

EXEMPLE D'APPLICATION PROSIMPLUS

CYCLES DE REFRIGERATION AU CO₂

INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple traite de procédés de machine frigorifique au CO₂ transcritique. Deux cycles, cycle mono-étagé et cycle bi-étagé, sont présentés dans cet exemple. Les cycles transcritiques permettent de produire du froid jusqu'à une température inférieure à 0°C.

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

FICHIER PROSIMPLUS CORRESPONDANT	<p><i>PSPS_EX_FR-Cycles-de-refrigeration-au-CO2-cycle-simple.pmp3</i></p> <p><i>PSPS_EX_FR-Cycles-de-refrigeration-au-CO2-cycle-bi-etage.pmp3</i></p>
---	---

Il est rappelé au lecteur que ce cas d'utilisation est un exemple et ne doit pas être utilisé à d'autres fins. Bien que cet exemple soit basé sur un cas réel il ne doit pas être considéré comme un modèle de ce type de procédé et les données utilisées ne sont pas toujours les plus exactes disponibles. 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 / www.fives-prosim.com

TABLE DES MATIÈRES

1.	MODELISATION DU PROCEDE	3
1.1.	Présentation du procédé	3
1.2.	Schémas de simulation	4
1.2.1	Cycle simple	4
1.2.2	Cycle bi-étagé.....	4
1.3.	Constituants.....	5
1.4.	Modèle thermodynamique.....	5
1.5.	Conditions opératoires.....	6
1.5.1	Cycle simple	6
1.5.2	Cycle bi-étagé.....	9
1.6.	Initialisations	12
1.7.	« Trucs et astuces »	13
2.	RESULTATS.....	15
2.1.	Performance du procédé	15
2.2.	Cycles thermodynamiques	16
3.	BIBLIOGRAPHIE.....	17

1. MODELISATION DU PROCEDE

1.1. Présentation du procédé

Cet exemple présente les simulations de cycles de machines frigorifiques fonctionnant au CO₂ transcritique. Une machine frigorifique permet, grâce à un apport énergétique, d'extraire de la chaleur et de produire du froid aux milieux à refroidir. Le fluide frigorigène extrait de la chaleur de la source froide Q_F et fournit de la chaleur à la source chaude Q_C en recevant du travail (W).

Parmi les fluides frigorigènes, le dioxyde de carbone (CO₂) est un réfrigérant prometteur et suscite beaucoup d'intérêt dans les domaines industriel et scientifique. Le CO₂ (R744) est un fluide très intéressant pour un cycle froid : il est disponible naturellement dans l'environnement, son impact est faible sur l'environnement (couche d'ozone (ODP), potentiel effet de serre (GWP)), il a une faible densité, il est non corrosif, ininflammable, non toxique, non explosif et peut être miscible aux huiles des compresseurs. En raison de ses propriétés thermodynamiques, en particulier de sa température critique basse (31°C), pour l'application en réfrigération, le CO₂ doit être mis en œuvre dans un cycle transcritique. Cela implique un fonctionnement en régime supercritique où la condensation par refroidissement n'est plus possible.

Dans cet exemple, deux cycles transcritiques sont présentés : le cycle simple (mono-étagé) et le cycle bi-étagé. Les schémas de simulation du paragraphe 1.2 permettent d'illustrer les flowsheets des deux cycles.

Le premier cycle transcritique comprend les équipements suivants : un compresseur, un refroidisseur de gaz (appelé *gas cooler* en anglais), un détendeur et un évaporateur. Le cycle bi-étagé comprend un compresseur et un évaporateur supplémentaires fonctionnant à une pression inférieure à la pression critique (subcritique). Cependant, il existe une multitude de configurations pour les cycles bi-étagés.

Le cycle simple présenté dans cet exemple permet de refroidir à la température $\approx 0^\circ\text{C}$ ($\approx 31.5^\circ\text{F}$) et il a un COP de 2,7. Le cycle bi-étagé est quant à lui capable de produire du froid à des températures $\approx 0^\circ\text{C}$ ($\approx 31.5^\circ\text{F}$) et -21°C ($\approx -7^\circ\text{F}$) et possède un COP de 1,9.

