

## EXEMPLE D'APPLICATION PROSIMPLUS

# PROCÉDE PRICO : LIQUEFACTION DE GAZ NATUREL

### INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple présente la simulation du procédé PRICO de liquéfaction de gaz naturel avec cycle de réfrigération.  
Ce procédé est analysé avec la méthode du pincement thermique et une analyse exergetique.

<b>DIFFUSION</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Libre Internet</b>	<input type="checkbox"/> <b>Réservée clients</b>	<input type="checkbox"/> <b>Restreinte</b>	<input type="checkbox"/> <b>Confidentielle</b>
------------------	---	--	--	--

<b>FICHIER PROSIMPLUS CORRESPONDANT</b>	<i>PSPS_EX_FR-Procédé-PRICO-liquefaction-gaz-naturel.pmp3</i>
---	---

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

### Energy

#### Fives ProSim

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

Tél. : +33 (0)5 62 88 24 30

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

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

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. MODELISATION DU PROCEDE</b>	<b>3</b>
1.1. Présentation du procédé	3
1.2. Schéma de simulation	4
1.3. Constituants	5
1.4. Modèle thermodynamique	6
1.5. Conditions opératoires	7
1.6. Initialisations	11
1.7. « Trucs et astuces »	12
<b>2. RESULTATS</b>	<b>13</b>
2.1. Performance du procédé	13
2.2. Echangeur multi-fluides	13
2.3. Analyse pincement	15
2.3.1. Rappels	15
2.3.2. Résultats	18
2.4. Analyse exergétique	20
2.4.1. Rappels	20
2.4.2. Résultats	21
2.5. Analyse de sensibilité	23
<b>3. BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>24</b>

# 1. MODELISATION DU PROCEDE

## 1.1. Présentation du procédé

Cet exemple présente un procédé de liquéfaction de gaz naturel. Cette opération demande une grande quantité d'énergie car le gaz est refroidi à environ  $-160^{\circ}\text{C}$ . Le procédé PRICO est l'un des procédés les plus simples pour la liquéfaction de gaz naturel. Il est composé d'un seul cycle de réfrigération. Cet exemple est inspiré du cas d'étude développé dans la thèse de D. Marmolejo Correa [MAR13].

Le procédé PRICO opère avec un mélange de réfrigérants composé d'azote, de méthane, d'éthane, de propane, de n-butane et d'isopentane. Le réfrigérant est comprimé, puis partiellement condensé avant d'être condensé et sous-refroidi à  $-162^{\circ}\text{C}$ . Le fluide est ensuite détendu et réchauffé dans ce même échangeur multi-fluide permettant également de liquéfier le gaz naturel à environ  $-160^{\circ}\text{C}$ . Le mélange est envoyé vers une colonne flash où les hydrocarbures liquides moins volatiles composent le GNL (Gaz Naturel Liquéfié). Le gaz non condensé est recyclé vers l'échangeur multi-fluide (cette dernière partie n'est pas simulée dans ce cas d'étude) [STE75].

Ce procédé mature a notamment été utilisé en Chine dans les stations de GNL d'écrêtement de pointe et dans les stations-services en ayant pour objectif de substituer les carburants, essence et diesel, par le gaz naturel liquéfié.

Une analyse pincement et une analyse exergetique sont présentées pour étudier ce procédé.

## 1.2. Schéma de simulation

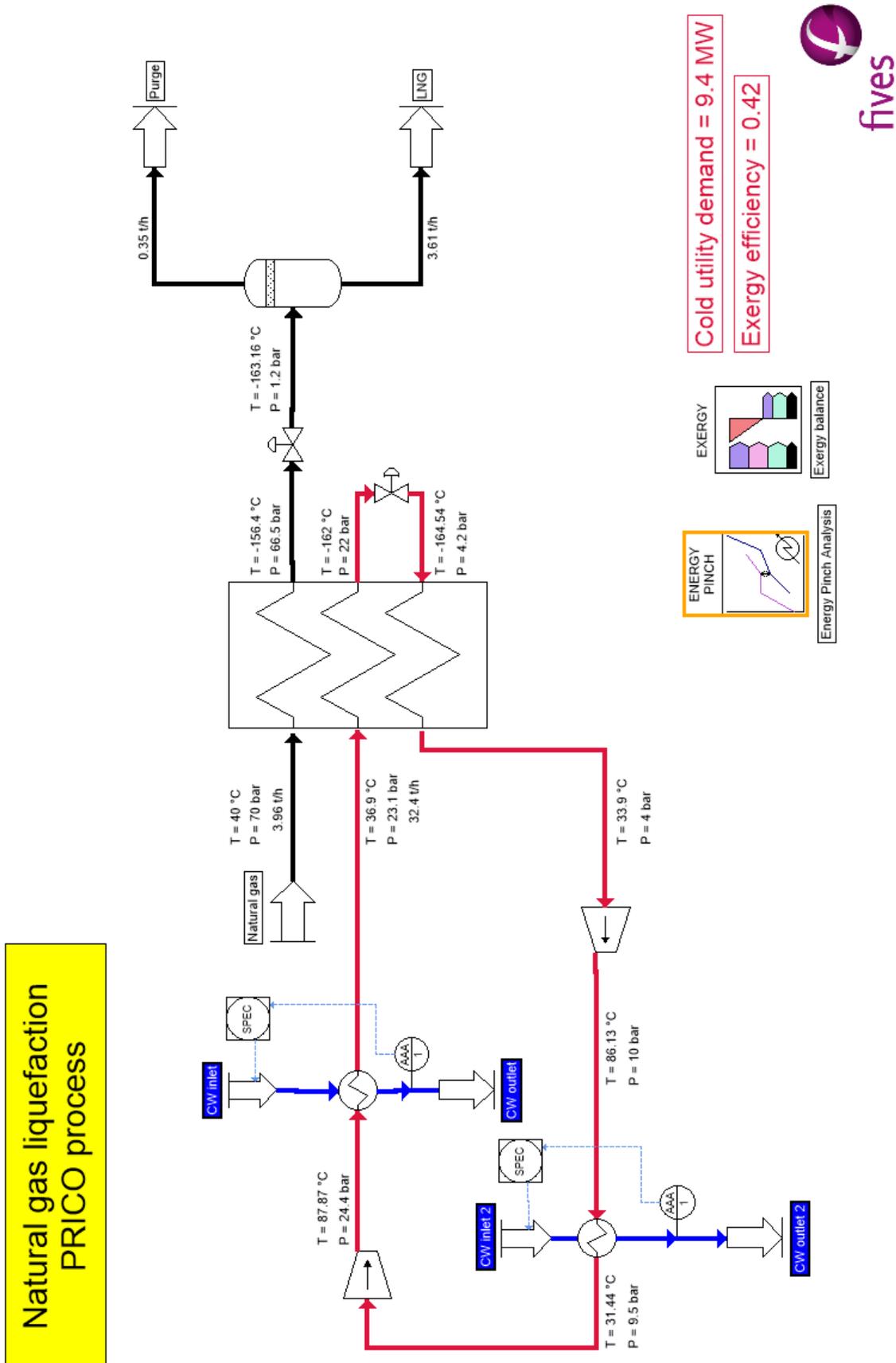


Schéma de simulation d'un procédé de liquéfaction de gaz naturel

### 1.3. Constituants

Les constituants pris en compte dans la simulation ainsi que leurs formules chimiques et leurs numéros CAS<sup>1</sup> sont présentés dans le tableau ci-après. Les propriétés de corps purs sont extraites de la base de données standard des logiciels ProSim [WIL21].

Constituant	Formule chimique	Numéro CAS <sup>(1)</sup>
Nitrogen	N <sub>2</sub>	7727-37-9
Methane	CH <sub>4</sub>	74-82-8
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	74-84-0
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	74-98-6
n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	106-97-8
Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	75-28-5
Isopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	78-78-4
Water	H <sub>2</sub> O	7732-18-5

---

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

## 1.4. **Modèle thermodynamique**

Deux « calculators » thermodynamiques sont définis dans cette simulation :

- « PSRK » : ce calculator est utilisé pour l'ensemble du flowsheet, excepté pour les courants de refroidissement d'eau pure. Le profil thermodynamique retenu est PSRK.
- « Water » : ce calculator est utilisé pour les courants de refroidissement d'eau pure. Le modèle thermodynamique est le modèle spécifique « Eau pure ».

