}$ , sont respectées. Vous pouvez également spécifier manuellement le transfert de chaleur en entrant la puissance souhaitée dans le champ correspondant, puis, confirmez avec *Enter*. Comme vous pouvez le voir, un zéro vert apparaît dans le rectangle tout en bas du flux Reactant A. Ainsi, les besoins de chauffage du flux Reactant A sont satisfaits pour le sous-système inférieur du HEN.

**Note:** La valeur (en kW) apparaissant dans les rectangles aux extrémités des flux ("Buffer"), indique la puissance thermique qui doit être fournie ou retirée au flux pour qu'il atteigne la température finale requise. Si un flux existe à la fois au-dessus et au-dessous du pincement, les besoins de chauffage/refroidissement doivent être satisfaits séparément.

Pour compléter le MER HEN en dessous du pincement, les besoins de refroidissement restants sur les flux chauds doivent être satisfaits par l'utilité froide au moyen de deux échangeurs supplémentaires.

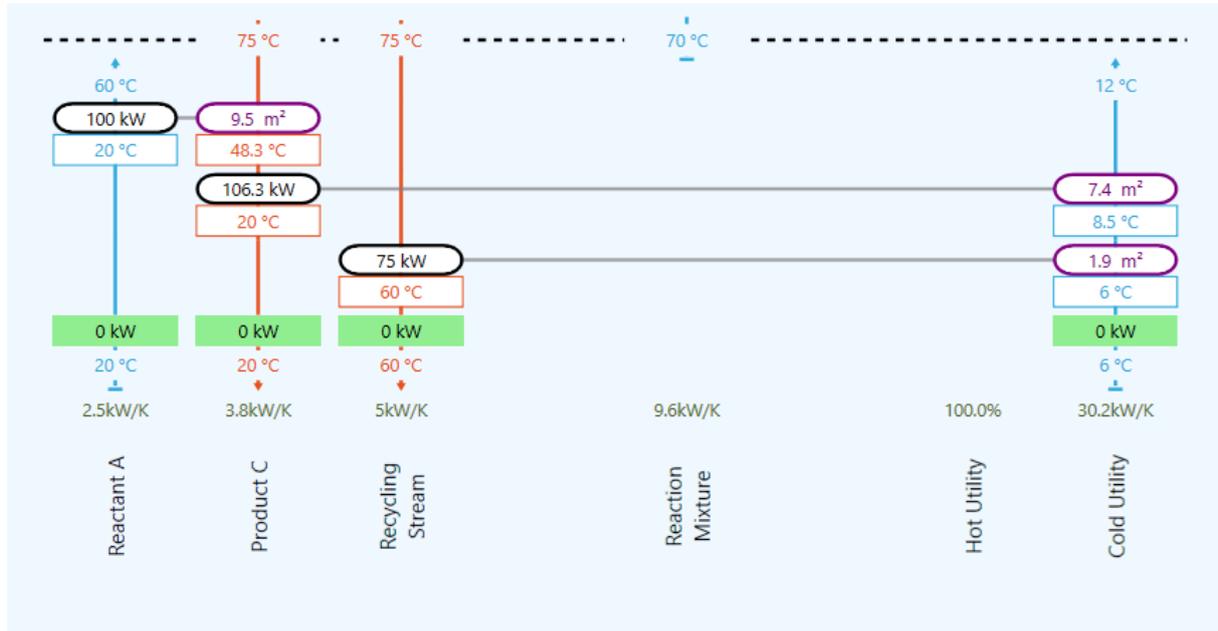


FIGURE 17 – MER HEN du sous-système en dessous le pincement

**Information supplémentaire:** Pour supprimer un échangeur de chaleur il faut :

- ☞ Clic droit sur un des deux *Heater / Cooler*
- ☞ Sélectionner [Remove Heat Exchanger Connection](#)

Suppression d'un *Heater / Cooler* :

- ☞ Clic droit sur le *Heater / Cooler*
- ☞ Sélectionner [Remove Heater / Cooler](#)

Considérons maintenant le sous-système au-dessus du pincement : essayez, en deux minutes, de créer les échangeurs de chaleur nécessaires.