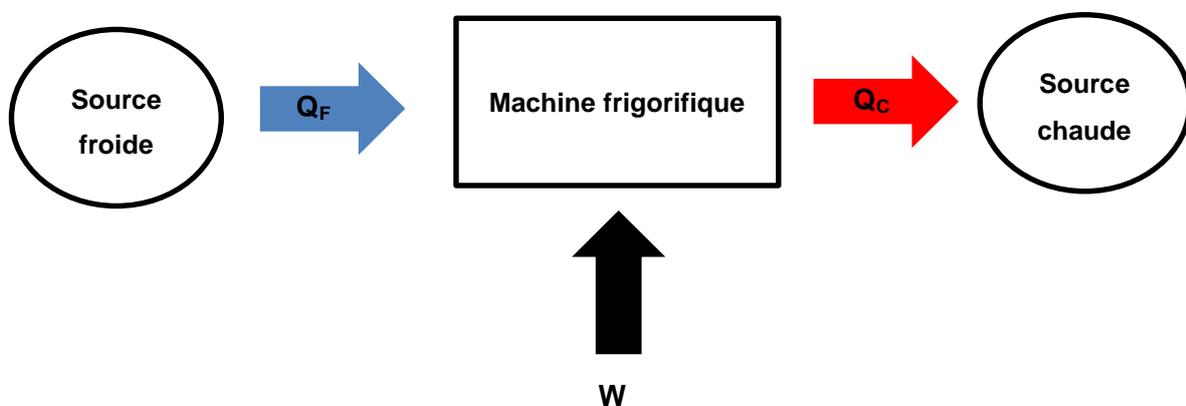
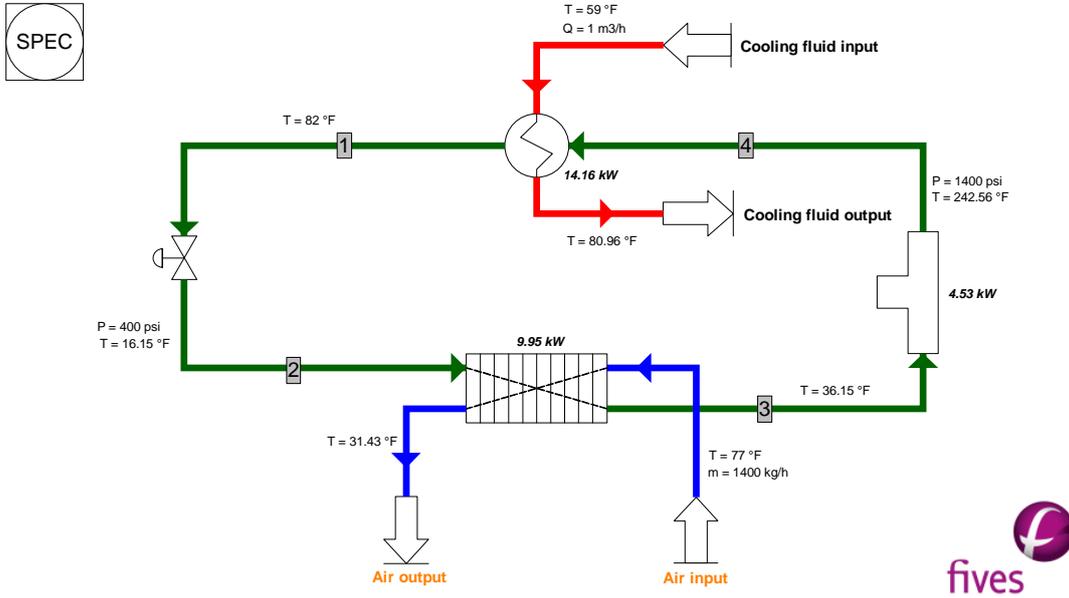