## 1.5. Conditions opératoires

✓ Alimentations

Nom :	CW inlet	CW inlet 2	Natural gas
	Fractions massiques	Fractions massiques	Fractions molaires
Nitrogen	0	0	0.04
Methane	0	0	0.875
Ethane	0	0	0.055
Propane	0	0	0.021
n-Butane	0	0	0.005
Isobutane	0	0	0.003
Isopentane	0	0	0.001
Water	1	1	0
Débit massique (t/h)	189	26	3.96
Température (°C)	15	15	40
Pression (bar)	1.5	1.5	70

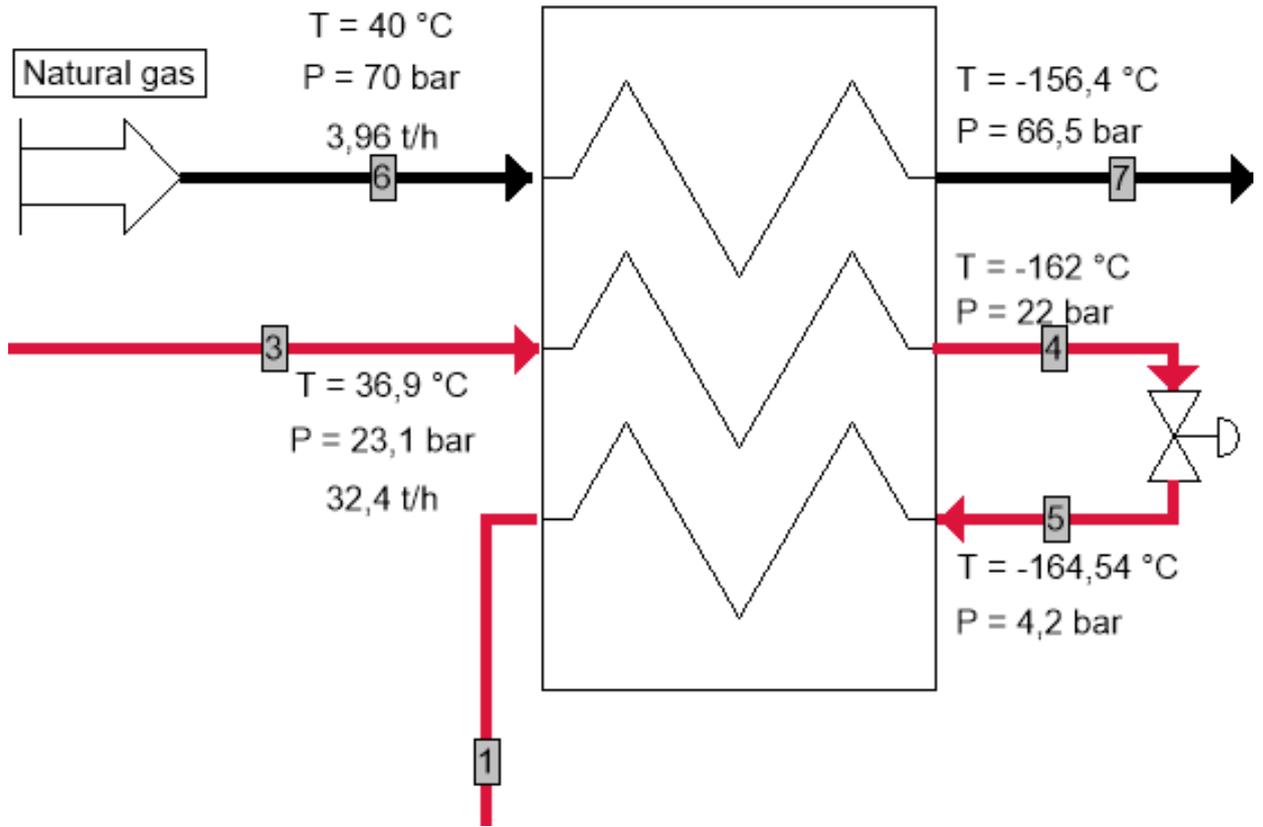
✓ Compresseurs

	K101	K 102
Spécification fournie	Pression	Pression
Pression de refoulement (bar)	10	24.4
Efficacité isentropique	0.805	0.8
Efficacité mécanique	0.97	0.97
Efficacité électrique	0.99	0.99

✓ Echangeurs de chaleur généralisés

	INTERC 101	COND 101
Type d'échangeur	Contre-courant ou multi-passes	Contre-courant ou multi-passes
Type de spécification	Taux de vaporisation molaire en sortie du courant chaud	Température de sortie du courant chaud
Spécification	1	36.9 °C

✓ MHX « E100 »



Indice	Courant entrant	Courant sortant	Type	Température (°C)	Perte de charge (bar)	Profil de pression
1	6	7	Température de sortie	-156.4	3.5	Constante Delta P/ Delta H
2	3	4	Température de sortie	-162	1.1	Constante Delta P/ Delta H
3	5	1	Température de sortie	33.9	0.2	Constante Delta P/ Delta H

✓ Vannes de détente

	VLV 101	VLV 201
Type de contrainte	Spécification de la pression	Spécification de la pression
Spécification pour la pression (bar)	4.2	1.2

- ✓ Séparateur diphasique liquide vapeur « V 201 »

<b>Type de flash</b>	Flash à pression et quantité de chaleur données
<b>Spécification pour la quantité de chaleur échangée</b>	Adiabatique
<b>Spécification pour la pression</b>	Pression la plus faible des alimentations

- ✓ Gestion des contraintes et des recyclages (« SPEC »). Les débits d'alimentation en utilité froide des échangeurs « COND101 » et « INTERC 101 » sont ajustés de façon à ce que la température de sortie des utilités soit de 25°C. Pour ce faire, des modules de type « Mesure » sont placés sur ces deux courants de sortie, renvoyant l'écart entre cette consigne et la valeur simulée, les modules « SPEC » ajustant automatiquement les débits des modules d'alimentation respectifs pour satisfaire ces contraintes. Le paramétrage de ces modules est le suivant :

- ✓ Analyse pincement énergie « Energy pinch analysis »

<b>Pincement (<math>\Delta T_{min}</math>) (°C)</b>	10
---	----

Certains courants ne sont pas inclus dans l'analyse pincement (courants de sortie du procédé et les courants d'utilités froides entrant dans les deux échangeurs de refroidissement « INTERC 101 » et « COND 101 ») :

Nom du courant	De	Vers
9	V 201	LNG
10	V 201	Purge
11	CW Inlet	COND 101
12a	COND 101	Measurement
12b	Measurement	CW outlet
13	CW inlet 2	INTERC 101
14a	INTERC 101	Measurement 1
14b	Measurement 1	CW outlet 2

- ✓ Bilans exergetiques « Exergy balance »

Toutes les opérations unitaires sont prises en compte pour l'analyse exergetique du procédé. Les paramètres par défaut sont utilisés pour configurer le module.

