

PinCH Tutoriel 4

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 :

PinCH Tutoriel 0	Aperçu rapide
PinCH Tutoriel 1	Procédé continu
PinCH Tutoriel 2	Cas de fonctionnement multiples
PinCH Tutoriel 3	Procédé discontinu
PinCH Tutoriel 4	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. 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.

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)
- R. Smith : Chemical Process Design and Integration. 2nd 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. 2nd Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007 (ISBN 978-0-7506-8260-2)

Vous travaillez actuellement le [Tutoriel 4](#). Il s'agit d'intégrer le stockage d'énergie thermique dans une installation de production de sel nutritif. Le [Tutoriel 4](#) est structuré comme suit :

Table des matières

I. Introduction au Tutoriel 4	2
II. Etude de cas : Production de sel nutritif	3
III. Les 10 étapes de PinCH	6
IV. Procédé optimisé	16

I Introduction au [Tutoriel 4](#)

Objectif d'apprentissage : Comprendre comment le stockage d'énergie thermique peut être systématiquement intégré avec [PinCH](#).

Durée : 1 à 2 heures

Le [Tutoriel 4](#) est basé sur les résultats du [Tutoriel 3](#) - il est admis ici que vous avez déjà pratiqué ce dernier. Le présent tutoriel vous guide à travers l'analyse Pinch une étape à la fois, et vous apprendrez les possibilités qu'offrent le logiciel et comment l'utiliser. Suivez les étapes ci-dessous pour intégrer le stockage d'énergie thermique ([les étapes 7 et 9](#) ne sont pas nécessaires pour cette étude de cas) :

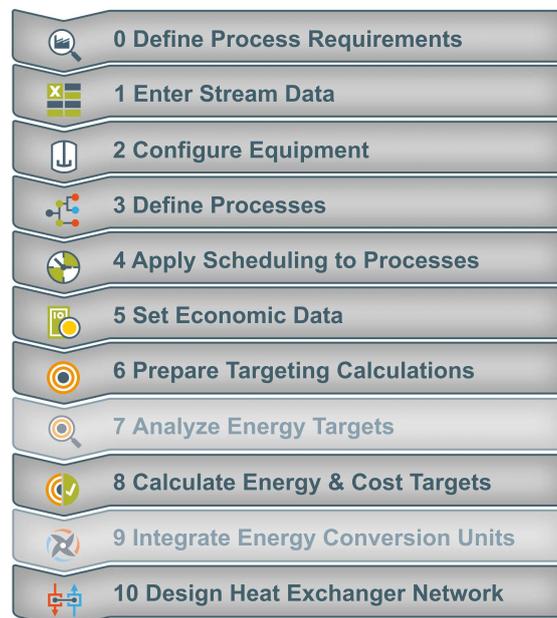


FIGURE 1 – Étapes de travail dans [PinCH](#) pour intégrer le stockage d'énergie thermique.

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

II Etude de cas : Production de sel nutritif

Puisque ce tutoriel traite du procédé du [Tutoriel 3](#), une description détaillée de l'installation n'est pas nécessaire. En particulier, l'ordonnancement et les utilités sont identiques et ne sont plus présentés. Dans ce tutoriel, nous intégrons un stockage d'énergie thermique. S'agissant du fonctionnement des types de stockage considérés (stockage stratifié et stockage avec une température fixe et une masse variable) dans PinCH, référez-vous au document [Manuel - Pinch - OFEN](#).

Description du procédé

L'installation de production de sel nutritif optimisée pour la récupération de chaleur (RC) directe dans le [Tutoriel 3](#) est traitée plus en détail dans ce tutoriel. Ici, nous considérons uniquement le mode de fonctionnement sans chevauchement.

Après dissolution du sel inorganique (Inorganic Salt) dans le solvant aqueux (Solvent), le contenu du réacteur agité B100 est transféré dans le réacteur C100 où l'additif (Additive) est ajoutée. Puis la solution est évaporée dans le réacteur C100. La substance pure est ensuite extraite lors de la cristallisation, par refroidissement, dans le cristalliseur B102. Les étapes détaillées du procédé sont décrites dans le [Tutoriel 3](#). Le procédé optimisé pour la RC directe est illustré à la Figure 2.

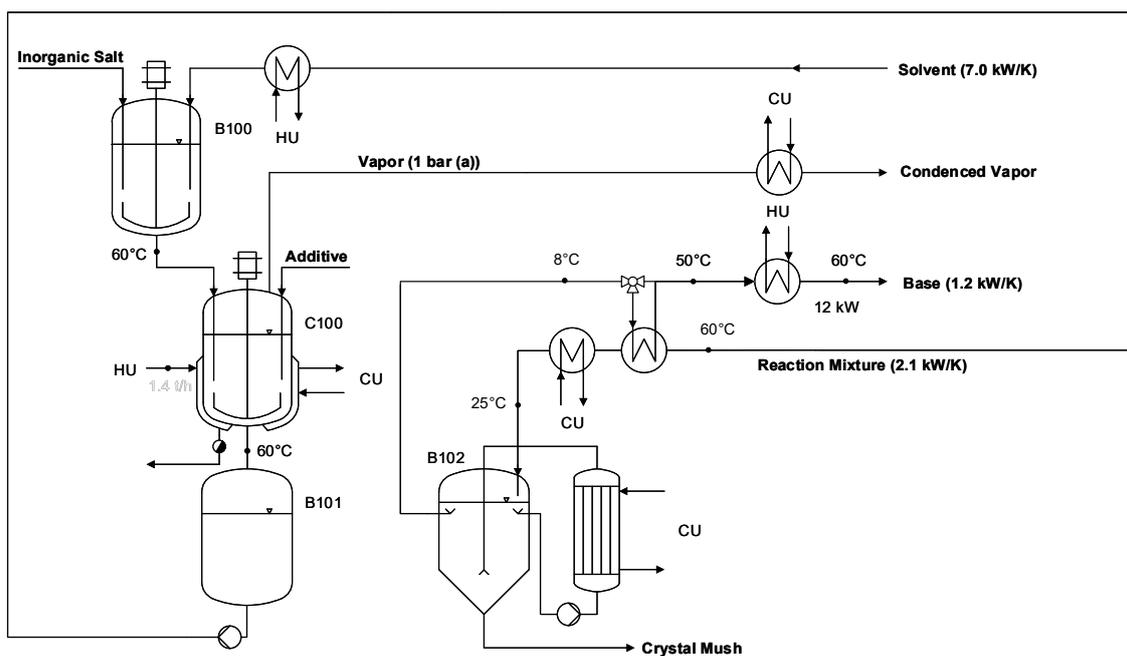


FIGURE 2 – Diagramme d'écoulement de l'installation de production optimisée pour la RC directe.