Schéma énergétique d'une machine frigorifique

1.2. Schémas de simulation

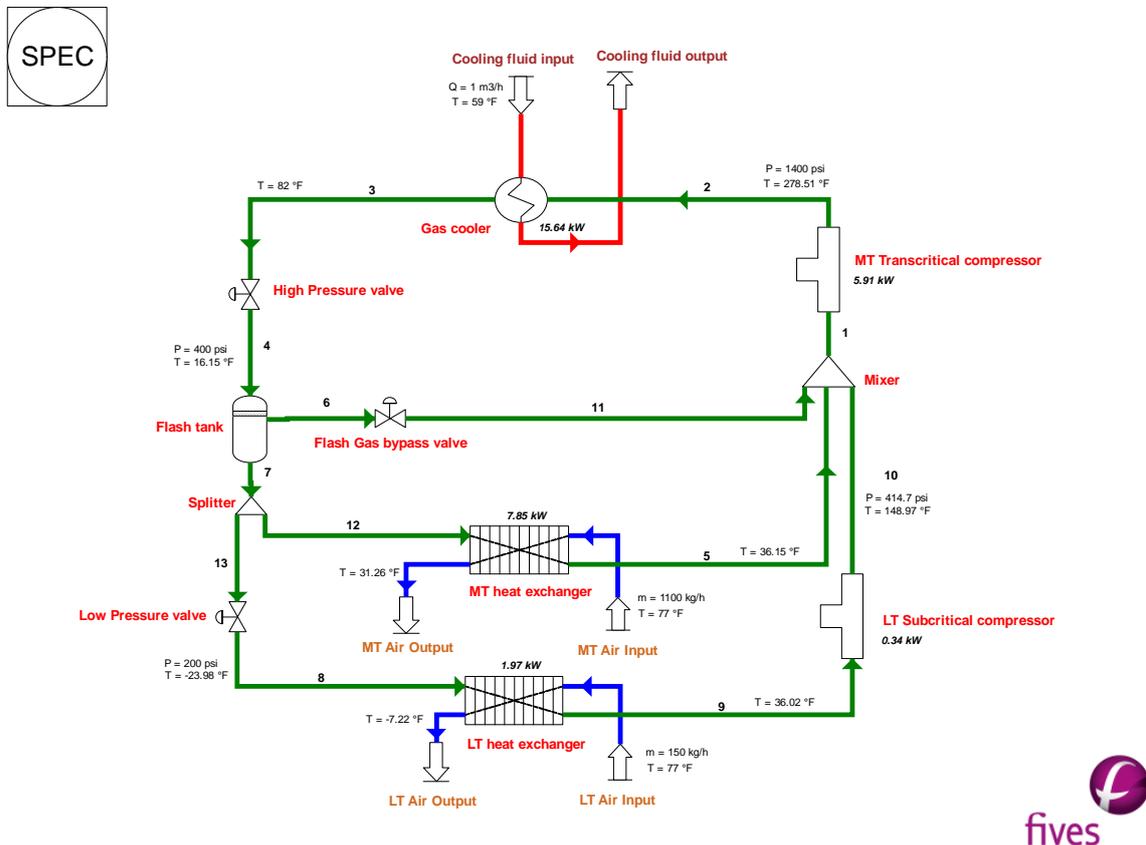
1.2.1 Cycle simple

Ce flowsheet est présenté dans : "PSPS_EX_FR-Cycles-de-refrigeration-au-CO2-cycle-simple.pmp3".



1.2.2 Cycle bi-étagé

Ce flowsheet est présenté dans : "PSPS_EX_FR-Cycles-de-refrigeration-au-CO2-cycle-bi-etage.pmp3".



1.3. Constituants

Les constituants pris en compte dans la simulation ainsi que leurs formules chimiques et leurs numéros CAS^(*) sont présentés dans le tableau ci-après. Les propriétés de corps purs sont extraites de la base de données standard des logiciels ProSim [WIL19].

Constituant	Formule chimique	Numéro CAS
Water	H ₂ O	7732-18-5
Carbon dioxide	CO ₂	124-38-9
Oxygen	O ₂	7782-44-7
Nitrogen	N ₂	7727-37-9

1.4. Modèle thermodynamique

Trois « calculator » thermodynamiques sont définis pour simuler les deux exemples de « Réfrigération au CO₂ transcritique » simple et bi-étagé :

- « Refrigerant » : ce calculator est uniquement composé du constituant « dioxyde de carbone ». Compte tenu de la nature de ce constituant, le modèle thermodynamique utilisé pour la représentation des équilibres entre phases et les calculs d'enthalpies est l'équation d'état cubique de Soave Redlich et Kwong (SRK) [SOA72].
- « Water » : ce calculator ne contient que le constituant eau. Il utilise donc le modèle spécifique eau pure.
- « Air » : ce calculator contient les constituants « oxygen » et « nitrogen ». Le modèle thermodynamique utilisé est le profil « idéal ».

Les modèles thermodynamiques utilisés sont documentés dans la notice thermodynamique accessible depuis la fenêtre de définition d'un calculator.

()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*

1.5. Conditions opératoires

1.5.1 Cycle simple

Les conditions opératoires des différents modules dans le cycle simple sont les suivantes :

- ✓ Alimentations du procédé

Nom	Cooling fluid input	Air input
Débit volumique total (m ³ /h)	1	-
Débit massique total (kg/h)	-	1400
Fractions molaires :		
Dioxyde de carbone	0	0
Eau	1	0
Oxygène	0	0,21
Azote	0	0,79
Température (°F)	59 (15°C)	77 (25°C)
Pression (psi)	14,7 (1 atm)	14,7 (1 atm)

- ✓ Compresseur alternatif « Reciprocating compressor »

Type du compresseur	Isentropique
Pression de refoulement (psi)	1400
Efficacité isentropique	0,8
Efficacité mécanique	0,95
Efficacité électrique	0,98
Contrainte	Etat physique vapeur imposé

- ✓ Vanne de détente « Thermostatic expander »

Type de contrainte	Spécification de la pression
Pression (psi)	400

✓ Echangeur de chaleur généralisé « Condenser »

Type d'échangeur	Contre-courant ou multi-passes
Type de spécification : « Courant chaud »	Température de sortie
Température (°F)	82 (28°C)

Spécification complémentaire sur le condenseur :