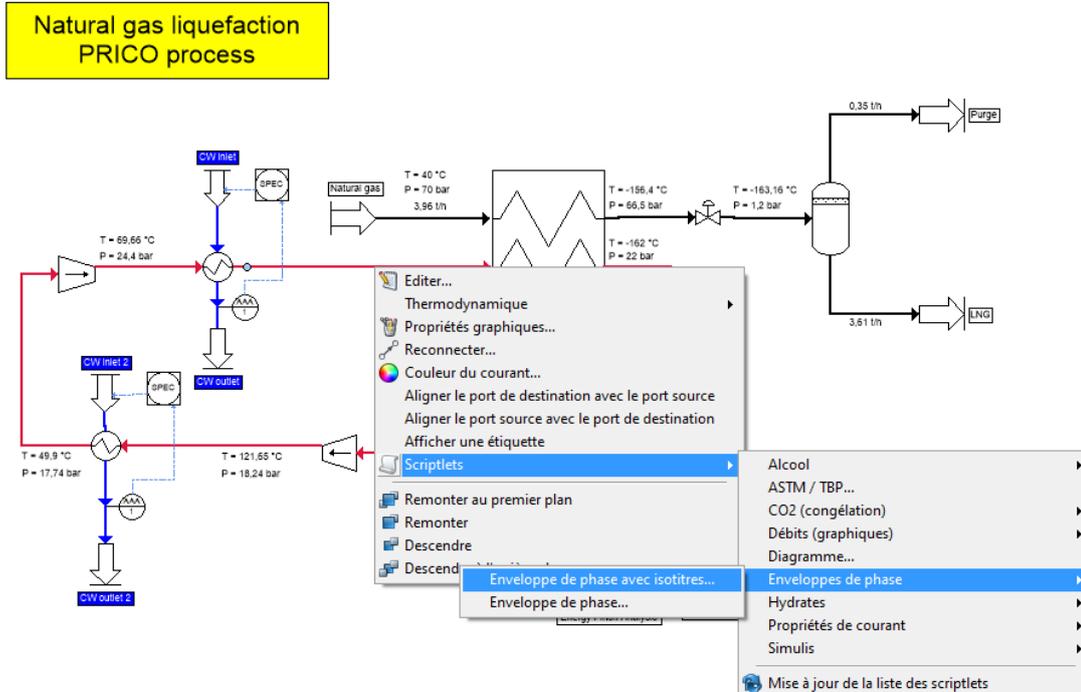
## 1.6. Initialisations

La séquence de calcul est automatiquement déterminée par ProSimPlus. Deux courants coupés sont détectés : le courant « 1 » (sortie du MHX « E100 » et entrée du compresseur « K 101 ») et le courant « 4 » (sortie du MHX « E100 » et entrée de la vanne « VLV 101 »). Ces courants étant les courants du cycle de réfrigération, il est nécessaire de renseigner leurs caractéristiques en termes de compositions et débits. Les valeurs suivantes sont utilisées :

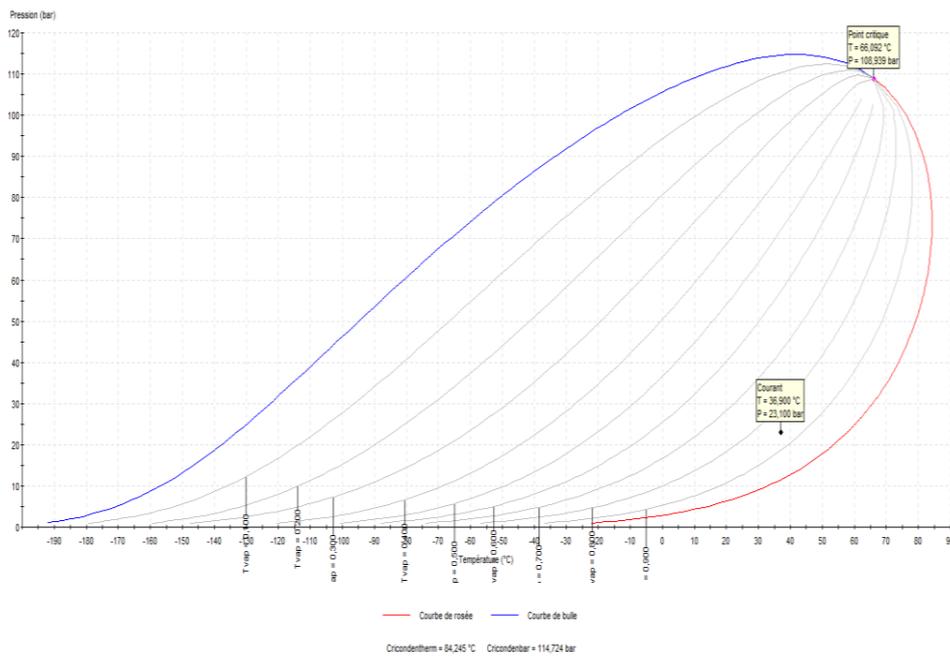
Courant	1	4
<b>Fractions molaires</b>		
Nitrogen	0.117	0.117
Methane	0.284	0.284
Ethane	0.307	0.307
Propane	0.14	0.14
n-Butane	0.057	0.057
Isobutane	0	0
Isopentane	0.095	0.095
Water	0	0
Débit massique (t/h)	32.4	32.4
Température (°C)	33.9	-162.0
Pression (bar)	4	22

### 1.7. « Trucs et astuces »

Le scriptlet « Enveloppe de phase » permet de tracer le diagramme de phase d'un courant :