Coûts d'investissement

Dans cette étude de cas, les coûts d'investissement pour le réseau d'échangeurs de chaleur et de stockage (HESN) doivent être pris en compte. Puisque nous ne prenons pas en compte les ECUs dans ce tutoriel :

$$C_{Inv} = C_{HESN} \quad (1)$$

Les coûts pour le HESN se composent des coûts pour le stockage de chaleur (Heat Storage, HS) C_{HS} , le média de stockage (SM) C_{SM} , les échangeurs de chaleur (HEX) C_{HEX} et un coût fixe C_{IL} par boucle intermédiaire (Intermediate Loop, IL), indépendant de la capacité de stockage. Le coût fixe C_{IL} peut être spécifié par l'utilisateur à l'étape 8. La structure d'un stockage stratifié et les termes utilisés sont illustrés à la Figure 11, étape 8, page 13.

$$C_{HESN} = \sum_{HS} (C_{HS} + C_{SM} + C_{IL})_{HS} + \sum_{HEX} C_{HEX} \quad (2)$$

Les coûts des échangeurs de chaleur sont calculés comme dans le Tutoriel 1 :

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

Où $C_0 = 0$, $C_b = 110'000 \text{ €}$, $A_b = 100 \text{ m}^2$ et $m = 0.71$ (voir Tutoriel 1).

Les coûts pour le HS et le SM sont calculés en fonction du volume de stockage V , respectivement de la masse du média m_{SM} :

$$C_{HS} = C_0 + C_b \cdot \left(\frac{V}{V_b} \right)^m \quad \text{resp.} \quad C_{SM} = m_{SM} \cdot c_{SM} \quad (4)$$

Dans cette étude de cas, nous utilisons les valeurs suivantes :

- Coût de base du HS (indépendant du volume de stockage) : $C_0 = 0 \text{ €}$
- Coût pour un HS de référence : ($b = \text{base}$) : $C_b = 150'000 \text{ €}$
- Volume d'un HS de référence : $V_b = 100 \text{ m}^3$
- Exposant d'économie d'échelle : $m = 0.71$
- Coût spécifique du SM (eau dans ce cas) : $c_{SM} = 0.001 \text{ €/kg}$

Les coûts d'investissement sont les coûts totaux d'installation et de mise en service du HESN.

Coûts totaux

Pendant la durée d'amortissement, c'est-à-dire une fois mise en oeuvre la RC, les coûts totaux annuels $C_{tot} \text{ €/an}$ sont de $50'800 \text{ €/an}$ comme indiqué dans le Tutoriel 3.

Problème

L'entreprise souhaite analyser le potentiel RC indirecte de l'installation de production optimisée pour la RC directe du Tutoriel 3. Il s'agit de vérifier si l'intégration d'un stockage de chaleur est pertinent. Nous vous montrons dans ce tutoriel comment mener de manière systématique et ciblée l'analyse et l'optimisation avec le logiciel PinCH.

Step 0: Define Process Requirements

Les exigences de procédé pour la RC indirecte correspondent aux besoins de chauffage et de refroidissement qui ne peuvent pas être couverts par la RC directe. Les exigences relatives à la RC indirecte de la production de sel nutritif pour le cas d'exploitation sans chevauchement sont illustrées à la Figure 3 et précisées au Tableau 1. Nous travaillons directement avec le débit de capacité thermique $CP = \dot{m} \cdot c_p$, car celles-ci ont déjà été calculées dans le Tutoriel 3. Le flux de procédé Base est chauffé de 8 °C à 50 °C par RC directe du flux de procédé Reaction Mixture. Mais comme le flux Base dure encore 30 minutes (temps pour vider le cristalliseur) et que son chauffage de 8 °C à 60 °C doit avoir lieu pendant ce temps, ces deux exigences de procédé doivent être définies séparément.

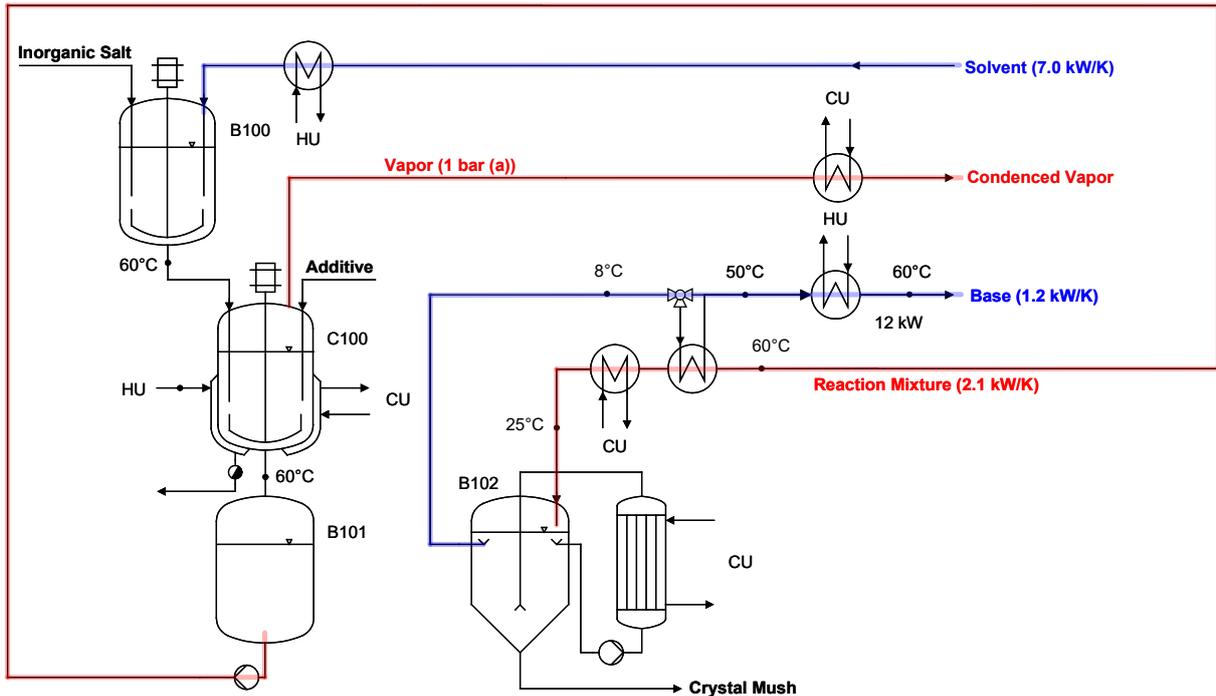


FIGURE 3 – Diagramme d'écoulement avec les exigences de procédé

TABLE 1 – Exigences de procédé après RC directe

Exigence de Procédé	T_{in} [°C]	T_{out} [°C]	CP [kW/K]	α [W/(m ² K)]	t_{start} [h]	t_{stop} [h]
Solvent	20.0	80.0	7.00	2'000	0.0	1.0
Vapor	x=1	x=0	-*	4'000	2.5	4.5
Reaction Mixture	36.3	25.0	2.11	500	7.5	10.5
Base, TS3	50.0	60.0	1.19	500	7.5	10.5
Base, TS4	8.0	60.0	1.19	500	10.5	11.0

* Condensation à $p = 1 \text{ bar(a)}$

III Les 10 étapes de 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](#).

