

## EXEMPLE D'APPLICATION DE PROSIMPLUS

# OPTIMISATION DU SOLDE D'EXPLOITATION D'UNE UNITE DE PRODUCTION DE LIQUIDES DE GAZ NATUREL

### INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple présente l'optimisation sous ProSimPlus du solde d'exploitation d'une unité existante de production de liquides de gaz naturel.

Cet exemple illustre notamment l'utilisation combinée du module « Evaluation économique » et du module « Optimisation SQP » de ProSimPlus.

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

<b>FICHIERS PROSIMPLUS CORRESPONDANTS</b>	<i>PSPS_EX_FR-Optimisation-OPEX-Unite-Production-LGN.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 / [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 du procédé	3
1.3. Constituants	4
1.4. Modèle thermodynamique	4
1.5. Conditions opératoires	5
1.6. Calcul du débit volumique de GNL liquides en Volumique Standard Liquide	10
<b>2. CALCUL DU SOLDE D'EXPLOITATION DU PROCEDE</b>	<b>13</b>
2.1. Inventaire des gains d'exploitation	13
2.2. Inventaire des coûts d'exploitation	13
2.3. Saisie des gains et coûts d'exploitation dans le module d'évaluation économique	14
2.3.1. Alimentation « ALIM GAZ »	16
2.3.2. Sortie « VENTE GAZ »	18
2.3.3. Sortie « GNL LIQUIDES 2 »	19
2.3.4. Compresseur « CMP2 »	20
2.3.5. Pompe centrifuge « POM01 »	20
2.3.6. Rebouilleur de la colonne « COL1 »	21
2.4. Paramètres généraux du module d'évaluation économique	22
2.5. Position du module d'évaluation économique dans la séquence de calcul	23
<b>3. OPTIMISATION DU SOLDE D'EXPLOITATION DU PROCEDE</b>	<b>24</b>
3.1. Description du problème d'optimisation considéré	24
3.2. Configuration du module d'optimisation	24
<b>4. RESULTATS DE LA SIMULATION</b>	<b>29</b>
4.1. Commentaires sur les résultats	29
4.2. Bilans matière et énergie	29
4.3. Profils des colonnes	30
<b>5. BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>33</b>