Enveloppe de phase du courant : 3



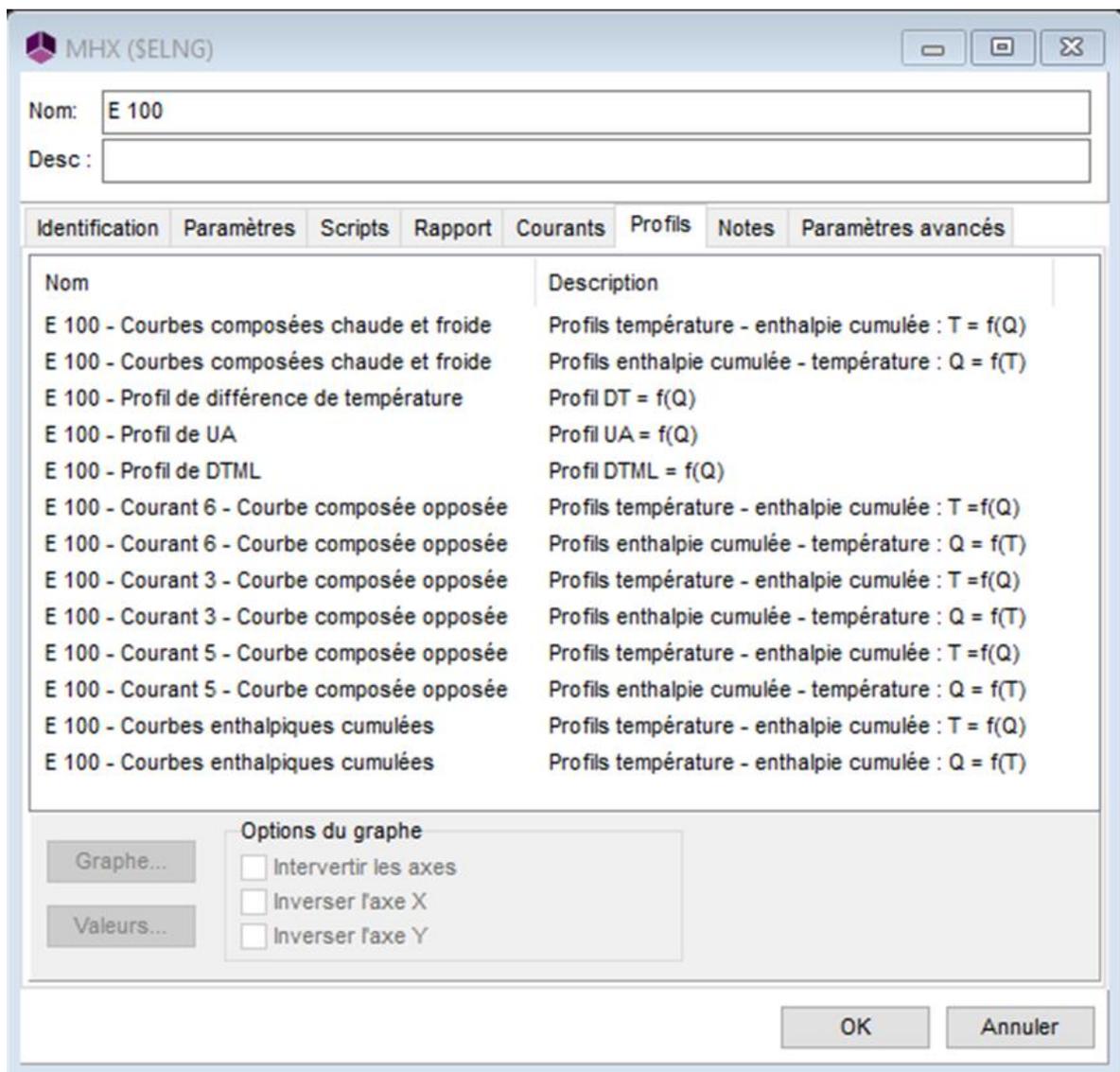
## 2. RESULTATS

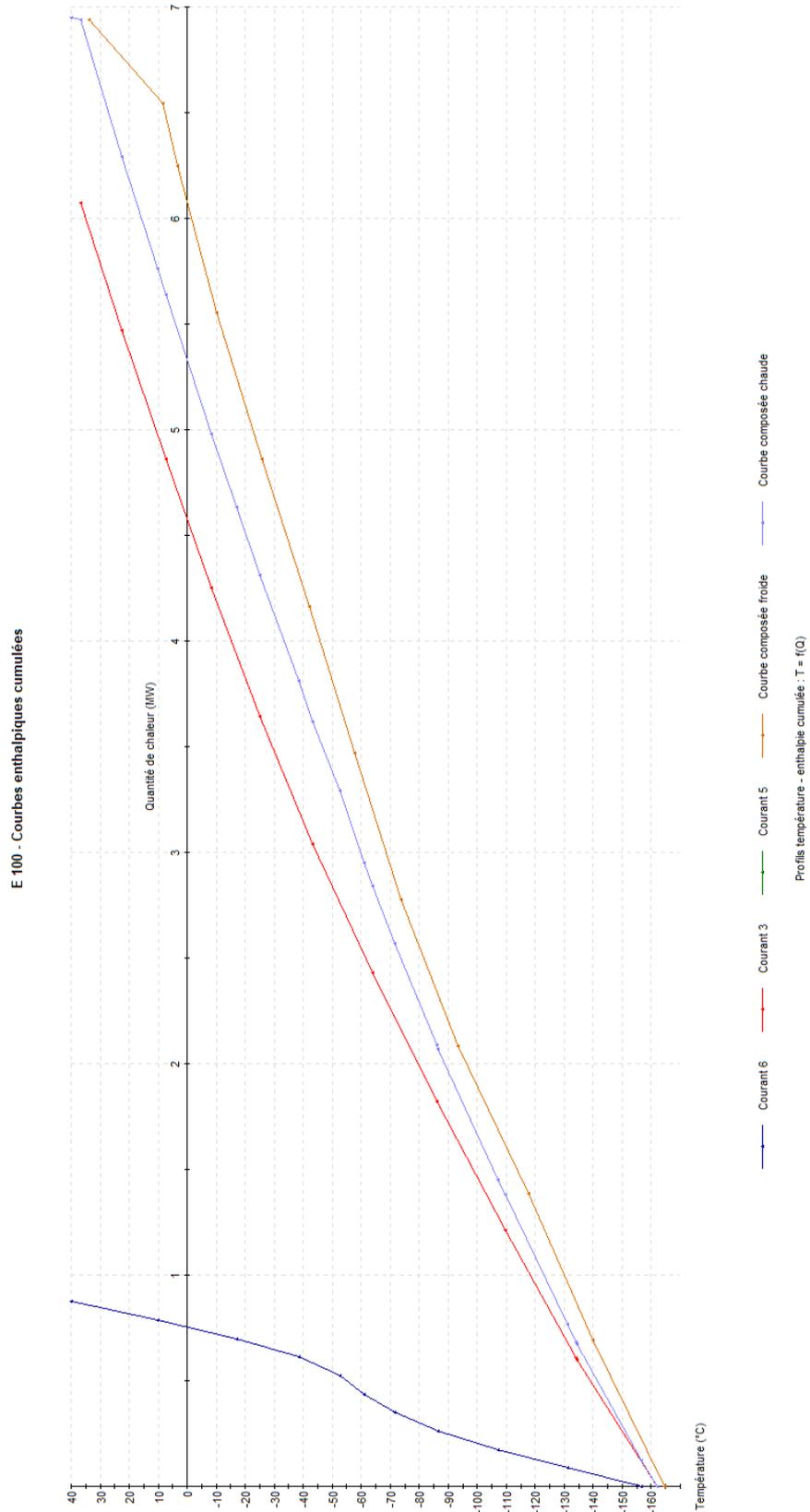
### 2.1. Performance du procédé

Débit de gaz entrant (t/h)	3.96
Débit de gaz liquéfié sortant (t/h)	3.61
Taux de récupération du gaz (%)	91
Température du gaz liquéfié en sortie (°C)	-163.16

### 2.2. Echangeur multi-fluides

Les profils de l'échangeur multi-fluides sont obtenus après la convergence de la simulation dans la fenêtre de configuration du module « MHX », dans l'onglet « Profils » :





Les courbes composées froides et chaudes sont construites à partir des courbes des courants froids et chauds. Le principe de construction des courbes composées et de calcul de l'échangeur multi-fluides sont fondés sur la méthode du pincement (cf.2.3).

## 2.3. Analyse pincement

### 2.3.1. Rappels

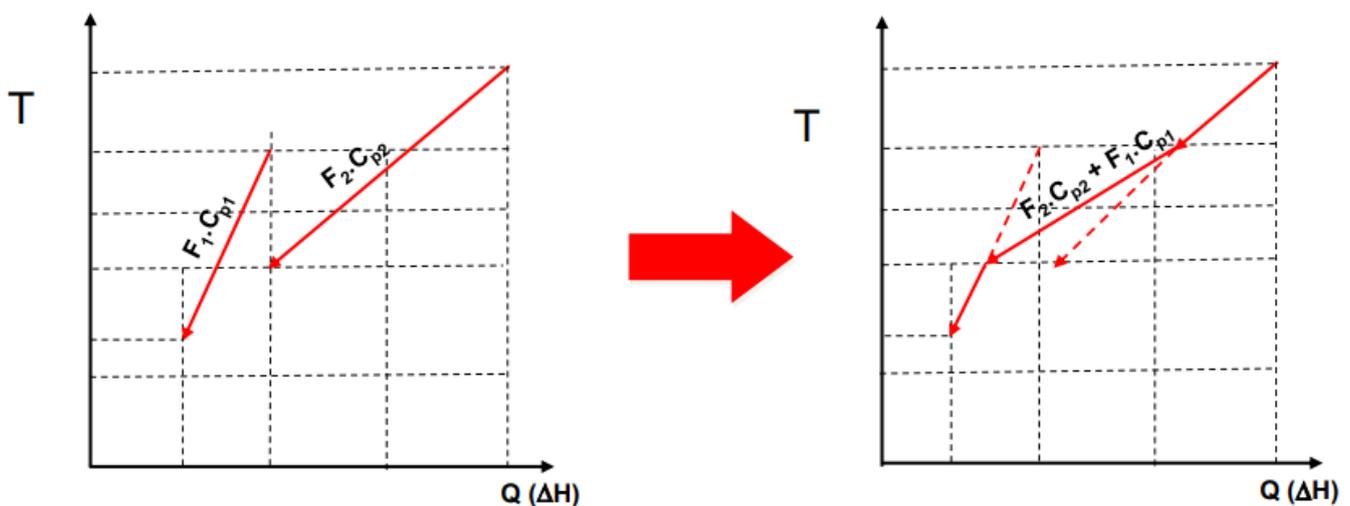
L'analyse pincement, ou analyse Pinch, est une méthode rigoureuse et structurée permettant d'optimiser les dépenses énergétiques d'un procédé.

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

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

La première étape de la méthode du pincement est de construire les courbes composées (aussi appelées courbes composites). Pour construire ces courbes, il faut connaître les valeurs des débits des courants  $F$ , leur capacité calorifique  $C_p$ , et les températures d'entrée et de sortie ( $\Delta T$ ) pour chaque chauffe et refroidissement du procédé. Les courbes composées représentent le profil des sources de chaleur disponibles ("courbe composite chaude") et le profil des besoins thermiques du procédé ("courbe composite froide"). Selon leur forme et leur emplacement, ces courbes renseignent sur les possibilités de récupération de chaleur au sein du procédé.