Le tutoriel suit les [10 étapes de PinCH](#) (cf. [Tutoriel 0](#)). Dans les [étapes 1 à 5](#), les données relatives au procédé sont enregistrées dans le [Project Explorer](#). Dans les [étapes 6 à 10](#), l'installation est optimisée dans le [Target Explorer](#). Créez un nouveau projet et nommez-le *FineChemistryAG*.



Step 1: Enter Stream Data

Saisissez les exigences de procédé dans le tableau des flux de procédé (Process Stream Table). Le tableau complet des flux de procédé ressemble à ceci :

+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	m kg/s	c _p kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m ² K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	ΔH kW	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg	Soft	tstart h	tstop h
	Solvent	/	20	80	1.66667	4.2	-	2000	-	7	420	Simple	-	<input type="checkbox"/>	0	1
	Vapor	/	x1	x0	0.2778	-	2257.08	4000	1	-	627.02	Water	-	<input type="checkbox"/>	2.5	4.5
	Reaction Mixture	/	39.1	25	0.602	3.5	-	500	-	2.11	29.71	Simple	-	<input type="checkbox"/>	7.5	10.5
	Base, TS3	/	45	60	0.397	3	-	500	-	1.19	17.87	Simple	-	<input type="checkbox"/>	7.5	10.5
	Base, TS4	/	8	60	0.397	3	-	500	-	1.19	61.93	Simple	-	<input type="checkbox"/>	10.5	11

FIGURE 4 – Tableau des flux de procédé (après RC directe)

Dans un deuxième temps, les utilités disponibles (fluides de chauffage et de refroidissement) doivent être définies. Remplissez le tableau des flux d'utilités (Utility Stream Table) selon les données du [Tutoriel 3](#). Le tableau complet des flux d'utilités ressemble à ceci :

+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	c _p kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m ² K)	Pressure bar(a)	Utility Cost EUR/kWh	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg
	Heating Steam (HU)	/	x1	x0	-	2181.27	5000	2.5	0.080	Water	-
	Cooling Water (CU)	/	8	14	4.1884	-	2000	1	0.030	Water	-

FIGURE 5 – Tableau des flux d'utilités



Step 2: Configure Equipment

Consultez le [Tutoriel 3](#) pour définir les équipements. Le flux de procédé Base est maintenant divisé et il nécessite un équipement partagé (shared, voir [Tutoriel 2](#)). Les assignations sont les suivantes :

- Solvant → B100
- Vapeur → C100
- Reaction Mixture → B101
- Base, TS3 & Base, TS4 → B102 (shared)



Step 3: Define Processes

Supprimez le procédé prédéfini "Process 1", sous "Base Case" et créez un procédé batch. Pour ce faire, procédez comme suit :

-  Clic droit sur "Process 1" dans Project Explorer
-  Sélectionner [Remove Process](#)
-  Clic droit sur "Processes"
-  Sélectionner [Add Batch Process](#)

Renommez maintenant le procédé batch "Nutrient Salt Production" et affectez-lui tous les flux de procédé définis.



Step 4: Apply Scheduling to Processes

Les données relatives au calendrier d'exploitation du procédé défini à l'étape 3 doivent être spécifiées. S'il y a plusieurs procédés, dont certains au moins se déroulent en parallèle, des cas de fonctionnement au cours desquels un transfert de chaleur entre procédés est possible pourraient apparaître.

Créez le cas de fonctionnement sans chevauchement comme dans le [Tutoriel 3](#). Procédez comme suit :

-  Sélectionner "Batch Daily" dans la colonne "Timebase".
-  Sélectionner "Mo – Sa" comme jours d'exploitation.
-  Ajuster le début de la journée à 00 00
-  "CW Start" : Entrer 1
-  "# Weeks" : Entrer 48
-  [Batch Cycle Duration \(BCD\)](#) : Entrer 11 h
-  "# Batches" : Entrer 2

Le diagramme de Gantt de la période de répétition référée aux équipements (Equipment-Wise Repeated Operation Period, EROP Gantt) pour le procédé est illustré à la Figure 6. Il apparaît que les flux Vapor et Solvent ne se produisent pas en même temps. Un potentiel de RC indirecte pourrait exister ici. Nous l'examinerons de plus près à l'étape 8.