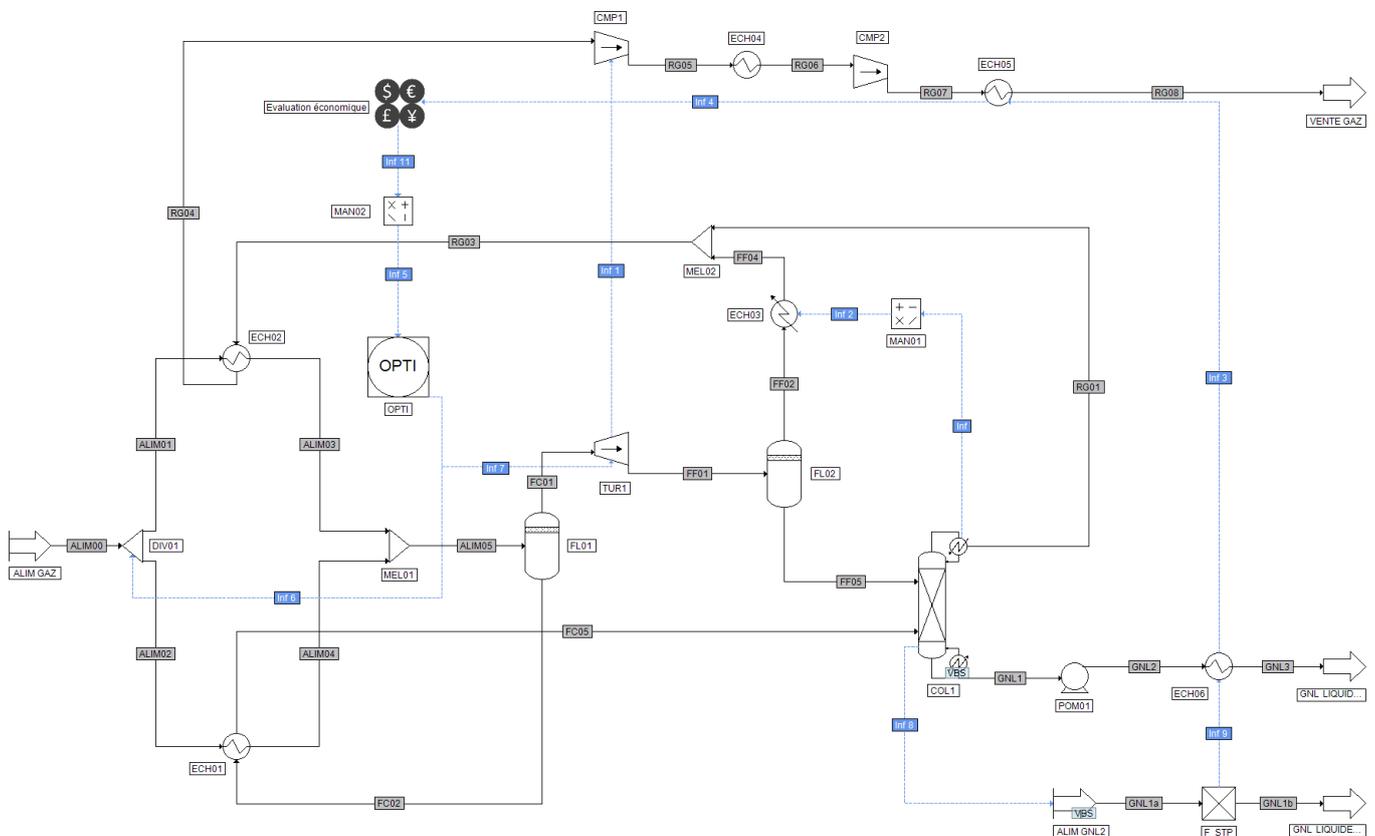
# 1. MODELISATION DU PROCEDE

## 1.1. Présentation du procédé

Cet exemple présente la simulation d'une unité de production de liquides de gaz naturel. Ce procédé extrait les liquides contenus dans le gaz naturel tout en maintenant un pouvoir calorifique d'environ 1 000 Btu/SCF du gaz résiduel destiné à la vente. L'alimentation gaz est refroidie en deux parties, l'une par le mélange du courant de gaz produit après le second flash FL02 avec le distillat vapeur du dééthaniseur, et l'autre par des condensats issus du premier flash FL01. L'alimentation ainsi refroidie est flashée une première fois. Le flux vapeur est détendu dans une turbine avant d'être flashé une seconde fois. Les flux liquides issus de ces deux flashes sont envoyés dans le dééthaniseur. Le résidu produit en pied de colonne constitue les liquides de gaz naturel. Le distillat vapeur mélangé avec la phase vapeur issue du second flash est comprimé et refroidi pour constituer le gaz résiduel destiné à la vente. L'objectif de ce problème est de maximiser le profit généré par cette unité existante (coût des matières premières et des utilités par rapport au coût des produits). Les variables à optimiser sont le taux de partage de l'alimentation et la pression de décharge de la turbine.

L'ensemble des données de ce problème est disponible dans [PRO95].

## 1.2. Schéma du procédé



### 1.3. Constituants

Les constituants pris en considération dans cet exemple sont listés dans le tableau ci-dessous. L'ordre des constituants est à conserver car certains scripts utilisent cet ordre prédéfini.

Nom	Formule chimique	Numéro CAS
Azote	N <sub>2</sub>	7727-37-9
Méthane	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
Isobutane	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	75-28-5
n-Butane	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	106-97-8
Isopentane	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	78-78-4
n-Pentane	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	109-66-0
n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	110-54-3
n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	142-82-5

### 1.4. Modèle thermodynamique

Le système considéré contient des hydrocarbures et de l'azote. La pression de travail ne dépasse jamais 100 bars. En conséquence le modèle SRK [SOA72] a été choisi. Les paramètres d'interaction binaire de la base de données de ProSim ont été utilisés. Le volume molaire liquide a été calculé en utilisant la méthode de Lee-Kesler.