La figure suivante montre la construction de la courbe composée chaude sur un diagramme Température-Quantité de chaleur échangée. La courbe composite chaude est construite tout simplement en ajoutant, pour chaque intervalle de température, les changements de charge thermique de chacun des courants pris individuellement.



La construction est fondée sur la relation :

$$Q = FC_p \Delta T$$

Avec :

$Q$  : Quantité de chaleur échangée (W)

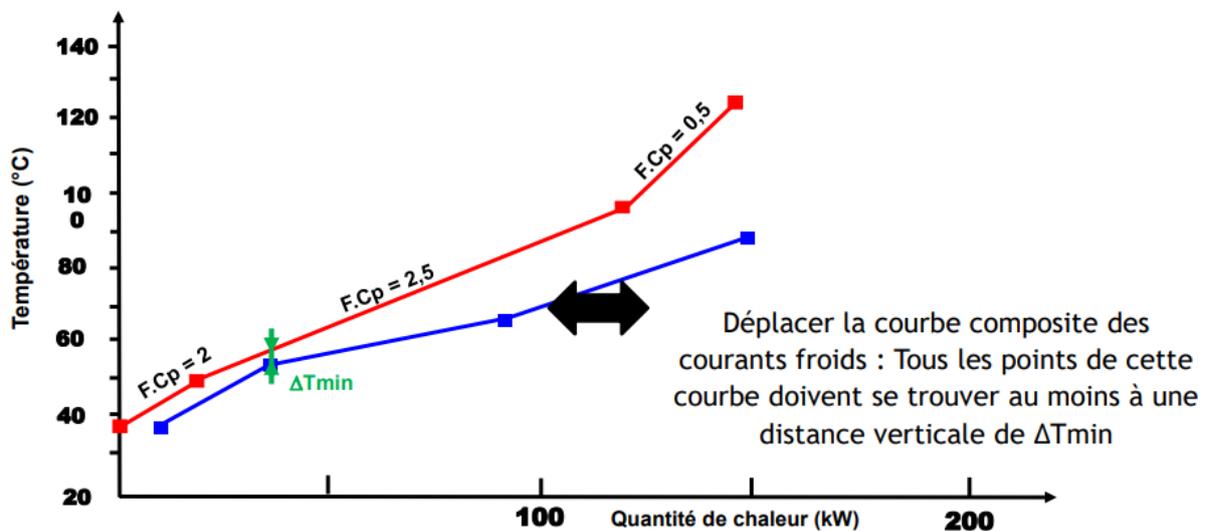
$F$  : Débit massique du courant chauffé ou refroidi (kg/s)

$C_p$  : Chaleur spécifique du courant (J/kg/°C)

$\Delta T$  : Ecart de température entre l'entrée et la sortie de la chauffe ou du refroidissement (°C)

La courbe composée froide est obtenue de la même façon.

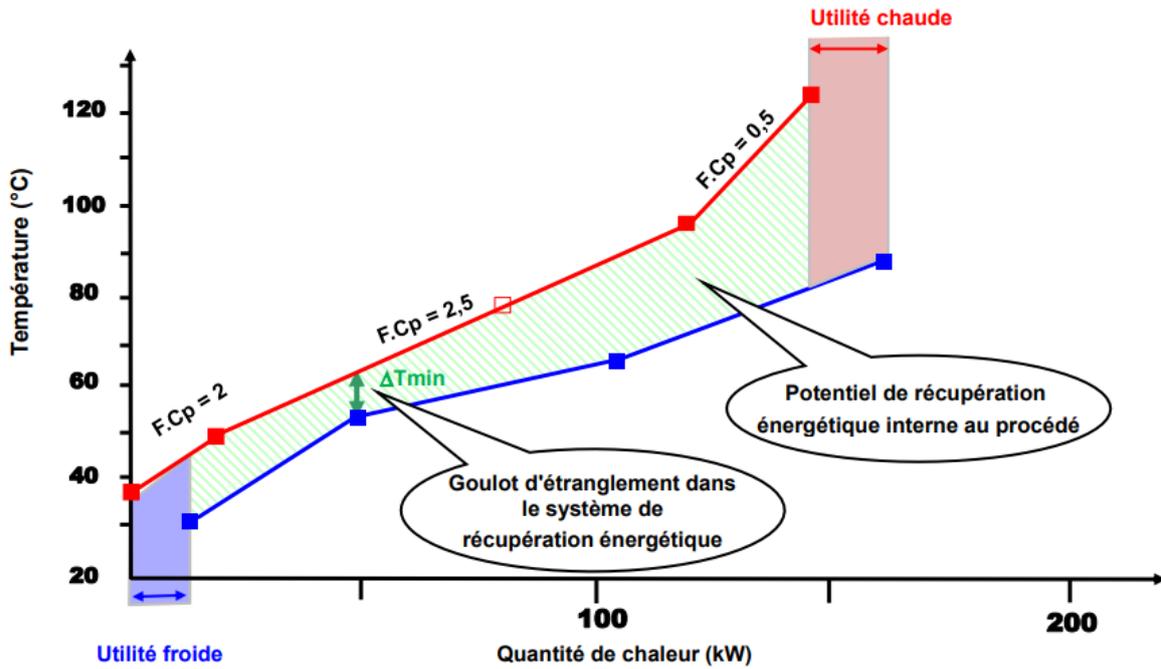
Pour établir la cible de consommation minimale d'énergie du procédé étudié, la courbe composite froide est positionnée sur le même diagramme que celui de la courbe composite chaude.



Les 2 courbes sont translatées horizontalement jusqu'à obtenir un écart entre les 2 courbes. La courbe composée chaude doit être au-dessus de la courbe composée froide (pour que l'un échange de chaleur soit possible). L'écart le plus faible entre les deux courbes (lieu où elles sont le plus rapprochées) représente la différence de température  $\Delta T_{min}$  aussi appelé le pincement. Cette valeur indique la différence de température minimale qui est acceptable entre les deux fluides dans un échangeur de chaleur. Ce pincement varie en fonction des procédés et des technologies d'échangeurs utilisés sur chaque procédé (de 10 à 20 °C pour la pétrochimie, de 3 à 5 °C pour la cryogénie...).

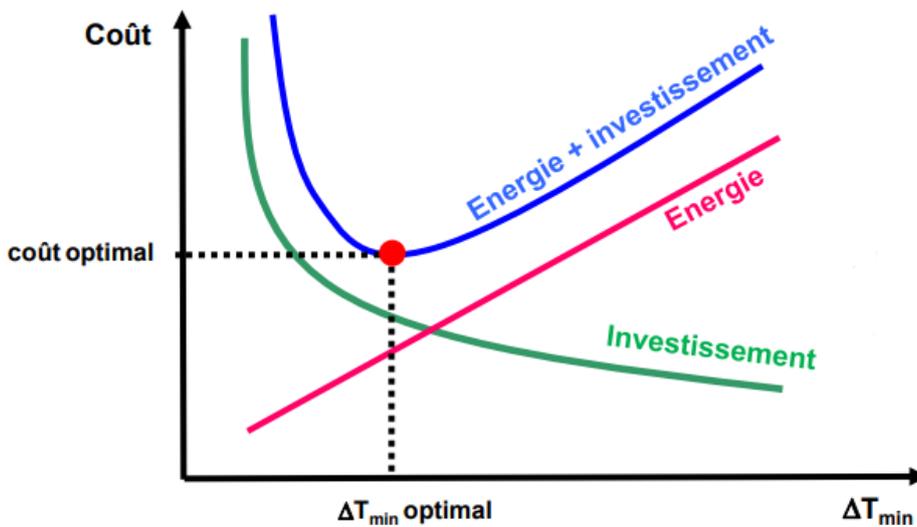
La zone de recouvrement des deux courbes représente le Maximum d'Énergie Récupérable (MER). Les zones à l'extérieur de la zone de recouvrement représentent les quantités d'énergie devant être apportées par les utilités.