Spécification	Calcul de l'aire d'échange
Coefficient d'échange global propre (W/m ² /K)	330
Efficacité	Contre-courant pur

✓ Echangeur à plaques « Evaporator »

Type d'échangeur	Contre-courant ou multi-passes
Type de spécification : « Courant froid »	Surchauffé au-dessus de sa température de rosée
Différence de température (°F)	20

Spécification complémentaire sur l'évaporateur:

Spécification	Calcul de l'aire d'échange
Coefficient d'échange pour zones diphasique (W/m²/K) :	
Liquide : liquide	500
Liquide-vapeur : liquide	1000
Vapeur : liquide	250
Liquide : liquide-vapeur	1000
Liquide-vapeur : liquide-vapeur	1500
Vapeur : liquide-vapeur	500
Liquide : vapeur	250
Liquide-vapeur : vapeur	1000
Vapeur : vapeur	100
Efficacité	Contre-courant pur

✓ Gestion des contraintes et des recyclages (SPEC)

Le module Gestion des contraintes et des recyclages est nécessaire car le CO₂ est alimenté en boucle. Le paramétrage de ce module est le suivant :

The screenshot shows the 'Gestion des contraintes et des recyclages (SPEC)' software interface. The window title is 'Gestion des contraintes et des recyclages (SPEC)'. It has a 'Nom:' field with 'Constraints and Recycles 1' and an empty 'Desc:' field. Below are tabs for 'Identification', 'Paramètres', 'Scripts', 'Rapport', 'Courants', 'Notes', and 'Paramètres avancés'. The 'Paramètres' tab is active. On the left, there is a 'Module actif' checkbox (checked), 'Méthodes numériques' set to 'Défaut', a 'Relaxation' section with 'Facteur de relaxation initial' set to 1, and an 'Analyse de Sensibilité' section with two 'Incréments sur les variables...' fields set to 'à la différence entre 2 itération' and 'Facteur de proportionnalité' set to 0.1. On the right, there is a 'Test de Convergence' section with 'Critère' set to 1E-8, a 'Test d'Arrêt' section with 'Non évolution du critère' (1E-7), 'Non évolution des variables' (1E-6), 'Nombre maximal de passages dans le RCM' (100), and 'Nombre maximal d'itérations' (20). Below that is an 'Impression' section with 'Impression toutes les' set to 10 itérations. Then a 'Variables itératives des courants contrôlés' section with 'Enthalpies' checked and 'Pressions' unchecked. A 'Relance' section with 'Exploitation des valeurs obtenues à convergence du précédent problème' unchecked. At the bottom right, there are 'Contraintes' and 'Courants coupés' sections, each with a 'Paramètres...' button. At the very bottom are 'OK' and 'Annuler' buttons.

Le cycle de réfrigération est composé d'un corps pur (CO₂) qui change d'état physique dans les échangeurs du cycle. Dans ces conditions, il est plus pertinent de définir comme variable itérative des courants coupés l'enthalpie plutôt que la température.

1.5.2 Cycle bi-étagé

Les conditions opératoires des différents modules dans le cycle bi-étagé sont les suivantes :

- ✓ Alimentations du procédé

Nom	Cooling fluid input	MT Air Input	LT Air Input
Débit volumique total (m ³ /h)	1	-	-
Débit massique total (kg/h)	-	1100	150
Fractions molaires :			
Dioxyde de carbone	0	0	0
Eau	1	0	0
Oxygène	0	0,21	0,21
Azote	0	0,79	0,79
Température (°F)	59 (15°C)	77 (25°C)	77 (25°C)
Pression (psi)	14,7 (1 atm)	14,7 (1 atm)	14,7 (1 atm)

- ✓ Compresseur alternatif

Nom	MT Transcritical compressor
Type du compresseur	Isentropique
Pression de refoulement (psi)	1400
Efficacité isentropique	0,8
Efficacité mécanique	0,95
Efficacité électrique	0,98
Contrainte	Etat physique vapeur imposé

Nom	LT Transcritical compressor
Type du compresseur	Isentropique
Pression de refoulement (psig)	400
Efficacité isentropique	0,8
Efficacité mécanique	0,95
Efficacité électrique	0,98
Contrainte	Etat physique vapeur imposé

✓ Vanne de détente

Nom	Type de contrainte	Pression (psi)
High Pressure valve	Spécification de la pression	400
Low Pressure valve	Spécification de la pression	200
Flash Gas bypass valve	Spécification de la pression	300

✓ Echangeur de chaleur généralisé « Gas Cooler »

Type d'échangeur	Contre-courant ou multi-passes
Type de spécification : « Courant chaud »	Température de sortie
Température (°F)	82 (28°C)

Spécification complémentaire sur l'échangeur de chaleur :

Spécification	Calcul de l'aire d'échange
Coefficient d'échange global propre (W/m ² /K)	330
Efficacité	Contre-courant pur

✓ Echangeur à plaques

Nom	MT heat exchanger	LT heat exchanger
Type d'échangeur	Contre-courant ou multi-passes	Contre-courant ou multi-passes
Type de spécification : « Courant froid »	Surchauffé au-dessus de sa température de rosée	Surchauffé au-dessus de sa température de rosée
Différence de température (°F)	20	60

La spécification complémentaire sur le « Calcul de l'aire d'échange » dans les échangeurs à plaques est identique à celle de l'évaporateur dans le cycle simple.