Comme vous l'avez probablement remarqué, la connexion entre les flux chauds et froids immédiatement au-dessus du pincement n'est pas possible. La [règle du N \(Number Rule\)](#) est violée (voir [Manuel - Pinch - OFEN](#)). Le flux froid Reaction Mixture ( $CP = 9.6 \text{ kW/K}$ ) doit être divisé en deux.

- ☞ Clic droit sur le flux *Reaction Mixture*
- ☞ Sélectionner [Split Stream](#)

Recommencez avec le flux chaud ayant le plus grand débit de capacité thermique entrant dans le pincement. Connectez le flux Recycling Stream ( $CP = 5 \text{ kW/K}$ ) avec une des deux "branches" du flux Reaction Mixture ( $CP = 4.8 \text{ kW/K}$ ).

La connexion n'est pas possible car la règle du CP ([CP-Rule](#)) n'est pas satisfaite. La règle stipule que le débit de capacité thermique de Reaction Mixture ( $CP = 4.8 \text{ kW/K}$ ) doit être supérieur ou égal à celui de Product C ( $CP = 5 \text{ kW/K}$ ) (voir [Manuel - Pinch - OFEN](#)). Modifiez le débit de capacité thermique d'une des branches du flux Reaction Mixture dans la cellule correspondante, juste en dessous du nom du flux.

- ☞ Cliquer sur la cellule rectangulaire
- ☞ Entrer un débit de capacité thermique de  $CP = 5.85 \text{ kW/K}$ .

La connexion entre les flux est maintenant possible. PinCH ne supporte que les mélanges isothermes lorsqu'il s'agit de regrouper deux branches d'un flux. Pour garantir un mélange isotherme, la règle du *Tick Off* ne doit être utilisée qu'après avoir placé les *Heater / Cooler* sur chaque branche et les avoir connectées :

- ☞ Relier par un échangeur Reaction Mixture ( $CP = 3.8 \text{ kW/K}$ ) et Product C ( $CP = 3.8 \text{ kW/K}$ ), **sans** indiquer de puissance de transfert

Pour réchauffer la deuxième branche de Reaction Mixture ( $CP = 3.8 \text{ kW/K}$ ), raccordez le flux à Product C ( $CP = 3.8 \text{ kW/K}$ ) en plaçant un échangeur (avec liaison), comme pour la première branche. Avant de placer les autres éléments du HEN, il faut réunir les deux branches du flux Reaction Mixture :

- ☞ Clic droit sur une des deux branches de Reaction Mixture (au-dessus des *Heater / Cooler*)
- ☞ Sélectionner **Merge Branches**

Afin de satisfaire la règle du mélange isotherme, (voir [Manuel - Pinch - OFEN](#)), il faut en général d'abord choisir le HEX avec la puissance maximale la plus petite. Procédez comme suit :

- ☞ Double-clic sur le *Heater / Cooler* du flux Reaction Mixture raccordé à Product C (règle du *Tick Off*)
- ☞ De même, appliquer la règle du *Tick Off* à la branche de Reaction Mixture connecté au flux Recycling Stream

Ainsi, les températures des deux branches sont identiques et le mélange est donc isotherme. Pour compléter le MER HEN, connectez le flux réunifié supérieur de Reaction Mixture à nouveau avec le flux Recycling Stream et finalement avec l'utilité chaude.

Le tableau figurant en bas de la Figure 18 montre d'une part les valeurs cibles d'énergie et de coûts calculées à l'étape 8 (ligne Target) et d'autre part les valeurs résultant de la conception du MER HEN (ligne Design). On peut voir que la valeur cible de récupération de chaleur est atteinte. Les valeurs cibles pour la surface de transfert de chaleur et les coûts d'investissement sont, elles, pratiquement atteintes.