### 1.5. Conditions opératoires

L'ensemble des conditions opératoires nécessaires à la définition du procédé est résumé dans cette partie, les données en orange sont des valeurs initiales qui seront modifiées par le module d'optimisation :

- ✓ Alimentation gaz

		<b>Alimentation gaz</b>
<b>Pourcentage molaire</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	0,62
	<b>CH<sub>4</sub></b>	89,23
	<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	6,96
	<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	2,23
	<b>iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	0,29
	<b>nC<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	0,47
	<b>iC<sub>5</sub>H<sub>12</sub></b>	0,09
	<b>nC<sub>5</sub>H<sub>12</sub></b>	0,07
	<b>nC<sub>6</sub>H<sub>14</sub></b>	0,03
	<b>nC<sub>7</sub>H<sub>16</sub></b>	0,01
<b>Débit molaire total (lbmol/h)</b>		1646,98
<b>Température (°F)</b>		120
<b>Pression (psi)</b>		510

- ✓ Séparateurs

<b>Paramètres de fonctionnement</b>	<b>Flash FL01</b>
<b>Type de séparateur</b>	Séparateur diphasique liquide-vapeur
<b>Pression (psi)</b>	505
<b>Quantité de chaleur échangée (Btu/h)</b>	Adiabatique

<b>Paramètres de fonctionnement</b>	<b>Flash FL02</b>
<b>Type de séparateur</b>	Séparateur diphasique liquide-vapeur
<b>Température (°F)</b>	Température du mélange adiabatique des alimentations
<b>Pression (psi)</b>	Pression la plus faible des alimentations

✓ Colonne

<b>Paramètres de fonctionnement</b>	<b>Colonne à distiller COL1</b>
<b>Type de colonne</b>	Colonne à distiller diphasique avec condenseur partiel
<b>Nombre d'étages théoriques</b>	16
<b>Étages d'alimentation</b>	6 et 12
<b>Débit de distillat vapeur (lbmol/h)</b>	65
<b>Débit de reflux (lbmol/h)</b>	40
<b>Quantité de chaleur à fournir au rebouilleur (kcal/h)</b>	Calculée
<b>Pression en tête de colonne (et au plateau 2) (psi)</b>	Pression de la turbine « TUR1 » - 5 psi
<b>Pression en pied de colonne (psi)</b>	Pression de la turbine « TUR1 »
<b>Efficacité des plateaux</b>	1

Pour obtenir le profil de pression spécifié de la colonne, le script suivant a été utilisé :

```
' Chargement de la bibliothèque contenant l'outil de conversion d'unités
with CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
    ExecuteGlobal .OpenTextFile(Project.ApplicationPath & "Scripts\UnitConversion.vbs", 1).ReadAll()
end with

' Fonction de création du profil de pression de la colonne
Sub OnCalculationStart()

' Récupération de la valeur de la pression de la turbine "TUR1"
P1 = Project.Modules("TUR1").PressureSpecValue

' Conversion de la perte de charge (valeur : 5 psi) en unité ProSim (atm)
DP = ConvertToProSim("Pressure drop", 5, "psi")

with Module
    ' Pression au plateau 1
    .OverheadPressure = P1 - DP
    ' Plateau 2
    .IntermediatePressuresStages(1) = 2
    ' Pression du plateau défini précédemment (plateau 2)
    .IntermediatePressuresValues(1) = P1 - DP
end with

End Sub
```

Spécifications complémentaires pour la colonne COL1 :

Spécification		Type de produit	Constituant	Valeur	Action
1:	Débit partiel	Résidu liquide	ETHANE	0,1137 lbmol/h	Débit de distillat vapeur
2:	Débit partiel	Distillat vapeur	PROPANE	1,62 lbmol/h	Débit de reflux

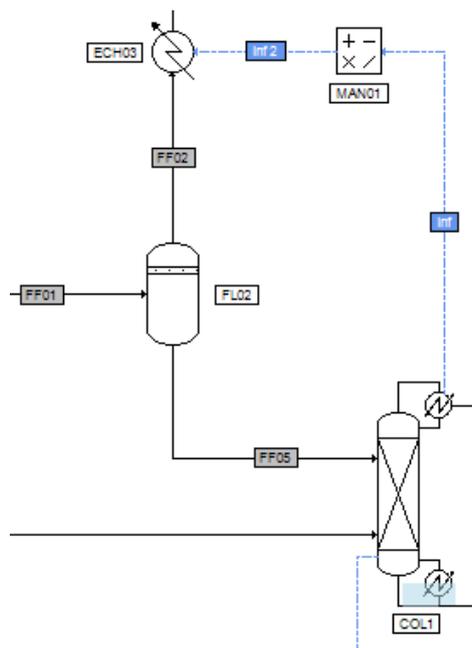
✓ Échangeurs de chaleur généralisés

Nom	Type de spécification	Valeur de la spécification	Perte de charge (psi) 1 <sup>er</sup> courant / 2 <sup>nd</sup> courant
ECH01	Autre : Produit UA	2 666,3 Btu / h / °F	0 / 0
ECH02	Courant froid : Température de sortie	110 °F	0 / 0