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

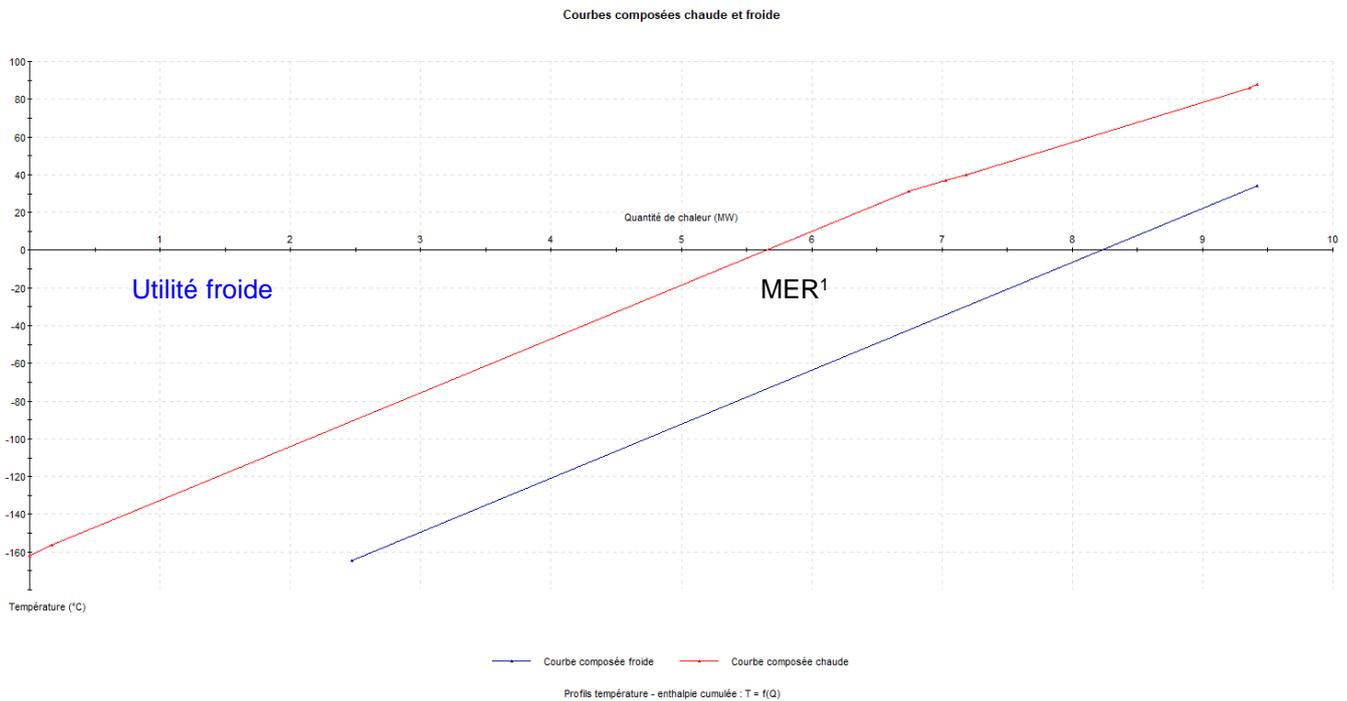


Lorsque les deux courbes composées s'éloignent, le pincement augmente, et donc les écarts de température entre les courants chauds et les courants froids augmentent. Il devient alors possible de réduire les surfaces d'échange de des échangeurs pour la récupération du MER et donc de réduire le coût des échangeurs de chaleur (investissement). A l'inverse, plus le pincement est important et moins le MER (zone de recouvrement) est importante. Le procédé consomme alors plus d'utilités chaude et froide et le coût en énergie augmente.

La figure suivante montre qu'il existe une valeur optimale du pincement, qui minimise le coût total, en prenant en compte les dépenses liées aux installations et celles liées à l'énergie [CAN03].



### 2.3.2. Résultats



<sup>1</sup> MER : Maximum d'Énergie Récupérable

Les courbes composées chaudes et froides tracées ci-dessus permettent d'identifier les récupérations énergétiques pertinentes grâce à la méthode du pincement (cf. 2.3.1). La zone de recouvrement entre les deux courbes (zone en vert) indique la quantité d'énergie qu'il va être possible d'économiser en privilégiant les récupérations énergétiques internes en associant de la manière la plus judicieuse possible les courants « sources d'énergie » (courants chauds) avec les courants « puits d'énergie » (courants froids). A gauche, l'écart entre les deux courbes montre la quantité d'énergie minimale en utilité froide nécessaire pour le procédé si 100% du MER est récupéré par un réseau d'échangeurs efficient. Il est également possible de remarquer l'absence d'utilité chaude pour ce procédé (cf. 2.3.1).

<b>Quantité d'énergie échangée dans le module « MHX » (MW)</b>	6.95
<b>Quantité d'énergie échangée dans l'échangeur « INTERC 101 » (MW)</b>	0.93
<b>Quantité d'énergie échangée dans l'échangeur « COND 101 » (MW)</b>	1.53
<b>Quantité d'énergie totale extraite par les utilités froides (MW)</b>	2,46

En comparant les valeurs lues sur les courbes composées et les quantités d'énergies échangées dans chaque module, il apparaît que toute la quantité d'énergie récupérable (Maximum d'Energie Récupérable, MER) est récupérée par l'échangeur multi-fluides MHX. Le besoin minimum en utilité froide correspond quant à lui aux quantités de chaleur échangées dans les deux échangeurs de refroidissement.

En cochant la case « Impression des potentiels d'intégration » dans les options avancées du module, il est possible de connaître la quantité d'énergie venant des utilités froide et chaude pour le procédé simulé. Ici, 2,47 MW sont actuellement fournis par les utilités froides, 100% de l'énergie pouvant être économisée théoriquement l'est donc en pratique, puisqu'elle est égale à la quantité d'utilité minimale.

	QUANTITE D'UTILITE (MW)			TAUX DE SATISFACTION (%)
	MINIMALE	ACTUELLE	MAXIMALE	
UTILITE FROIDE	2.47416	2.47416	9.41577	73.723
UTILITE CHAUDE	0.00000	0.00000	6.94161	100.000

Quantité maximale de chaleur récupérable	=	6.94161	(MW)
Température de pincement	=	59.2641	(°C)
Taux d'intégration réel	=	100.000	(%)
Indicateur du potentiel d'intégration n°1	=	84.874	(%)
Indicateur du potentiel d'intégration n°2	=	73.723	(%)

*Remarque : le pincement de 10°C spécifié par l'utilisateur n'est pas atteignable pour cette simulation. En effet, la translation de la courbe composée froide en dessous de la courbe composée chaude pour atteindre un pincement de 10°C créerait 2 niveaux d'utilités froides de part et d'autre du MER. De ce fait, la translation de la courbe composée froide sous la courbe composée chaude est au maximum possible jusqu'à rendre nulle la demande en utilité chaude (un seul besoin en utilité froide situé à gauche du MER sur le graphique des courbes composées chaude et froide).*

## 2.4. Analyse exergétique

### 2.4.1. Rappels

L'exergie est le maximum théorique de travail récupérable lorsqu'un système est amené, depuis son état initial à l'état d'équilibre thermodynamique dans un environnement de référence (à une température  $T^{00}$  de 25 °C et une pression  $P^{00}$  de 1 atm). De façon plus intuitive, l'exergie représente la qualité d'une énergie. Par exemple, 1 kWh d'électricité n'est pas équivalent à 1 kWh de chaleur et 1 kWh de chaleur à 100°C n'est pas équivalent à 1 kWh de chaleur à 40°C car les potentiels d'utilisation et de valorisation ne sont pas les mêmes.