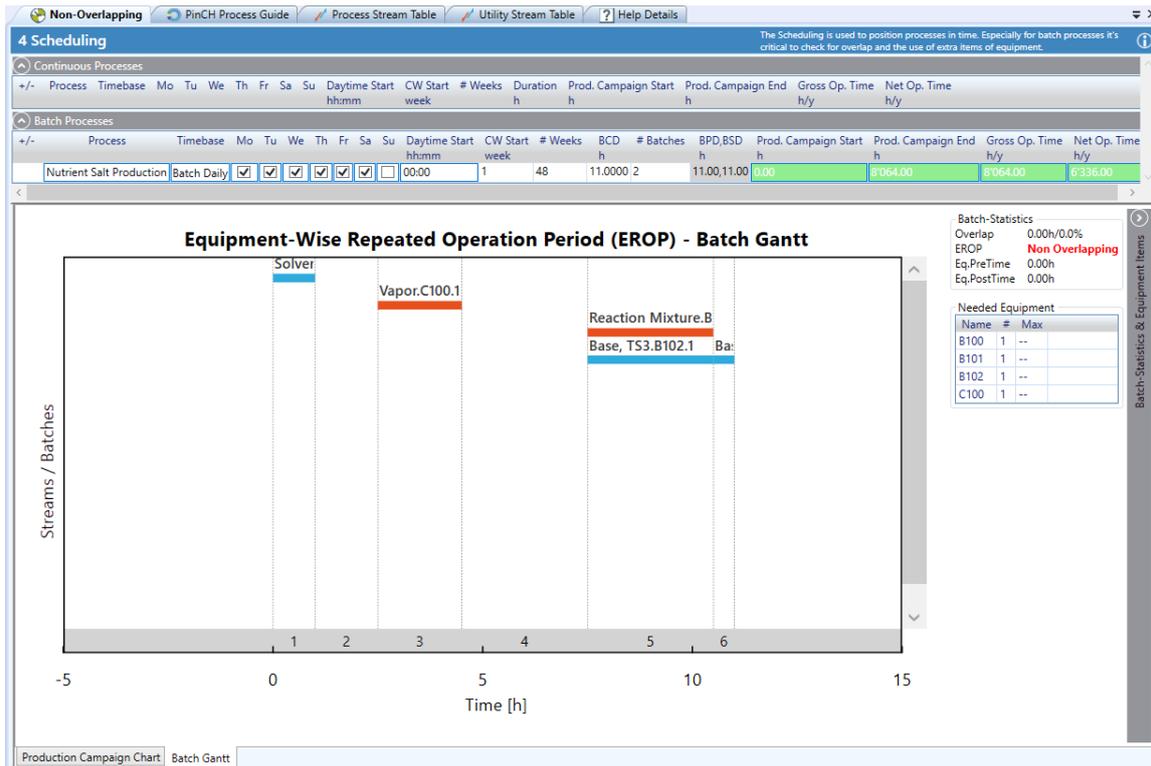


FIGURE 6 – EROP du procédé batch sans chevauchement.



Step 5: Set Economic Data

Les paramètres économiques doivent être spécifiés pour calculer les coûts d'investissement. PinCH calcule les coûts d'investissement pour les échangeurs de chaleur et les systèmes de stockage requis pour répondre aux exigences de procédé. Il s'agit notamment des échangeurs de chaleur entre les flux de procédé (RC), des échangeurs de chaleur entre flux de procédé et flux d'utilités, et des échangeurs de chaleur du système de stockage.

Les données de coût et les propriétés des médias de stockage sont définies sous [Storage : Media Costs and Media Properties](#). Vous pouvez les ajuster ou définir vos propres médias de stockage. Deux moyens de stockage, l'eau et l'huile thermique, sont prédéfinis. Dans notre étude de cas, nous considérons un stockage stratifié avec de l'eau comme fluide de stockage et nous utilisons les paramètres de coût définis dans la section "Investment Costs" à la page 4.

Ouvrez l'onglet "Economic Data" et ajustez les paramètres en fonction des spécifications. Comme l'installation existe déjà, les coûts d'investissement pour les échangeurs de chaleur des utilités peuvent être mis à zéro.

L'ensemble des données comprend les valeurs suivantes :

5 Economic Data The economic Data data is used throughout the software PinCH for calculating the main costs associated with an heat exchanger network

Heat Exchanger Costs

$$C = C_0 + C_b (A/A_b)^m$$

A = Heat Exchanger Area in m²

Type	Fixed Cost C ₀ EUR	Base Cost C _b EUR	Base Area A _b m ²	Exponent m
Process Heat Exchanger	0	110'000.0	100	0.71
Hot Utility Heat Exchanger	0	0.0	100	0.71
Cold Utility Heat Exchanger	0	0.0	100	0.71
ISSP Heat Exchanger	0	110'000.0	100	0.71

Storage: Tank Costs

$$C = C_0 + C_b (V/V_b)^m$$

V = Tank Volume in m³

Storage	Fixed Cost C ₀ EUR	Base Cost C _b EUR	Base Volume V _b m ³	Exponent m	Storage Type
FTVM	0	150'000.0	100	0.71	FTVM
Stratified	0	150'000.0	100	0.71	Stratified

Storage: Media Costs and Media Properties

$$C = C_b * m_{sm}$$

m_{sm} = Mass of Storage Media in kg

Media	Base Cost C _b EUR/kg	Density kg/m ³	α W/(m ² K)	c _p kJ/(kg K)
Water	0.0010	1000	2000	4.18789
Heat Transfer Oil	5.0000	800	1000	2.00000

Amortisation Parameters

Pay Off Period: y Independent: EUR

Interest Rate: % Personnel: %/y Investment Costs

Annuity: 0.237 1/y Maintenance: %/y Investment Costs

Electricity

Note: Utility Costs are set on Utility Stream Table Electricity Cost: EUR/kWh Electric Power: kW

FIGURE 7 – Données économiques

Votre Project Explorer est maintenant structuré comme suit :

FIGURE 8 – Project Explorer

Step 6: Prepare Targeting Calculations

Une fois les [étapes 1 à 5](#) traitées, toutes les données nécessaires à l'analyse Pinch sont stockées dans Project Explorer. Vous pouvez calculer les valeurs cibles d'énergie et de coûts en créant un Target Group dans le Target Explorer. Le Target Explorer devrait maintenant être structuré comme suit :

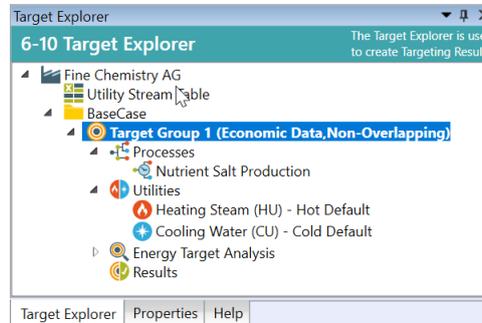


FIGURE 9 – Target Explorer

Si vous avez des difficultés pour créer le Target Group, veuillez consulter le [Tutoriel 1](#) : à l'étape 6, le processus est décrit étape par étape.

Step 7: Analyze Energy Targets

Dans le [Tutoriel 3](#), une analyse détaillée des valeurs cibles d'énergie pour les RCs directe et indirecte a été réalisée. Le potentiel de RC indirecte identifié peut maintenant être analysé de plus près à l'[étape 8](#).

Step 8: Calculate Energy & Cost Targets

Un des aspects clés de l'Analyse Pinch est le calcul des valeurs cibles d'énergie et de coûts avant l'analyse et la conception de différentes mesures de RC. Puisque le potentiel de RC directe a été identifié et développé dans le [Tutoriel 3](#), nous traiterons la RC indirecte à l'[étape 8](#) de ce tutoriel. Le ciblage de la RC indirecte permet l'intégration systématique du stockage de chaleur. Tout d'abord, nous utiliserons le profil des sources et des puits de chaleur indirects (Indirect Source and Sink Profiles (ISSPs)) pour sélectionner les flux à prendre en compte et identifier le potentiel de RC indirecte. Nous préciserons ensuite plus en détails le stockage et nous examinerons sa rentabilité.