**Note:** Le fait d'approcher de si près les cibles d'énergie et de coûts est sans doute dû à la simplicité de l'exemple choisi. En général, il est important de trouver un compromis entre la complexité du réseau d'échangeurs de chaleur et le degré d'efficacité énergétique et économique. Pour cela, PinCH permet de créer un HEN *relaxé*, pour lequel les règles d'or du pincement ne doivent plus être respectées de manière stricte. Il vous appartient d'utiliser ces libertés avec prudence.

Le MER-HEN complet est illustré à la Figure 18

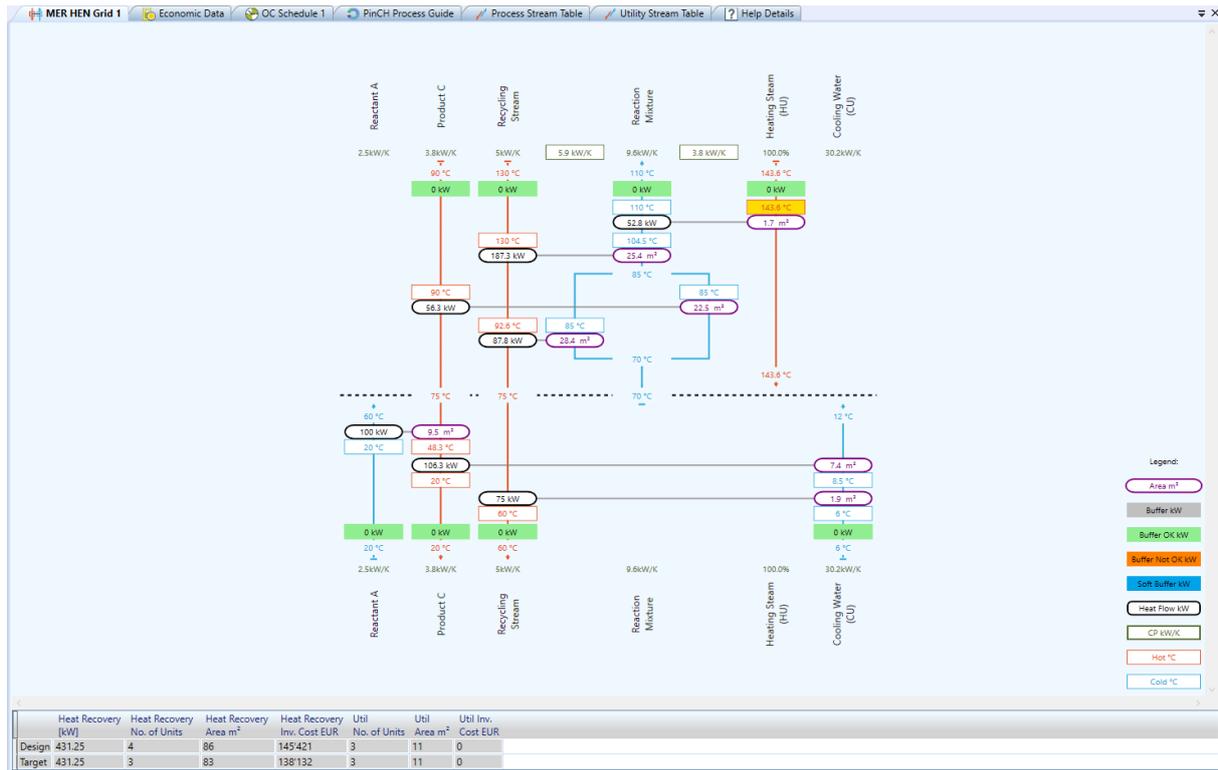


FIGURE 18 – MER HEN

Ce MER HEN est juste un exemple. Pour chaque procédé, il existe généralement plusieurs structures possibles de MER HEN (différentes possibilités de connecter les flux entre-eux), et pour chaque structure, des répartitions différentes de la puissance transmise entre les flux.