✓ Séparateur diphasique liquide-vapeur « Flash tank »

Ce module est défini avec les valeurs par défaut comme montré ci-dessous :

Type de flash	Flash à pression et quantité de chaleur échangée données
Spécification pour la pression	Pression la plus faible des alimentations
Perte de charge (psi)	0
Spécification pour la quantité de chaleur échangée	Adiabatique

- ✓ Diviseur de courant « Splitter »

Courant	Taux de partage	Pression de sortie
12	0,81	Egale à la pression d'entrée

Remarque : le mélangeur « Mixer » est défini avec les valeurs par défaut (la pression de sortie est égale à la pression la plus faible des alimentations).

- ✓ Gestion des courants et des recyclages

Le paramétrage de ce module est le suivant :

Le cycle de réfrigération est composé d'un corps pur (CO₂) qui change d'état physique dans les échangeurs du cycle. Dans ces conditions, il est plus pertinent de définir comme variable itérative des courants coupés l'enthalpie plutôt que la température.

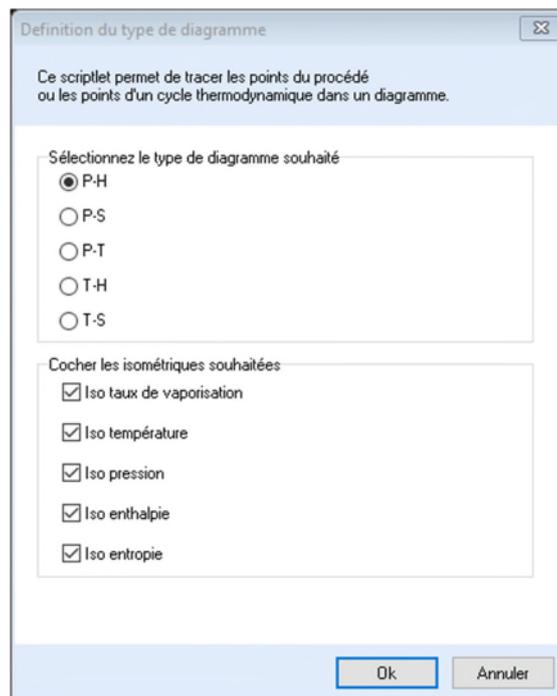
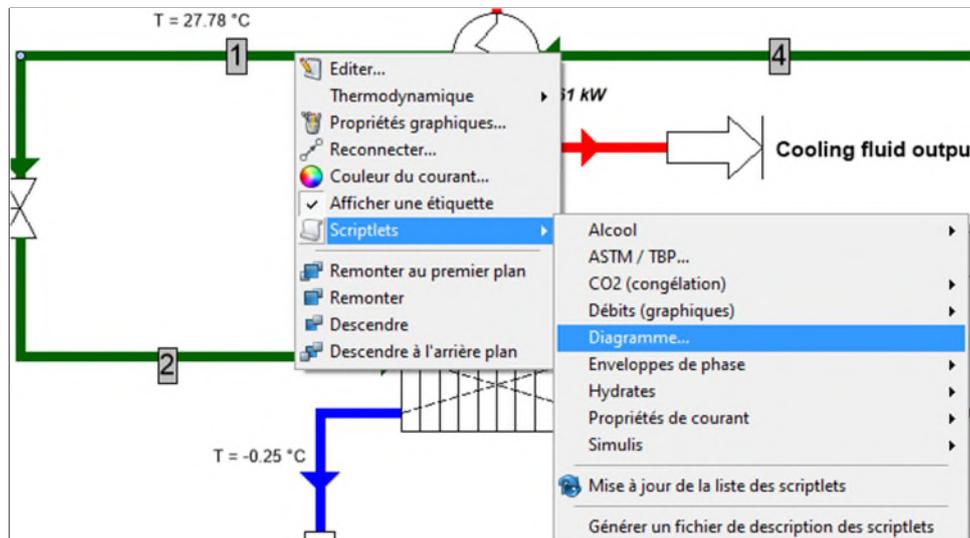
1.6. Initialisations