✓ Échangeur simple

Nom	Quantité de chaleur (Btu/h)	Perte de charge (psi)
ECH03	- Quantité de chaleur au condenseur de COL1 (réchauffement)	0

La quantité de chaleur échangée dans l'échangeur « ECH03 » doit être de signe opposée à la quantité de chaleur au condenseur de la colonne « COL1 » pour respecter les conventions sur les quantités de chaleur utilisées dans ProSimPlus. Pour ce faire, on relie « COL1 » à « ECH03 » par l'intermédiaire d'un manipulateur de courants d'information et de deux courants d'information de la manière suivante :



Les fenêtres de configuration des courants d'information « Inf » et « Inf2 » et du manipulateur d'informations sont les suivantes :

**Courant information (\$ISTR)**

Nom: Inf

Desc: |

Identification Paramètres Notes

Nature de l'information à émettre:

Quantité de chaleur au condenseur (ou au decante...)

Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "COL1"

Début: 0 Fin: 0

Nature de l'information à récupérer:

Valeur du courant d'information entrant (Entrée)

Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "MAN01"

Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

**Courant information (\$ISTR2)**

Nom: Inf 2

Desc: |

Identification Paramètres Notes

Nature de l'information à émettre:

Valeur du courant d'information sortant (Sortie)

Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "MAN01"

Début: 0 Fin: 0

Nature de l'information à récupérer:

Quantité de chaleur

Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "ECH03"

Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

**Manipulateur de courant d'information (\$MA...**

Nom: MAN01

Desc: |

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes

$Sortie = A * Entrée^P + B - C$

Valeur de A: -1

Valeur de B: 0

Valeur de C: 0

Puissance:  Valeur réelle: 1  Valeur entière: 1

OK Annuler

✓ Consignateurs de température

Nom	Température de sortie (°F)	Perte de charge (bar)
ECH04	115	0
ECH05	115	0
ECH06	115	0

✓ Turbine

Paramètres de fonctionnement	Turbine TUR1
Spécification fournie	Pression de décharge fournie par l'utilisateur : 200 psi
Efficacité isentropique	0,95
Efficacité mécanique	1
Efficacité électrique	1

✓ Compresseurs

Paramètres de fonctionnement	Compresseur CMP1	Compresseur CMP2
Spécification fournie	Puissance totale spécifiée : Puissance mécanique de la turbine « TUR1 » *	Pression de refoulement : 510 psi
Efficacité isentropique	0,6519	0,7025
Efficacité mécanique	1	1
Efficacité électrique	1	1

\* : fournie par un courant d'information

Remarque : l'ensemble turbine « TUR1 » - compresseur « CMP1 » forme un turbocompresseur.

## ✓ Pompe

<b>Paramètres de fonctionnement</b>	<b>Pompe POM01</b>
<b>Pression de refoulement (psi)</b>	275
<b>Efficacité volumétrique</b>	0,65
<b>Efficacité mécanique</b>	1
<b>Efficacité électrique</b>	1

## ✓ Mélangeurs

<b>Paramètres de fonctionnement</b>	<b>Mélangeur MEL01</b>	<b>Mélangeur MEL02</b>
<b>Pression de sortie (psi)</b>	Egale à la plus faible des alimentations	Egale à la plus faible des alimentations

## ✓ Diviseur de courants

<b>Paramètre de fonctionnement</b>	<b>Diviseur de courants DIV01</b>
<b>Taux de partage courant ALIM02</b>	0,06
<b>Pression de sortie (bar)</b>	Egale à la pression d'entrée

## 1.6. Calcul du débit volumique de GNL liquides en Volumique Standard Liquide

Dans [PRO95], le prix du débit de sortie de « GNL liquides » est donné en Volume Standard Liquide. Pour déterminer la valeur du débit de « GNL liquides » en Volumique Standard Liquide à partir du débit volumique calculé par ProSimPlus, on utilise la méthode suivante.