Commencez à définir "Target Group 1" :

 Clic droit sur [Results](#)

 [Calculate Target Result with...](#)  Sélectionner [Indirect Heat Recovery](#)

Dans la nouvelle fenêtre, illustrée à la Figure 10, les ISSPs, qui indiquent le potentiel de RC indirecte de la production de sel nutritif, se trouvent représentés à gauche.

Information supplémentaire: La valeur cible de RC indirecte est déterminée sur la base des ISSPs. Les ISSPs sont basés sur le Time Average Model (TAM) (voir [Tutoriel 3](#)) mais dans lequel les flux sont individuellement translatés en température pour "équilibrer" les coûts d'investissement requis pour le transfert de chaleur avec stockage. La durée et le coefficient de transfert de chaleur α de chaque flux sont pris en compte pour le calcul du individuel de translation. Plus la durée d'un flux est courte et plus sa valeur α est faible, plus ce flux doit être "pénalisé" en le translatant vers le bas (pour une source),

respectivement vers le haut (pour un puit). Consultez le [Manuel - Pinch - OFEN](#) pour plus de détails sur les fondements des ISSPs.

Les courbes bleue et rouge décrivent les besoins de chauffage (puits) et de refroidissement (sources). La courbe noire entre les deux représente le stockage stratifié, le point bleu représentant la zone froide et le point rouge la zone chaude. Dans la partie inférieure de la fenêtre les sources et les puits de chaleur pouvant être indirectement couplés à l'aide du stockage sont listés. Ils peuvent être individuellement sélectionnés ou désélectionnés en cochant ou décochant la case correspondante.

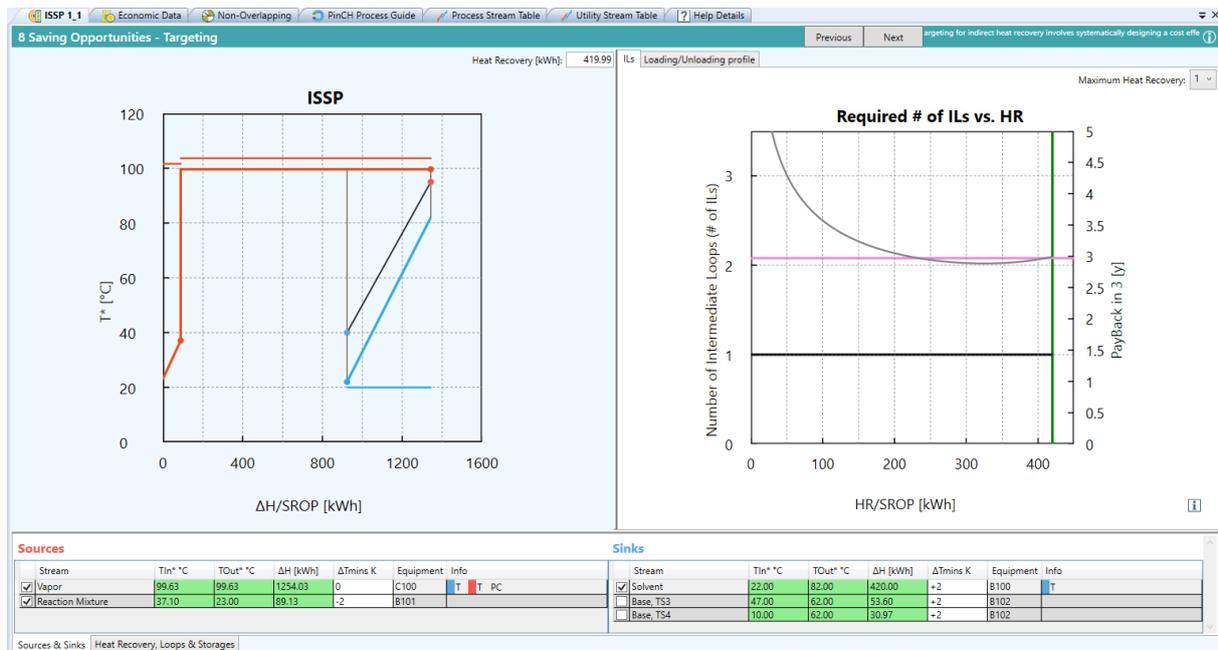


FIGURE 10 – Courbes ISSPs

Note: Sous "View sources and sinks" dans l'onglet Properties (fenêtre Target Explorer), vous pouvez afficher ou masquer les flux inactifs, et visualiser les flux individuels des ISSPs en sélectionnant "Show streams in chart". En sélectionnant cette option, des lignes horizontales, qui illustrent la plage d'enthalpie des flux respectifs, apparaissent sur les l'ISSPs. Un clic sur l'une de ces lignes indique également sa plage de température. Sous Storage, vous pouvez choisir le type et le média de stockage. Le stockage stratifié avec de l'eau comme média de stockage est défini par défaut. Les médias de stockage définis dans Economic Data peuvent être sélectionnés ici. Vous pouvez également définir un coefficient de sécurité (Safety factor %) pour le volume de stockage.

Information supplémentaire:

Avant de commencer à sélectionner les flux pour la RC indirecte, il est utile d'examiner les propriétés pertinentes du stockage stratifié (SS). La Figure 11, illustre un SS type à trois zones. Les flux chauds (sources) sont utilisés pour charger le stockage et les flux froids (puits) pour le décharger. Le média de stockage est pompé d'une zone de température à l'autre par l'intermédiaire d'une IL (Intermediate Loop) et, pendant ce procédé, est chauffé ou refroidi par le HEX de l'IL. Les températures des zones doivent être choisies de manière à ce que les flux de procédé soient amenés aux températures de sortie souhaitées et que les températures des zones soient maintenues constantes. La température d'entrée

des flux froids limite la température de la zone inférieure, tandis que celle des flux chauds limite la température de la zone supérieure.

Puisque le SS est un stockage de chaleur sensible, la différence de température entre les zones est d'une importance cruciale pour le volume de stockage. Ainsi, si la différence entre les températures des zones peut être augmentée en sélectionnant les "bons" sources et puits, il est alors possible de stocker la même quantité de chaleur dans un volume plus petit.