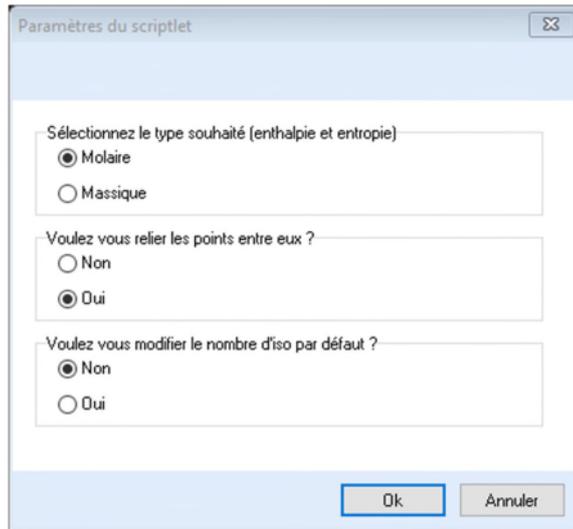
La séquence de calcul est automatiquement déterminée par ProSimPlus. Un seul courant coupé est détecté : le courant « 2 » (entrée de l'évaporateur) dans le cycle simple et le courant « 1 » (entrée du compresseur « MT Transcritical Compressor ») dans le cycle bi-étagé. Les initialisations suivantes sont utilisées :

	Cycle simple	Cycle bi-étagé
Courant	« 2 »	« 1 »
Fractions massiques :		
Dioxyde de carbone	1	1
Eau	0	0
Oxygène	0	0
Azote	0	0
Débit massique total (kg/h)	200	200
Température (°F)	77 (25°C)	77 (25°C)
Pression (psi)	400 (27,2 atm)	14,7 (1 atm)

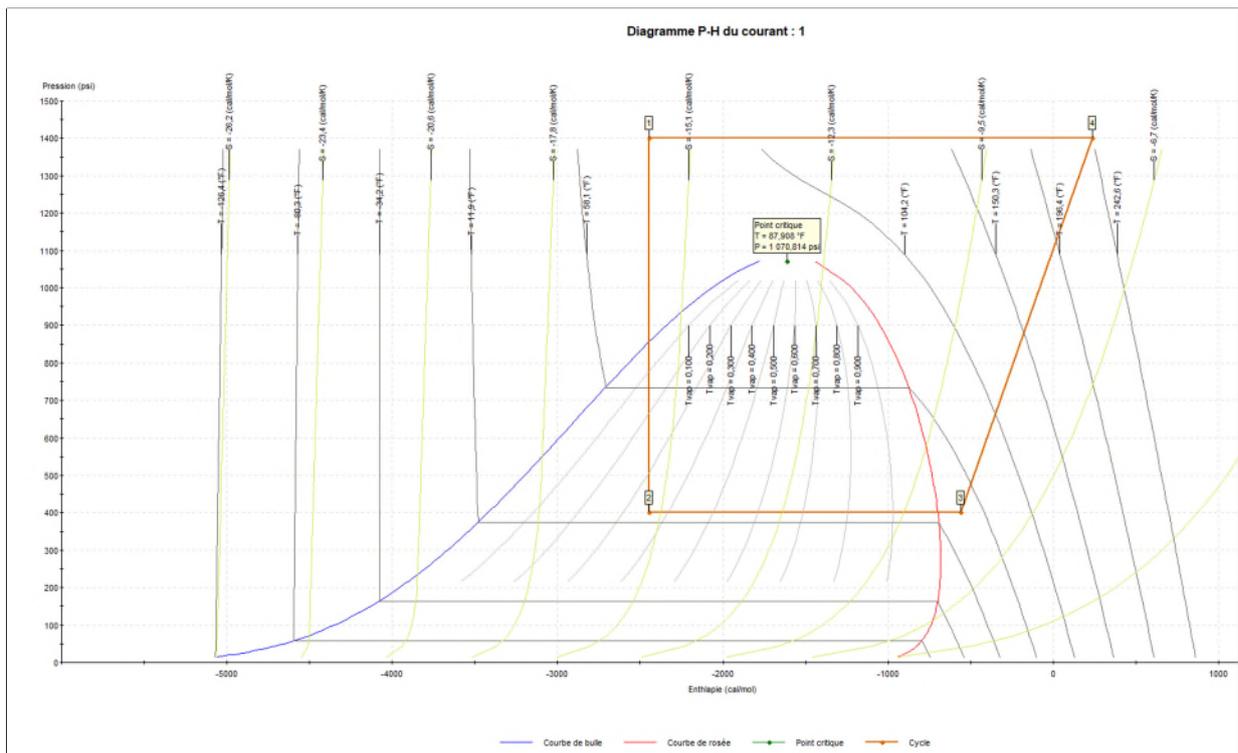
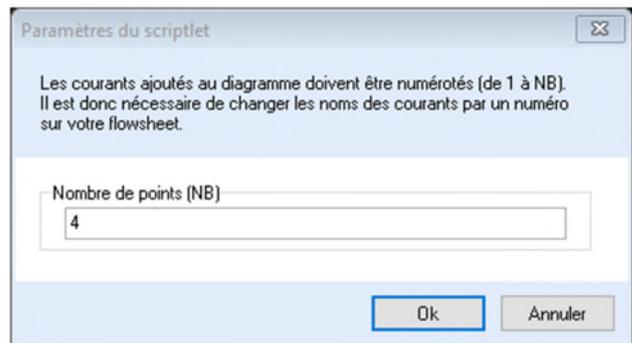
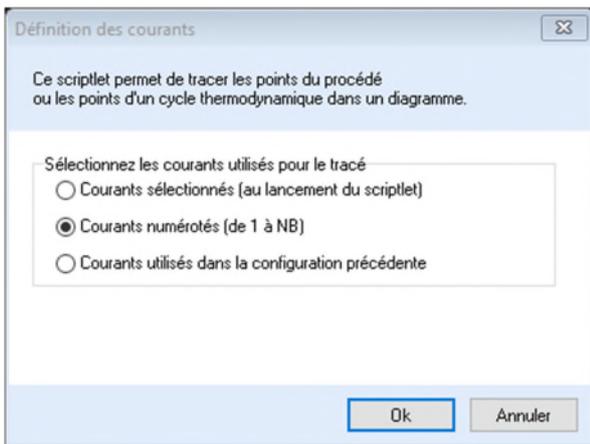
1.7. « Trucs et astuces »