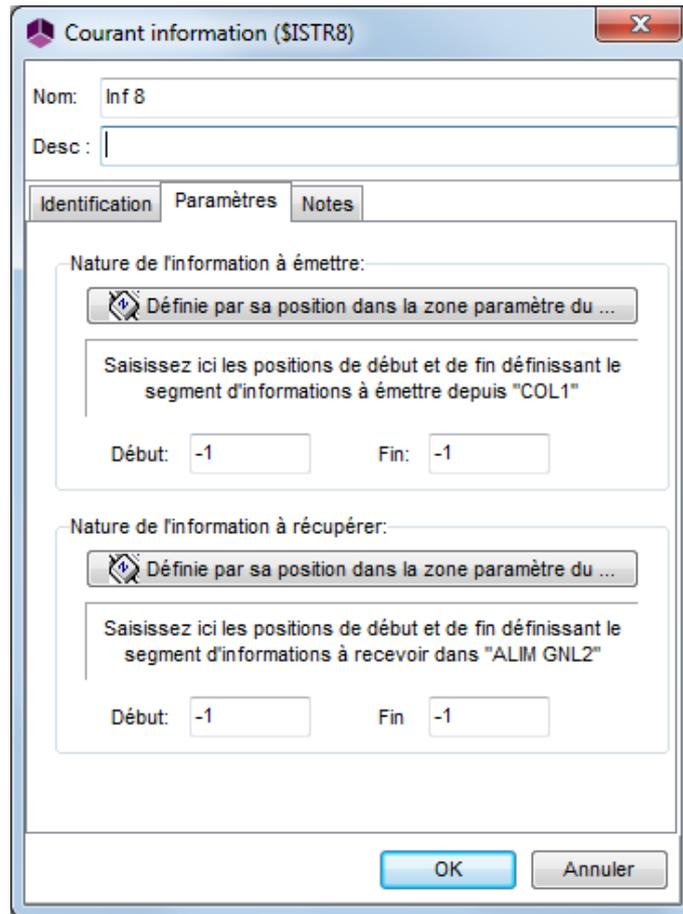
On récupère la valeur des paramètres du courant de résidu liquide « GNL1 » sortant de la colonne « COL1 » que l'on injecte dans le module d'alimentation « ALIM GNL2 ». Pour ce faire, le script suivant a été écrit au niveau du module d'alimentation « ALIM GNL2 » :

```
' Récupération des paramètres du courant de résidu liquide "GNL1" de la colonne "COL1"
Sub OnCalculationEnd()
  Module.OutputStream(1).CopyFrom(Project.Streams("GNL1"))
End Sub
```

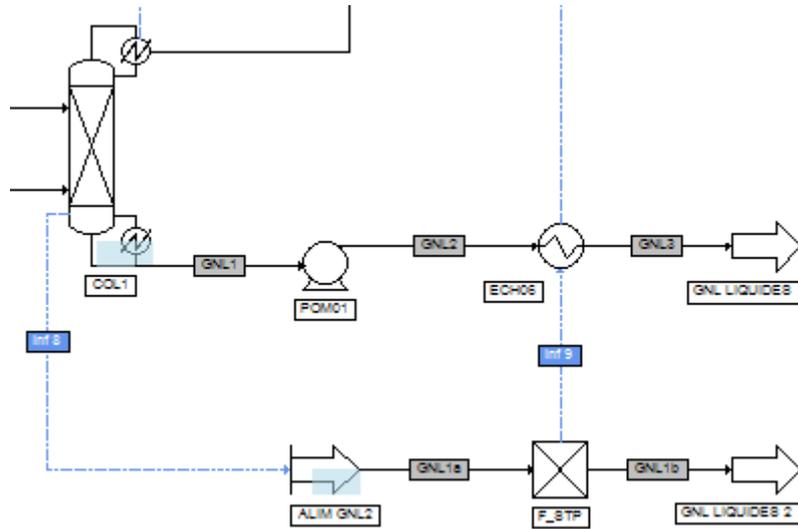
Le module d'alimentation « ALIM GNL2 » est connecté à un module « Séparateur diphasique à une sortie », nommé ici « F\_STP ». Dans ce séparateur, les conditions standards ont été imposées : température de 60°F et pression de bulle. Le débit volumique calculé en sortie du séparateur correspond alors au débit en Volumique Standard Liquide.

Pour que ce calcul soit effectué juste après celui de la colonne « COL1 » dans la séquence de calcul, un courant d'information a été ajouté entre le module « COL 1 » et le module « ALIM GNL2 ».