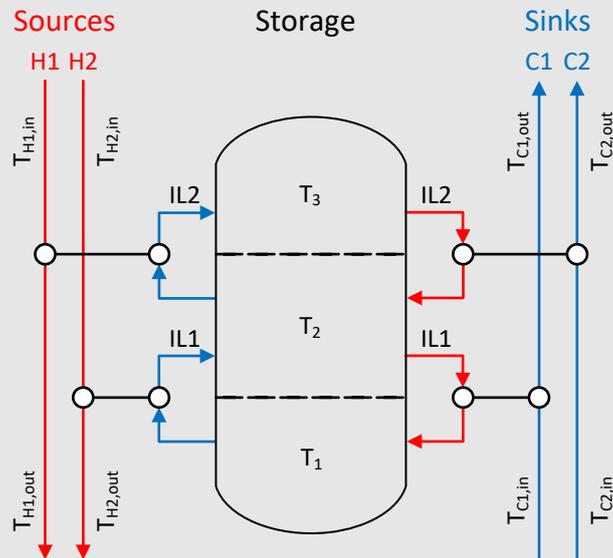


FIGURE 11 – Stockage stratifié générique à trois zones, deux ILs avec deux sources (flux chauds, H1 et H2) et deux puits (flux froids, C1 et C2)

Le flux Base TS3 (flux froid) a une température d'entrée translattée $T_{in}^* = 47^\circ\text{C}$. Ainsi, il ne pourrait refroidir le média de l'IL au mieux puisqu'à 47°C , ce qui, en comparaison des deux autres flux froids, limiterait fortement la température de la zone inférieure d'un stockage stratifié à 3 couches. Cela conduirait à l'installation d'un volume beaucoup trop grand pour la même capacité de stockage. C'est pourquoi nous désélectionnons Base TS3, compte tenu de la relativement faible quantité de chaleur (environ 54 kWh). Sans ce flux, la température de la zone inférieure peut théoriquement être réduite à 22°C . Compte tenu de la petite quantité de chaleur (environ 31 kWh), nous désélectionnons également Base TS4. Au-dessus du graphe des ISSPs, vous pouvez spécifier sous Heat Recovery la RC que le stockage doit couvrir. Dans notre cas, nous choisissons 420 kWh, ce qui correspond au besoin total de chaleur du flux Solvent.

- Cliquer dans la case à cocher en face du flux Base TS3.
- Cliquer dans la case à cocher en face du flux Base TS4.

Pour intégrer le stockage, cliquez sur Next au-dessus du graphique "Required # of ILs vs. HR".

Deux nouveaux graphiques et deux nouveaux tableaux apparaissent maintenant (Figure 12). Le profil de charge/décharge du stockage représente le volume des zones en fonction du temps. Vous pouvez ajuster les températures des deux zones dans le tableau "Specification".

- Sélectionner : $T_{low} = 40^\circ\text{C}$ et $T_{high} = 95^\circ\text{C}$.

Le volume de stockage requis, la masse associée, le nombre d'échangeurs de chaleur requis et la surface totale de transfert de chaleur sont indiqués sur le côté droit du tableau.

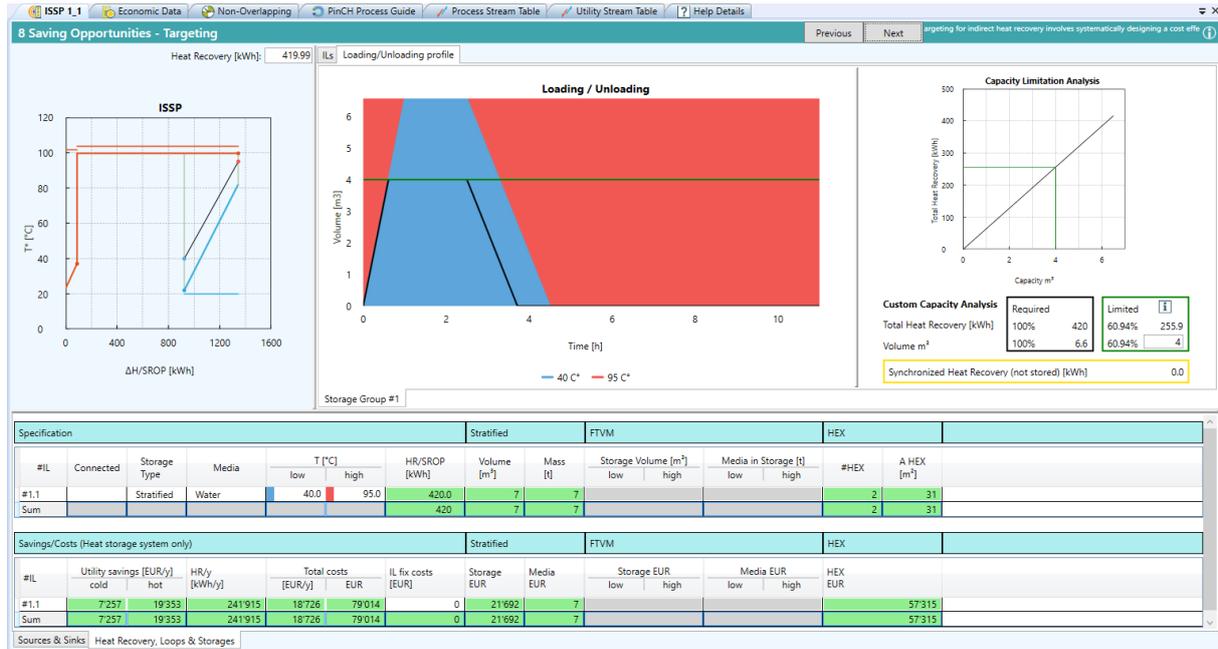


FIGURE 12 – ISSPs, profil de charge/décharge du stockage et graphique de limitation de capacité.

Note:

Le graphique Capacity Limitation Analysis représente la RC indirecte possible en fonction du volume de stockage, lorsque ce dernier est choisi plus petit (encadré Limited) que le volume requis calculé par PinCH (encadré Required). Les valeurs de l'encadré Required résultent de la RC définie dans le champ Heat Recovery en haut à droite de la fenêtre des ISSPs, et illustrée par la superposition partielle des ISSPs. Sous le graphique, dans l'encadré Limited, vous pouvez définir le volume de stockage (en m^3) et PinCH détermine la RC en valeur relative (% de la valeur de RC à volume non limité), et en valeur absolue. Le cas du volume de stockage limité est représenté sur le graphique Loading / Unloading par une ligne horizontale verte, et le profil de charge / décharge à volume limité par la courbe noire. Ces courbes peuvent être affichées ou masquées en cochant ou décochant Draw capacity limitation dans le bloc Storage de l'onglet Properties. La Figure 12 montre une relation linéaire entre la réduction du volume et la réduction de la RC indirecte (un volume de $4m^3$, correspondant à 61% du volume requis, réduit la RC à 255.9 kWh, soit 61% de la RC indirecte représentée par les ISSPs). Cette relation linéaire (la RC est nulle lorsque le volume de stockage est nul) est particulière à cette étude de cas, dans laquelle la source (Vapor) et le puit (Solvent) ne se chevauchent pas dans le temps. Lorsque les sources et les puits qui transfèrent de la chaleur via le système de stockage présentent un certain degré de chevauchement temporel entre eux, la RC reste >0 même à volume nul, correspondant à la part de la chaleur transférée au stockage par les sources et simultanément transférée aux puits de chaleur. Cette RC résultant d'une synchronisation partielle des sources et des puits est désignée par Synchronized Heat Recovery (not stored) [kWh]. Dans notre étude de cas, la période de répétition (SROP) ne comporte qu'une phase de charge (par Vapor) et une phase de décharge (par Solvent). En général, en présence d'un nombre supérieur de sources et de puits de chaleur, le nombre équivalent de cycles de charge / décharge est >1 , ce qui permet de réduire le volume de stockage requis pour une même RC et d'accroître la rentabilité de la RC indirecte.