### Information supplémentaire: Driving Force Plot / HEX Details

Si les coûts d'investissement des échangeurs entre flux de procédé (valeur de *Design* du *Heat Recovery Investment Cost*) du HEN diffèrent fortement des valeurs *Target*, cela est dû à un transfert de chaleur non vertical (voir [Manuel - Pinch - OFEN](#)). Pour repérer ces transferts non verticaux, il faut examiner le *Driving Force Plot* de chaque échangeur de chaleur du HEN. En double-cliquant sur la ligne de connexion entre les *Heater / Cooler* (ou en cliquant avec le bouton droit de la souris sur l'un des *Heater / Cooler* et en sélectionnant *Display HEX Details*), on accède à un nouvel onglet contenant une liste de tous les échangeurs de chaleur ainsi que les détails nécessaires à leur analyse et à leur conception. Sous le tableau il y a, pour chaque échangeur sélectionné : à gauche, un diagramme ( $T, \Delta\dot{H}$ ) représentant les flux traversant l'échangeur et son profil de température ; à droite, le *Driving Force Plot* (en noir gras : le profil de l'échangeur sélectionné).

Le *Driving Force Plot* représente la différence de température sous laquelle a lieu le transfert de chaleur. La courbe bleue représente le gradient de température vertical entre la CC chaude et la CC froide (en fonction de la température de la CC froide). La courbe noire indique le gradient de température réel pour l'échangeur de chaleur sélectionné (en fonction de la température du flux froid).

Si la courbe bleue et le profil de l'échangeur en noir ne sont pas confondus, on parle d'un échangeur de chaleur en «*Criss-Cross*». Ce faisant, trop ou trop peu de *Driving Force* (gradient de température) est utilisé, avec pour conséquence une diminution ou une augmentation de la surface de

transfert de l'échangeur.

L'optimisation du HEN à l'aide du *Driving Force Plot* permet en général de minimiser la surface totale de transfert de chaleur. Cependant, cette méthode est souvent en contradiction avec la règle du *Tick Off* qui vise à maximiser la puissance transférée pour minimiser le nombre d'échangeurs et donc minimiser la complexité du HEN. C'est à l'ingénieur de rechercher un compromis approprié entre ces objectifs contradictoires.