L'exergie d'un flux de matière est notée  $B$  (J/mol) et s'exprime ainsi :

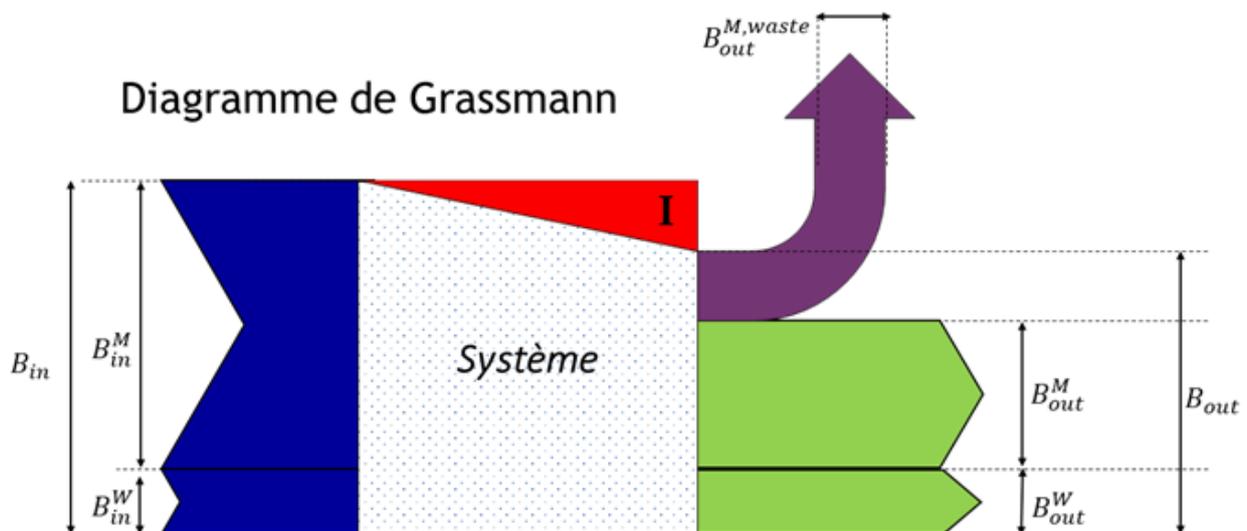
$$B = H - T^{00}S$$

Avec :

$H$  : Enthalpie (J/mol)

$S$  : Entropie (J/mol/°C)

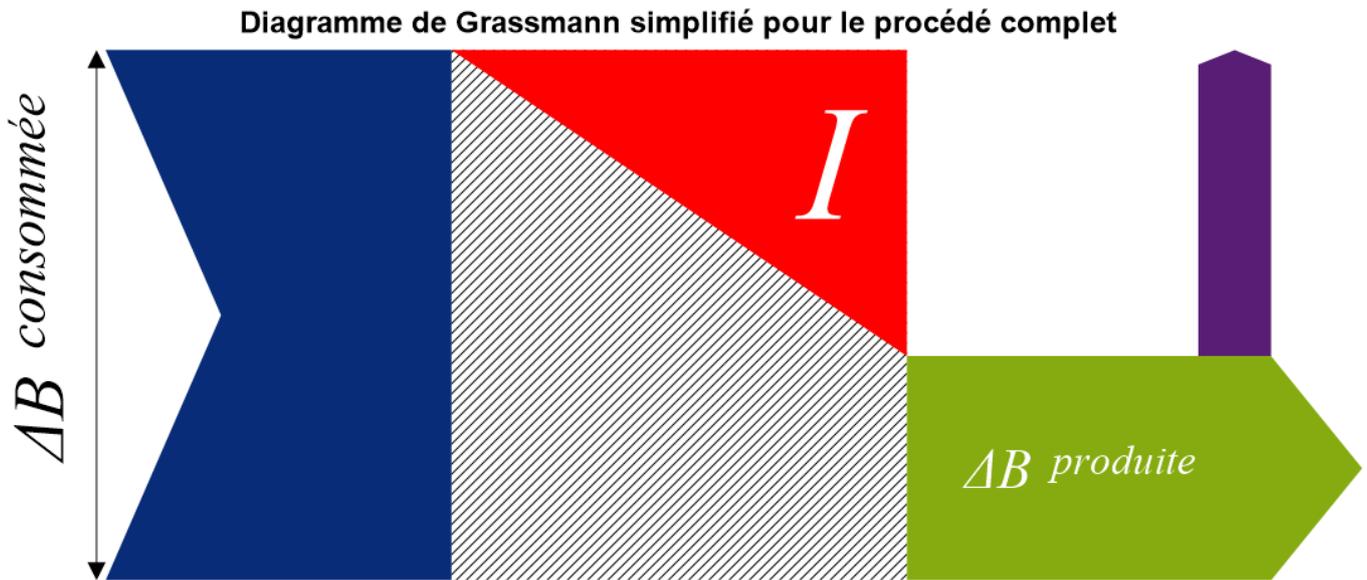
Selon le 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique, l'énergie d'un système fermé se conserve durant une transformation et l'entropie d'un système ne fait qu'augmenter lors des transformations thermodynamiques selon le 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique. Contrairement à un bilan d'énergie, le bilan exergétique n'est donc pas conservatif. L'exergie entrant dans un système est égale à la somme de l'exergie sortant et de l'irréversibilité créée. L'exergie ne fait que diminuer lors de transformations réelles thermodynamiques. Le bilan exergétique est généralement représenté à l'aide d'un diagramme de Grassmann :



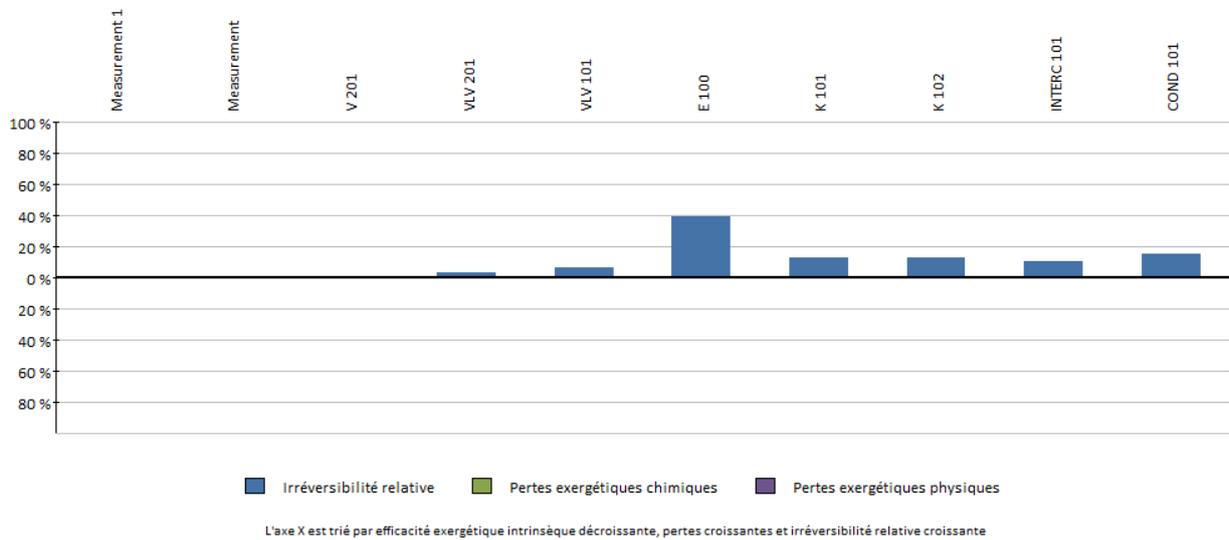
L'exergie ne peut donc que diminuer au cours d'une transformation réelle non réversible. L'exergie perdue représente l'irréversibilité du procédé : moins il y a d'irréversibilité créée, plus l'efficacité exergétique est grande et plus le procédé est proche de l'« idéalité ». L'analyse exergétique permet donc de réaliser un diagnostic énergétique du procédé en cartographiant les irréversibilités thermodynamiques d'un système [GOU15].