Le cycle thermodynamique dans un diagramme pression (P) – enthalpie (H) peut-être visualisé avec la fonctionnalité « Scriptlets » en faisant un clic droit sur l'un des courants de matière du cycle :





Pour que les points du cycle soient reliés, il est nécessaire de numéroter les courants matière dans l'ordre du cycle souhaité.



2. RESULTATS

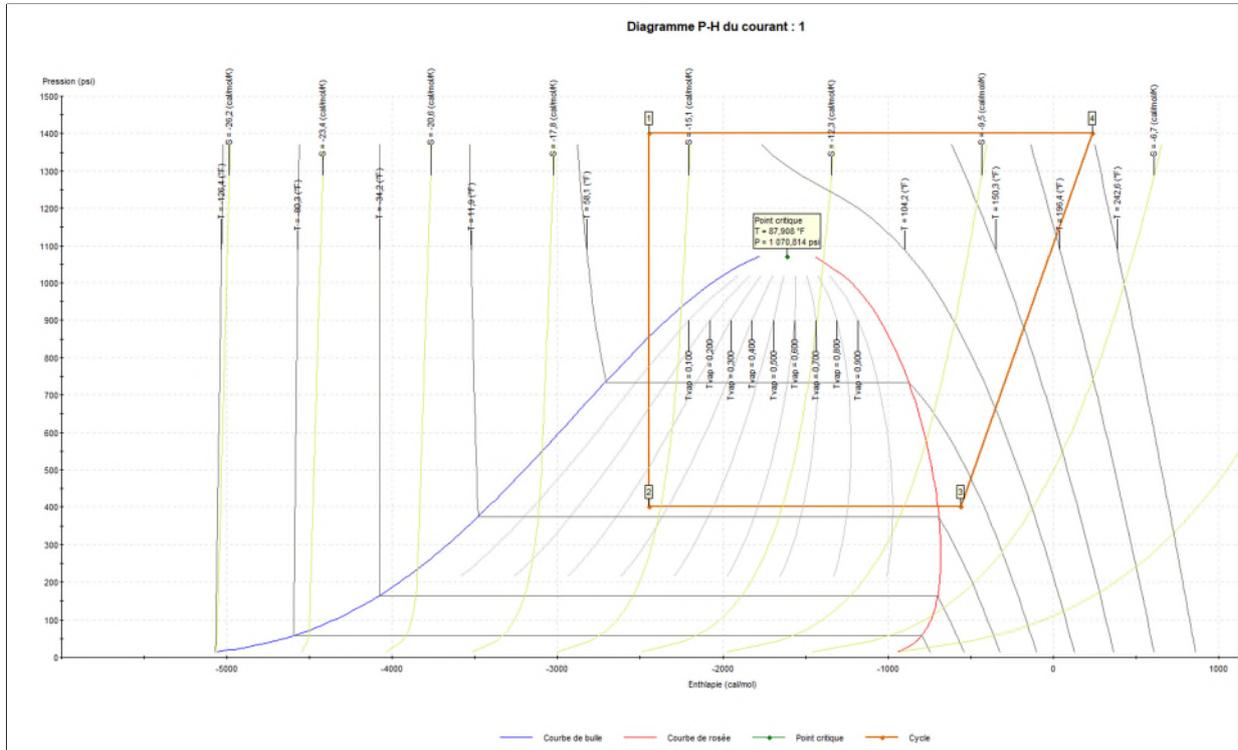
2.1. Performance du procédé

Résultats de simulation	Notation	Cycle simple
Température de l'air en sortie du procédé (°F)	A	31,4 (≈ 0°C)
Travail de « Reciprocating compressor » (kW)	B	4,5
Froid produit au « Evaporator » (kW)	C	10
COP	D (=C/B)	2,2