Ce courant sert uniquement à imposer la séquence de calcul et est configuré comme présenté dans la figure suivante. Dans ce qui suit, un courant d'information ainsi configuré sera dit « -1/-1 ».



Le schéma de connexion utilisé pour modifier la séquence de calcul (à l'aide du courant d'information « Inf8 ») est présenté sur la figure suivante :



## 2. CALCUL DU SOLDE D'EXPLOITATION DU PROCÉDÉ

Le module d'évaluation économique de ProSimPlus permet de déterminer le solde d'exploitation d'un procédé, c'est-à-dire la différence entre le gain d'exploitation et le coût d'exploitation du procédé.

Avant de commencer la configuration du module d'évaluation économique, il convient de bien définir l'inventaire des gains et coûts d'exploitation du procédé étudié.

### 2.1. Inventaire des gains d'exploitation

Les gains d'exploitation de ce procédé correspondent à :

- la vente de gaz
- la vente des liquides de gaz naturel.

Les données nécessaires au calcul de ces gains sont résumées dans le tableau ci-dessous [PRO95].

Produit	Gain
Alimentation/résidu gaz	3,40 \$/MMBtu
Ethane liquide	0,18 \$/gal
Propane liquide	0,355 \$/gal
iC4 liquide	0,50 \$/gal
nC4 liquide	0,505 \$/gal
C5+ liquide	0,57 \$/gal

La donnée « Alimentation/résidu gaz » permettra de calculer le gain d'exploitation généré par la sortie « VENTE GAZ » et les 5 autres données celui généré par « GNL LIQUIDES 2 ».

### 2.2. Inventaire des coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation de ce procédé correspondent :

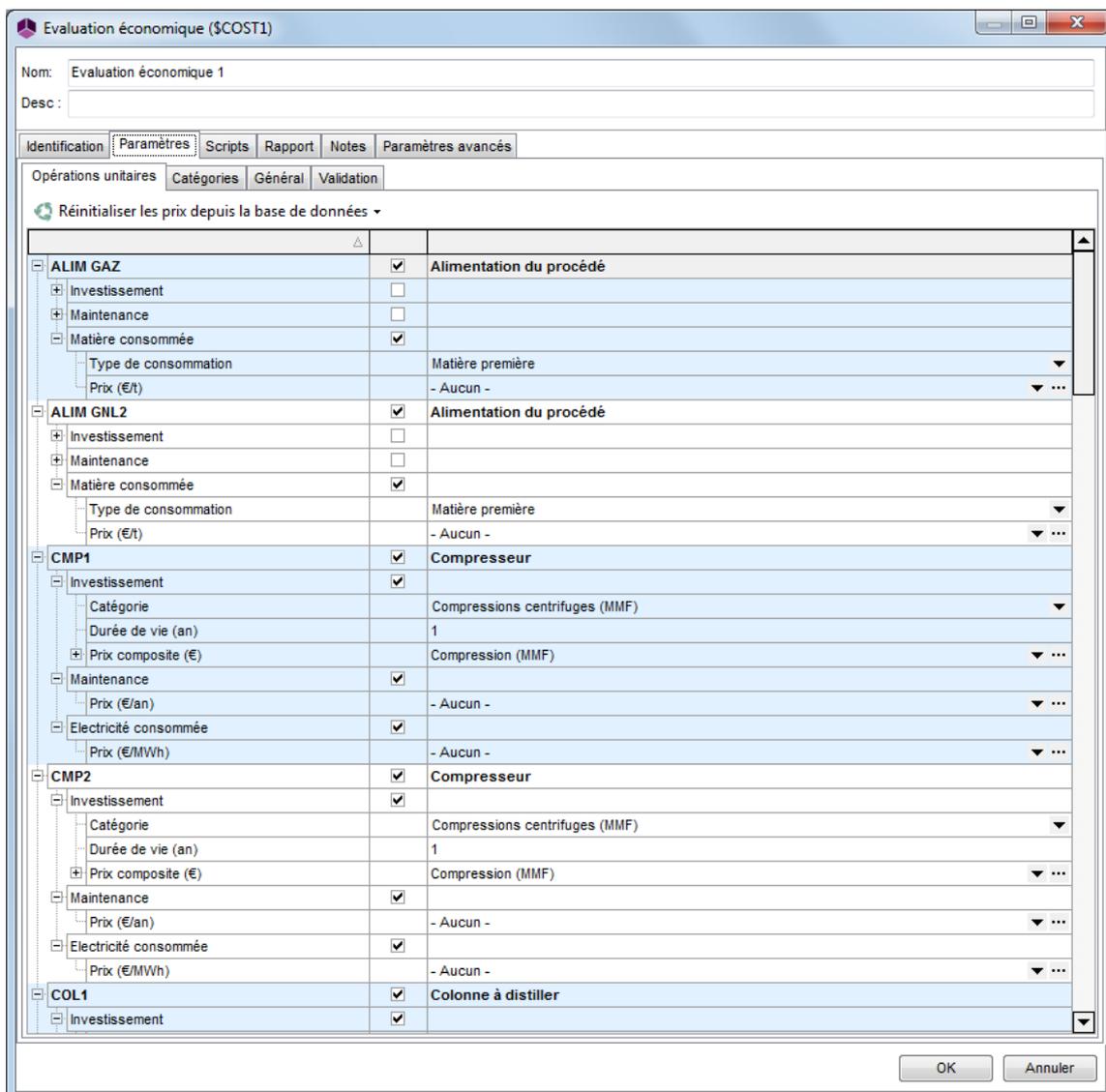
- à l'achat de gaz (module d'alimentation « ALIM GAZ »),
- au coût de l'électricité consommée par le compresseur « CMP2 » et la pompe « POM01 »
- au coût de l'utilité (gaz) employée pour fournir l'énergie nécessaire au rebouilleur de la colonne « COL1 ».