### 2.4.2. Résultats

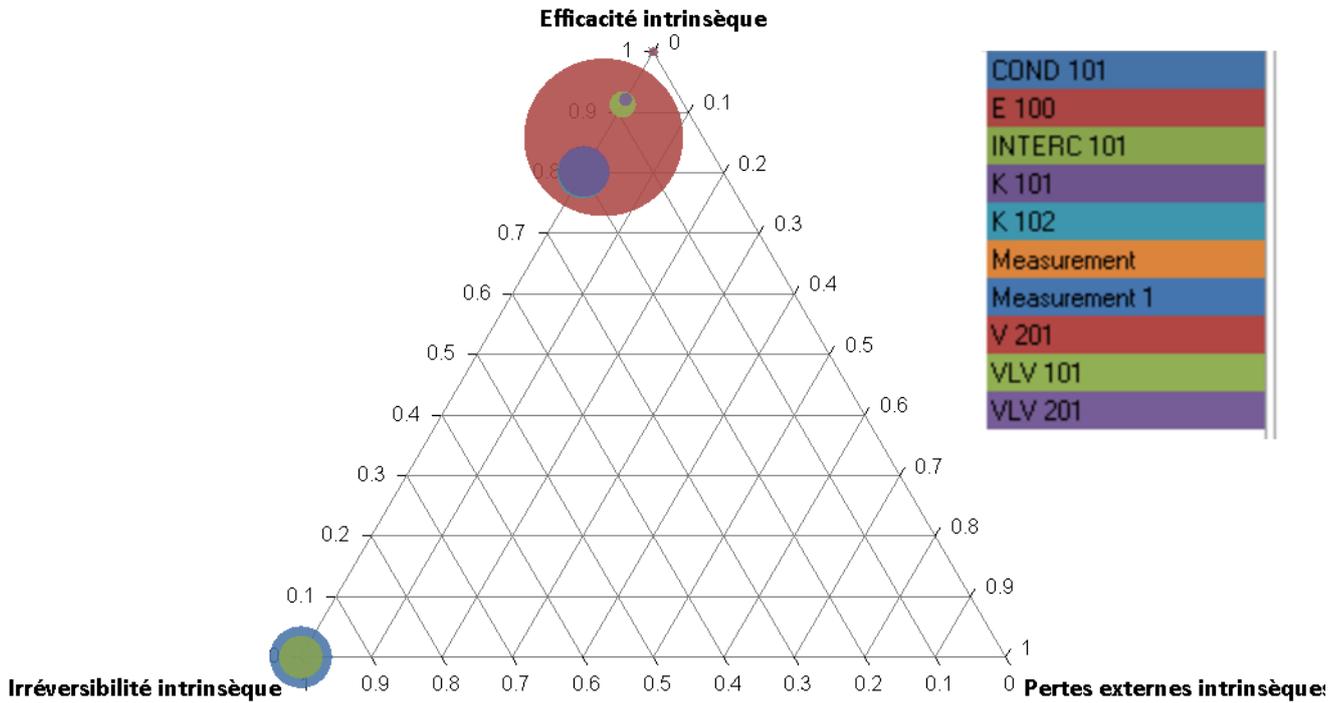
Le bilan exergetique de ce procédé est représenté à l'aide du diagramme de Grassmann suivant :



Le graphique suivant permet de visualiser les irréversibilités des différentes opérations unitaires du procédé :



Le diagramme ternaire ci-après permet de visualiser les indicateurs de performance des opérations unitaires :



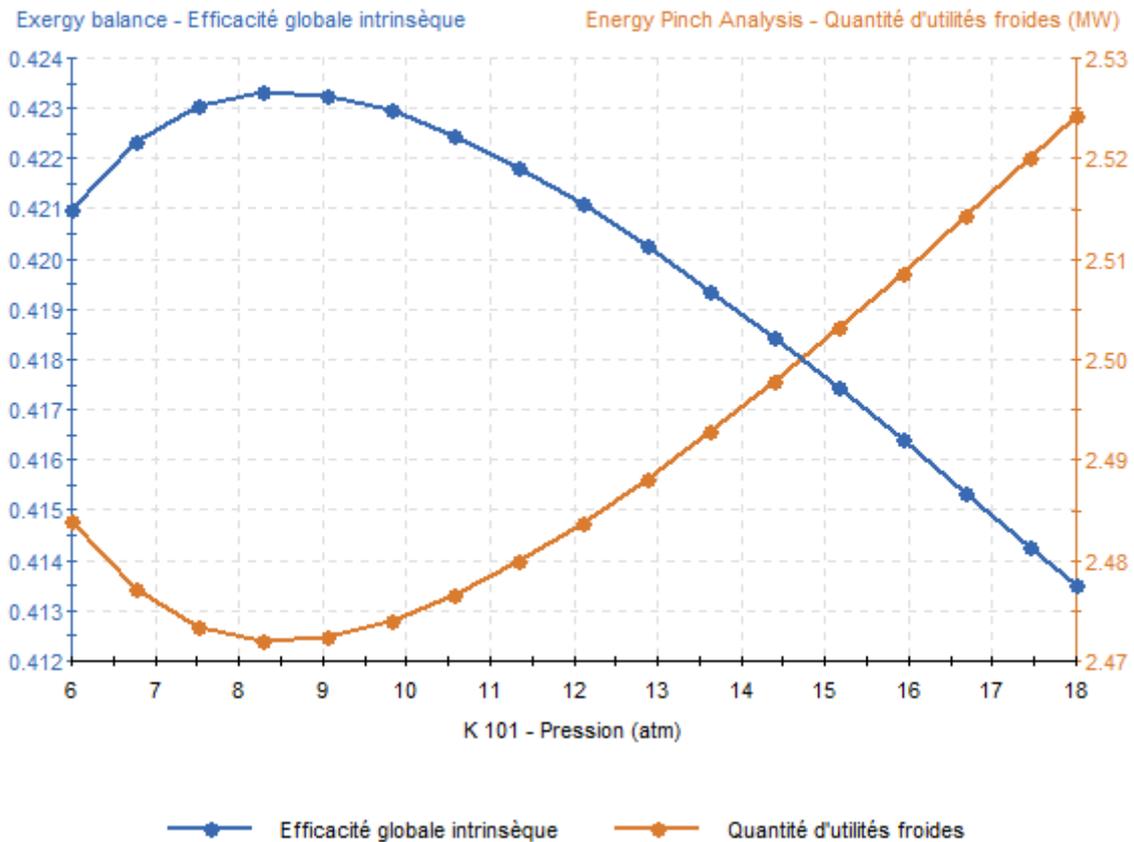
Il est à noter que les graphiques présentés dans ce paragraphe font partie des résultats générés automatiquement par le module de bilans éxergétiques (accessibles dans l'onglet « Résultats des bilans » du module).

## 2.5. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour observer l'impact du changement de pression en sortie du premier étage de compression du réfrigérant (K101). Les paramètres suivis sont l'efficacité exergétique du module d'analyse exergétique et la quantité d'utilité froide du module d'analyse pincement. Pour ces deux paramètres suivis, une pression de 8,25 atm semble optimale pour le compresseur K 101. Cette valeur minimise la quantité d'utilité froide nécessaire, et maximise l'efficacité exergétique du procédé. L'analyse de sensibilité est configurée comme ci-dessous et les résultats « Efficacité globale intrinsèque » (du module de bilan exergétique) et « Quantité d'utilité froide » (du module analyse pincement énergie) sont suivis :

Opération unitaire :	K 101 (Compresseur)		
Paramètre :	Pression		
Valeur initiale :	<input type="text" value="6"/>	Pas :	<input type="text" value="0,75"/>
Valeur finale :	<input type="text" value="18"/>	Nombre de points :	<input type="text" value="17"/>
Unité :	atm		

**Exergy balance - Efficacité globale intrinsèque**  
**Energy Pinch Analysis - Quantité d'utilités froides (MW)**



### 3. BIBLIOGRAPHIE

- [CAN03] Ressources naturelles Canada  
"L'analyse Pinch : pour l'utilisation efficace de l'énergie, de l'eau, de l'hydrogène" (2003)
- [GOU15] S. Gourmelon  
"Méthodologie d'analyse et de rétro-conception pour l'amélioration énergétique des procédés industriels"  
PhD Thesis (2015)
- [MAR13] D. Marmolejo Correa  
"Analysis and Design of Low Temperature Processes with Focus on LNG: Developing new Thermodynamics based Tools and introducing Exergy in Design Methodologies"  
PhD Thesis (2013)
- [STE75] R. Stebbing, J. O'Brien  
"An updated report on the PRICO (TM) process for LNG plants"  
GASTECH, LNG, Natural Gas, LPG international conference, Paris (1975)
- [WIL21] D. Wilding, W. V. Knotts, T. A., Giles, N. F., Rowley, R. L.  
DIPPR Data Compilation of Pure Chemical Properties  
Design Institute for Physical Properties, AIChE: New York, NY (2021)