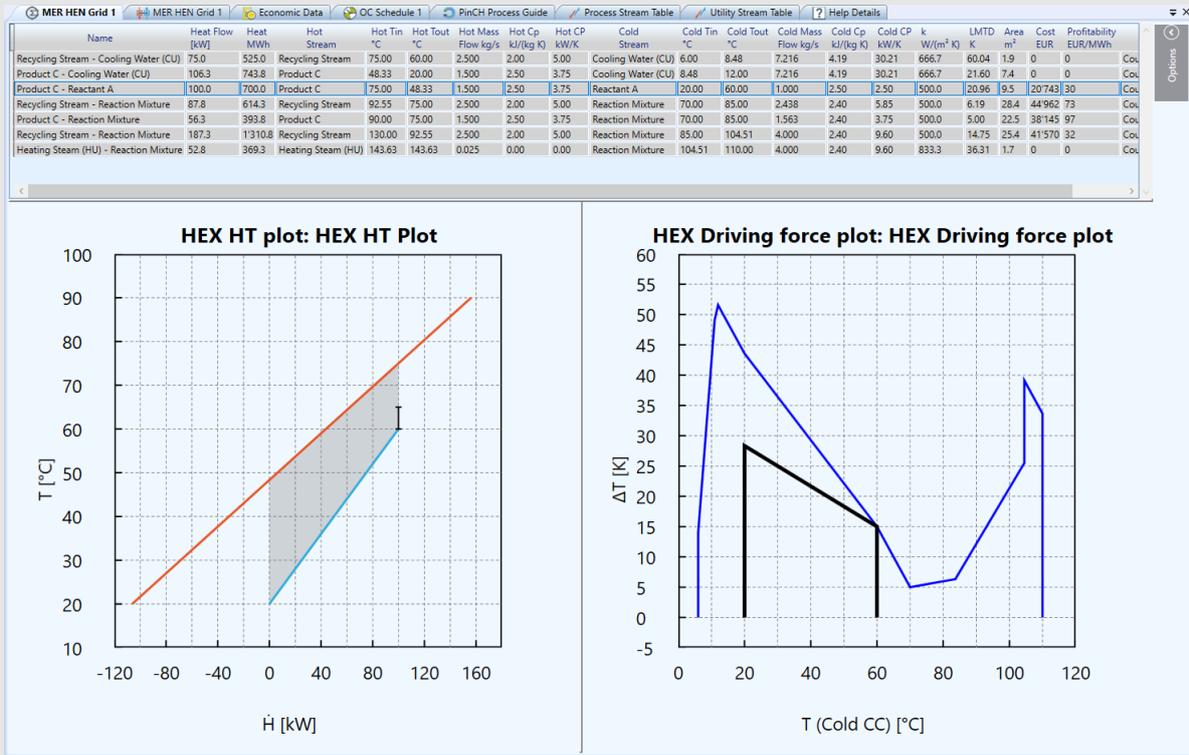


FIGURE 19 – Driving Force Plot de l'échangeur de chaleur Product C – Reactant A

Afin d'optimiser le *Driving Force*, le débit de capacité thermique *CP* des flux de procédé impliqués doit être ajusté. Ceci est possible uniquement en créant des divisions de flux supplémentaires ou en concevant une structure de HEN différente. Dans notre exemple, la valeur cible de surface d'échange (*Heat Recovery Area*) est presque atteinte ; l'utilisation du *Driving Force Plot* n'est donc pas pertinente.

En cliquant sur *Options*, dans le coin supérieur droit, vous pouvez modifier le type et les autres caractéristiques de chaque échangeur.

## IV Procédé optimisé

En transposant le MER HEN sur le diagramme d'écoulement de la Figure 2, on obtient le schéma du procédé optimisé suivant :