Les données nécessaires au calcul de ces coûts sont résumées dans le tableau ci-dessous [PRO95].

Donnée	Valeur
Alimentation/résidu gaz	3,40 \$/MMBtu
Efficacité brut du fourneau	65 %
Electricité	0,027 \$/kWh

### 2.3. Saisie des gains et coûts d'exploitation dans le module d'évaluation économique

Dans cet exemple, on souhaite calculer uniquement le solde d'exploitation d'une unité existante sans prendre en compte l'investissement des équipements ni leur maintenance. Pour configurer le module d'évaluation économique en vue de calculer le solde d'exploitation, il faut sélectionner l'onglet « Paramètres » et le sous-onglet « Opérations unitaires ». La fenêtre à configurer est alors la suivante :



La première étape consiste à décocher tous les prix relatifs à l'investissement et à la maintenance, ainsi que tous les modules qui ne sont pas pris en compte dans cet exemple.

Les figures suivantes regroupent tous les modules et les prix considérés dans cet exemple.

<input checked="" type="checkbox"/>	<b>ALIM GAZ</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Alimentation du procédé</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	Investissement	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Maintenance	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Matière consommée	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Type de consommation		Matière première ▼
	Prix (€/t)		Coût alimentation gaz (\$/t) ▼ ...

<input checked="" type="checkbox"/>	<b>CMP2</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Compresseur</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	Investissement	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Maintenance	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Electricité consommée	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Prix (€/MWh)		Coût opératoire compresseur (\$/MWh) ▼ ...

<input checked="" type="checkbox"/>	<b>COL1</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Colonne à distiller</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	Investissement	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Maintenance	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Quantité de chaleur au condenseur (utilité)	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Quantité de chaleur au rebouilleur (utilité)	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Prix (€/MWh)		Coût opératoire rebouilleur (\$/MWh) ▼ ...

<input checked="" type="checkbox"/>	<b>GNL LIQUIDES 2</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Sortie du procédé</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	Matière produite	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Type de production		Produit ▼
	Prix (€/t)		Prix GNL (\$/t) ▼ ...

<input checked="" type="checkbox"/>	<b>POM01</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Pompe centrifuge</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	Investissement	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Maintenance	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Electricité consommée	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Prix (€/MWh)		Coût de l'électricité (\$/MWh) ▼ ...
	Value		27 ...

<input checked="" type="checkbox"/>	<b>VENTE GAZ</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Sortie du procédé</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	Matière produite	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Type de production		Produit ▼
	Prix (€/t)		Prix de vente du gaz (\$/t) ▼ ...

Ce qui suit décrit pour chaque module considéré dans le calcul du solde d'exploitation, les fonctions de calcul des prix utilisées.

Remarque : la devise de calcul de prix du module d'évaluation économique est l'€ actuel (2016 au moment de la rédaction de cet exemple). Cependant, les coûts de la publication sont donnés en \$. Etant donné que l'année de la devise \$ n'est pas précisée et que le facteur de conversion monétaire n'a pas d'influence dans cet exemple, les coûts ont été renseignés en \$ avec un facteur de conversion de l'€ actuel vers le \$ de 1.