Les économies d'énergie et de coûts d'exploitation sont indiqués dans le tableau "Savings / Costs". Le stockage stratifié permet d'économiser 241'900 kWh/an. Les coûts d'exploitation annuels diminuent de 26'600 €/an, pendant que les investissements pour le stockage, y compris les échangeurs de chaleur, s'élèvent à 79'000 €.



Step 9: Integrate Energy Conversion Units (ECUs)

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 l'intégration d'une ECU. Pour optimiser (et donc réduire les coûts) des utilités, l'intégration correcte d'une pompe à chaleur, d'un thermo-compresseur, d'un compresseur mécanique de vapeur, d'un ORC (Organic Rankine Cycle) ou d'un CCF peut être réalisée dans [PinCH](#).



Step 10: Design Heat Exchanger Network (HEN)

Félicitations ! Vous avez réalisé avec succès la phase de Targeting pour l'optimisation de l'énergie et des coûts du procédé. Il faut maintenant répondre à une autre question importante : *Comment les valeurs cibles d'énergie et de coûts doivent-elles être concrétisées ?* Vous pouvez créer un [HESN \(Heat Exchanger and Storage Network\)](#) à l'aide de [PinCH](#). Le [HESN](#) est moins complexe qu'un diagramme d'écoulement. Il montre quels flux de procédé sont connectés aux échangeurs de chaleur avec le stockage et dans quel ordre. Une conception optimisée de l'installation de production peut être développée sur cette base. Comme les flux à prendre en compte et les températures de stockage sont sélectionnés par l'utilisateur dans le Targeting, un [HESN](#) n'a pas besoin d'être construit comme un [HEN](#) conventionnel. Les informations du Targeting définissent tous les couplages et le [HESN](#) ne peut donc qu'être affiché qu'à l'écran..

Pour créer un HESN, aller dans Target Explorer, faites un clic droit sur "ISSP 1_1" et sélectionnez [Show HESN Schema](#).

En sélectionnant [Show streams outside heat recovery](#) dans l'onglet Properties du HESN, vous pouvez afficher les flux qui ne sont pas couplés au stockage (Reaction Mixture et Base). Vous pouvez également afficher les débits massiques des boucles intermédiaires en cochant [Show massflow on intermediate loop branch](#). Le HESN est illustré à la Figure 13.

Note: Dans la démarche classique de l'Analyse Pinch (illustrée par les Tutoriels 1 à 3), la conception pratique du HEN (RC directe, phase Design) n'est pas automatique et incombe à l'ingénieur. En général, ce dernier doit faire des choix car il dispose de plusieurs degrés de liberté. Mais il est efficacement guidé par les résultats de la phase de Targeting (valeurs cibles, division des flux à la température de pincement, Pinch Design Method, Driving Force Plot, etc.). La phase de Targeting et celle de Design sont bien séparées ; au stade du Targeting, l'ingénieur ne fait encore aucun choix / hypothèse en ce qui concerne la structure du HEN et la puissance de chaque échangeur. Pour la RC indirecte avec stockage de chaleur, la méthode basée sur les ISSPs proposée dans PinCH ne sépare plus si clairement les phases de Targeting et de Design. Le nombre de degrés de liberté (variables binaires, entières, et continues) étant encore plus grand, avec des effets croisés complexes entre surface de transfert et volume de stockage, une véritable optimisation économique du HESN en fonction d'un ΔT_{min} (ou d'une RC) n'existe pas en pratique (dimensions combinatoire et continue très larges). Les hypothèses implicites de la méthode basée sur les ISSPs permettent de restreindre « l'espace des solutions » pour fournir une solution initiale fonctionnelle (notamment grâce au bilan de masse et d'énergie automatiquement équilibré). La structure du HESN, les énergies transférées avec les sources et les puits, et les volumes de stockage de cette solution initiale sont définis lorsque l'utilisateur a choisi les flux à prendre en compte, les températures des stockages et la chaleur transférée par chaque stockage. Mais le HESN qui en résulte est encore perfectible en optimisant les différents degrés de liberté. Une partie des degrés de liberté peut être optimisée dans PinCH, les autres devront être optimisés en dehors de PinCH, lors de l'ingénierie de détails du système. Consultez le chapitre 17 du [Manuel - Pinch - OFEN](#) pour les détails.