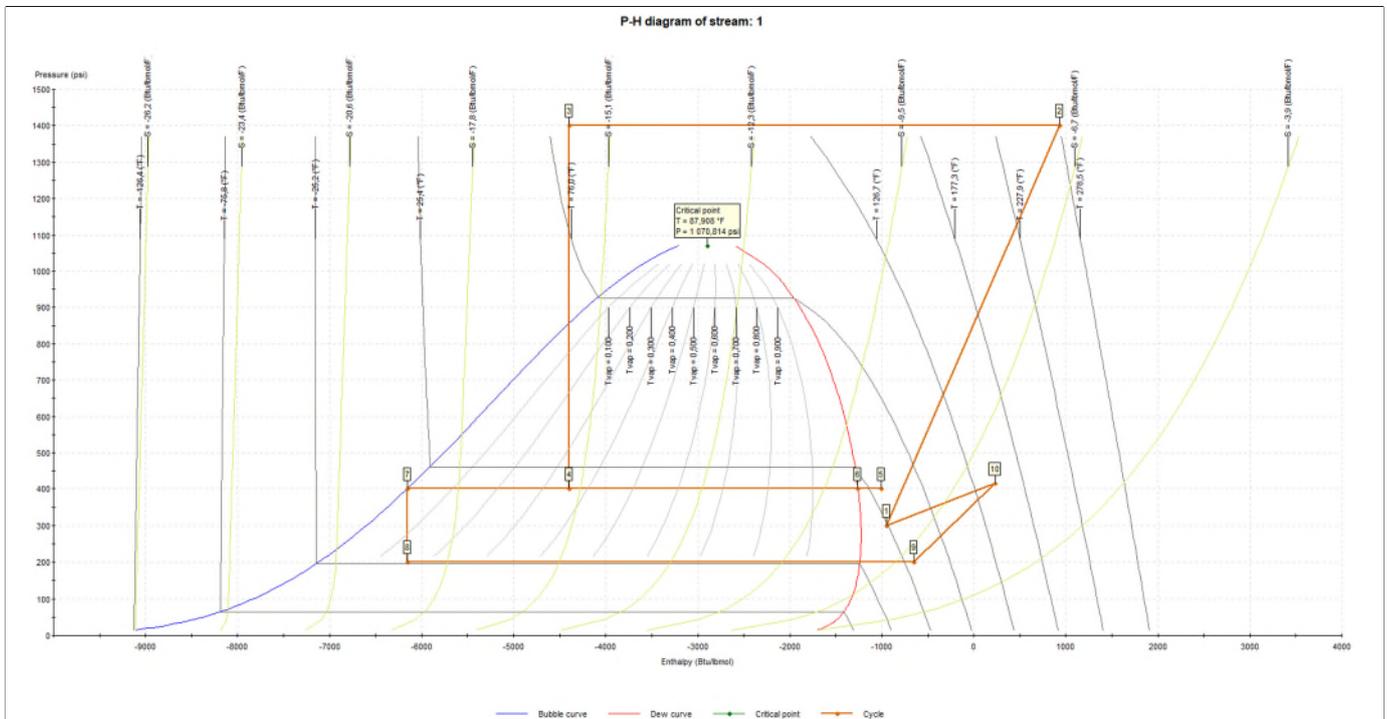
Résultats de simulation	Notation	Cycle bi-étagé
Température de l'air en sortie de « MT heat exchanger » (°F)	E	31,3 (≈ 0°C)
Température de l'air en sortie de « LT heat exchanger » (°F)	F	-7,2 (≈ -21°C)
Travail de « MT Transcritical compressor » (kW)	G	5,9
Travail de « LT Transcritical compressor » (kW)	H	0,3
Froid produit au « MT heat exchanger » (kW)	I	7,9
Froid produit au « LT heat exchanger » (kW)	J	2
COP	K (=I+J)/(G+H)	1,6

2.2. Cycles thermodynamiques

Pour le cycle mono-étagé (cycle simple), le cycle transcritique est présenté ci-dessous :



Pour le cycle bi-étagé, le cycle thermodynamique du courant « 1 » au courant « 10 » est présenté ci-dessous :



3. BIBLIOGRAPHIE

- [SOA72] SOAVE G., "Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state", C.E.S., 27, 6,1197-1203 (1972)
- [WIL19] 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 (2019)