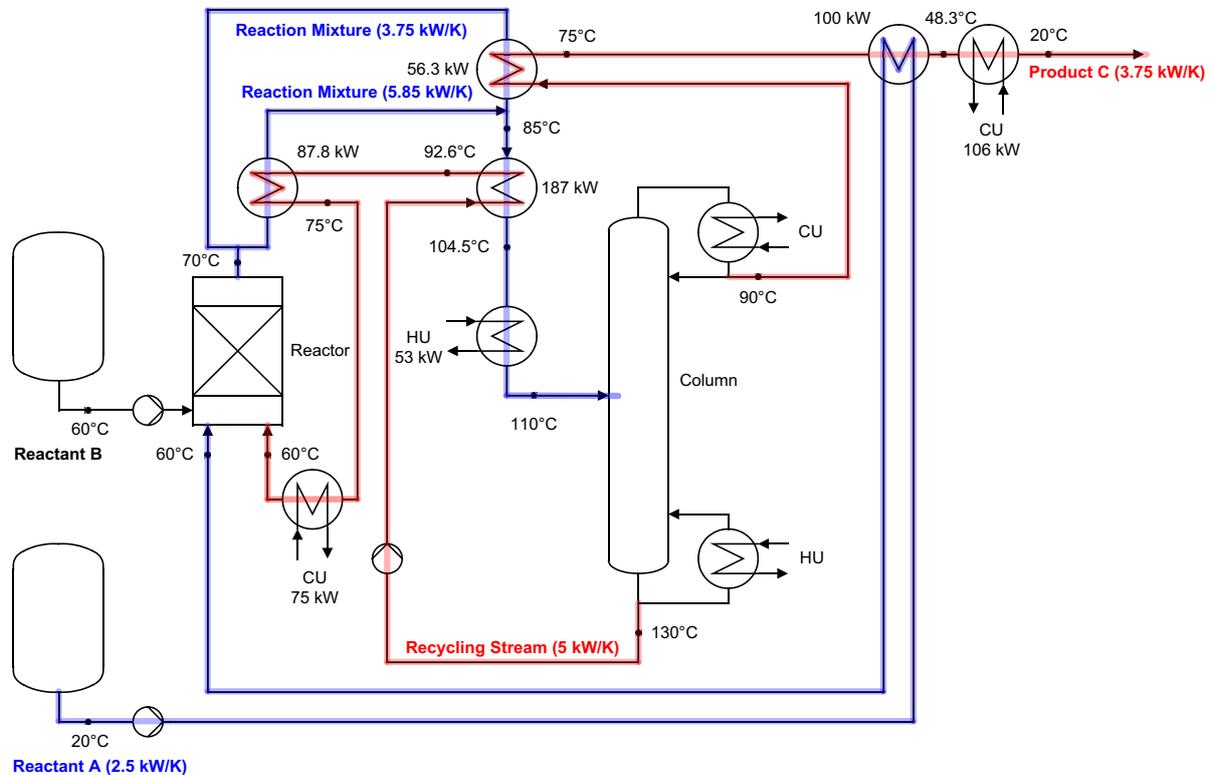


FIGURE 20 – Diagramme d'écoulement (flowsheet) du procédé optimisé

TABLE 4 – Potentiel d'économies

	Hot Utility		Cold Utility		Energy Cost	Inv. Cost	Yearly Total Cost
	[kW]	[MWh/an]	[kW]	[MWh/an]	[€/an]	[€]	[€/an]
Existing Design	326	2'282	456	3'192	287'420	0	287'420
Optimized Design	53	371	181	1'267	76'650	145'400	131'030
<b>Savings</b>	<b>273</b>	<b>1'911</b>	<b>275</b>	<b>1'925</b>	<b>210'770</b>	<b>-145'421</b>	<b>156'390</b>

Comparé au procédé existant, le réseau d'échangeurs optimisé permet d'économiser 84 % sur l'utilité chaude, 60 % sur l'utilité froide et 210'770 €/an sur les coûts énergétiques. En incluant l'amortissement des investissements, le coût total annuel de l'installation optimisée est d'environ 131'000 €/an, soit une réduction de 54 %.

## Merci pour votre temps !

Vous connaissez maintenant les étapes les plus élémentaires de l'utilisation de PinCH pour l'analyse d'un procédé continu. N'hésitez pas à nous contacter si vous avez des questions. L'équipe PinCH de la Haute Ecole Spécialisée de Lucerne et le Centre de Compétence PinCH Francophone de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud se tiennent à votre disposition à votre convenance. Veuillez également noter que nous pouvons vous assister et assurer la qualité de vos analyses Pinch. Cet apprentissage par la pratique s'est déjà avéré être une excellente expérience à de multiples occasions. Dans tous les cas, nous vous souhaitons beaucoup de plaisir et de succès avec PinCH. Merci beaucoup d'avoir pris le temps de nous rejoindre ! Pour de plus amples renseignements, veuillez consulter notre site Web [www.pinch-analyse.ch/fr](http://www.pinch-analyse.ch/fr). Vous trouverez nos coordonnées ci-dessous.

Meilleures salutations,  
L'équipe PinCH de la Haute Ecole Spécialisée de Lucerne

### Kontakt Deutsch und Englisch :

Hochschule Luzern  
Technik und Architektur  
Kompetenzzentrum Thermische  
Energiesysteme und Verfahrenstechnik  
Technikumstrasse 21  
CH-6048 Horw  
Prof. Dr. Beat Wellig  
T +41 41 349 32 57  
[pinch@hslu.ch](mailto:pinch@hslu.ch)

### Contact français :

Haute Ecole d'Ingénierie et de  
Gestion du Canton de Vaud  
Institut de Génie Thermique  
Centre de compétence PinCH francophone  
Avenue des Sports 20  
CH-1401 Yverdon-les-Bains  
Dr. Pierre Krummenacher  
T +41 24 557 61 54  
[pinch@heig-vd.ch](mailto:pinch@heig-vd.ch)



Cet ouvrage (ci-après dénommé "Tutoriel") sert à présenter le logiciel PinCH de la Haute Ecole Spécialisée de Lucerne. Ce tutoriel est disponible gratuitement à [www.pinch-analyse.ch](http://www.pinch-analyse.ch). Il ne doit pas être distribué commercialement. L'utilisation du tutoriel dans le cadre de cours de formation et de perfectionnement, d'ateliers, de coaching ou d'événements similaires est interdite. La distribution de travaux dérivés basés sur ce tutoriel est interdite.