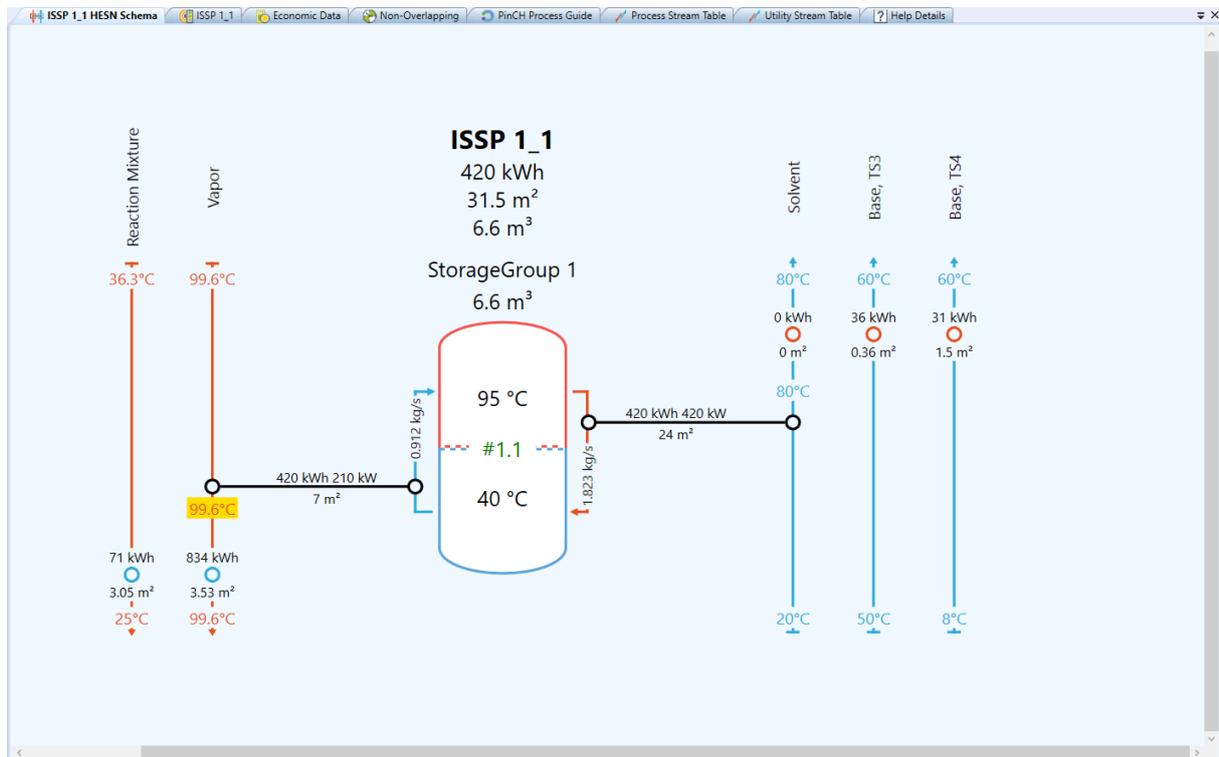


FIGURE 13 – HESN du procédé optimisé

IV Procédé optimisé

Dans le [Tutoriel 3](#), le diagramme d'écoulement de production de sel nutritif est représenté pour chaque Time Slice (TS). La Figure 14 illustre le diagramme d'écoulement résultant après transposition du HESN. Les flux de procédé couverts par la RC indirecte sont colorés. Le flux chaud (Vapor) n'existe pas en même temps que le flux froid (Solvent).

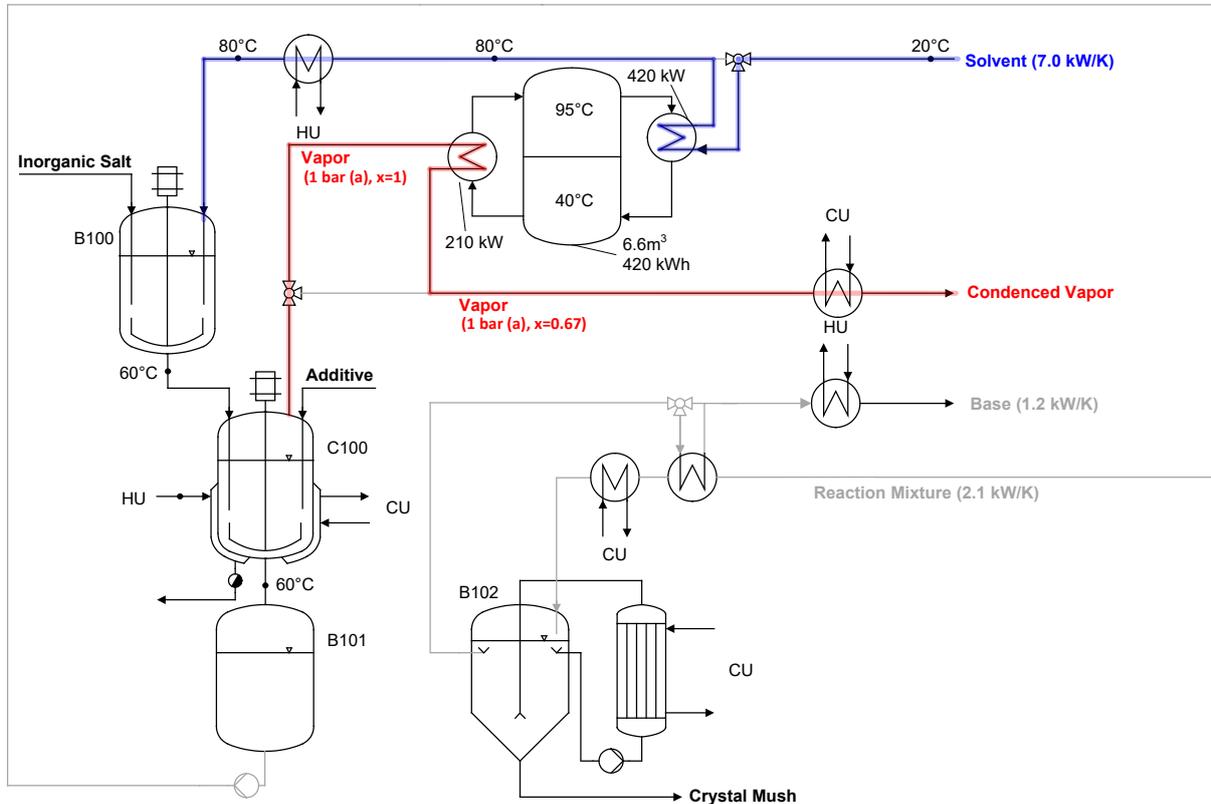


FIGURE 14 – Diagramme d'écoulement de l'installation de production de sel nutritif avec stockage de chaleur intégré

Les utilités nécessaires peuvent être réduites en intégrant le stockage. Le système de stockage installé entraîne des coûts d'investissement de 79'000 €. Ceux-ci étant amortis sur cinq ans, les annuités s'élèvent à 18'700 €. Les coûts et les besoins en énergie du procédé optimisé sont présentés au Tableau 2. Il apparaît que les coûts d'exploitation peuvent être réduits de 64 % grâce aux RC directe et indirecte. Les coûts totaux annuels diminuent donc de 22 % pendant des cinq premières années. Après cinq ans, l'investissement est amorti et les coûts totaux correspondent aux coûts d'exploitation. Ces mesures permettent d'économiser 235'000 € sur une période de dix ans.

TABLE 2 – Comparaison de l'installation existante avec l'installation optimisée sans et avec RC indirecte.

	HU	CU	Operating costs	Annual inv. costs	Annual total costs
	[MWh/a]	[MWh/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]
Situation de départ	367	850	54'858	0	54'858
RC directe	291	774	46'459	4'333	50'792
RC directe et indirecte	50	532	19'849	23'059	42'908
Economie	318	318	35'009	-23'059	11'950

Merci pour votre temps !

Vous connaissez maintenant les étapes les plus élémentaires de l'utilisation de PinCH pour analyser un procédé batch avec stockage d'énergie thermique. 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. 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

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



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. 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.