### 2.3.1. Alimentation « ALIM GAZ »

Le coût de l'alimentation en gaz du procédé est donné dans [PRO95] en \$/MMBtu. Or le module d'évaluation économique attend un coût pour un courant en €/t. Pour effectuer cette conversion, on utilise la formule suivante :

$$\text{Coût alimentation gaz} = \text{Pouvoir calorifique} \times \text{Volume molaire} \times \text{Coût gaz} \times \text{Masse molaire} / 10^6$$

Avec : Coût alimentation gaz en \$/t

Pouvoir calorifique en Btu/SCF (SCF = « Standard Cubic Feet »), les données du pouvoir calorifique étant fournies pour chaque constituant dans [PRO95], le pouvoir calorifique du courant est alors la somme pondérée par les fractions molaires des pouvoirs calorifiques de chaque constituant

Volume molaire en SCF/lbmol, on fait l'hypothèse d'un volume molaire constant du gaz dans tout le procédé et valant 379,941 SCF/lbmol [PRO95]

Coût gaz en \$/MMBtu

Masse molaire en t/lbmol

Le script correspondant à ce calcul du coût a été saisi au sein du module d'évaluation économique à l'emplacement suivant :

<b>ALIM GAZ</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Alimentation du procédé</b>
Investissement	<input type="checkbox"/>	
Maintenance	<input type="checkbox"/>	
Matière consommée	<input checked="" type="checkbox"/>	
Type de consommation		Matière première
Prix (€/t)		Coût alimentation gaz (\$/t)

**Prix (€/t)**

Description: Coût alimentation gaz (\$/t)

Nom de la fonction: CoutAlimentationGaz Prédéfinies

Arguments Source

```

function CoutAlimentationGaz
    Dim PC(10)
    PC(1) = 0           ' Pouvoir calorifique
    PC(2) = 1009       ' Pouvoir calorifique
    PC(3) = 1768.7     ' Pouvoir calorifique
    PC(4) = 2517.2     ' Pouvoir calorifique
    PC(5) = 3252.6     ' Pouvoir calorifique
    PC(6) = 3262       ' Pouvoir calorifique
    PC(7) = 3999.7     ' Pouvoir calorifique
    PC(8) = 4008.7     ' Pouvoir calorifique
    PC(9) = 4756.1     ' Pouvoir calorifique
    PC(10) = 5502.8    ' Pouvoir calorifique

    ' Nombre de constituants
    NC = Module_Outputstream(1).CompoundCount
        
```

OK    Annuler

Le script saisi dans l'onglet « Source » est le suivant :

Function CoutAlimentationGaz

Dim PC(10)

```
PC(1) = 0           ' Pouvoir calorifique du constituant 1, Btu/SCF
PC(2) = 1009       ' Pouvoir calorifique du constituant 2, Btu/SCF
PC(3) = 1768.7     ' Pouvoir calorifique du constituant 3, Btu/SCF
PC(4) = 2517.2     ' Pouvoir calorifique du constituant 4, Btu/SCF
PC(5) = 3252.6     ' Pouvoir calorifique du constituant 5, Btu/SCF
PC(6) = 3262       ' Pouvoir calorifique du constituant 6, Btu/SCF
PC(7) = 3999.7     ' Pouvoir calorifique du constituant 7, Btu/SCF
PC(8) = 4008.7     ' Pouvoir calorifique du constituant 8, Btu/SCF
PC(9) = 4756.1     ' Pouvoir calorifique du constituant 9, Btu/SCF
PC(10) = 5502.8    ' Pouvoir calorifique du constituant 10, Btu/SCF
```

' Nombre de constituants

NC = Module.OutputStream(1).CompoundCount

' Dimensionnement du vecteur des fractions molaires

Redim FM(NC)

' Fractions molaires des constituants

For i = 1 to NC

    FM(i) = Module.OutputStream(1).PartialMolarFlowrate(i) / Module.OutputStream(1).MolarFlowrate

Next

' Masse molaire, t/lbmol

MM = Module.OutputStream(1).MolarWeight           ' lb/lbmol

MM = MM / 2204.62                                   ' t/lbmol

' Coût du gaz d'alimentation/résiduel, \$/MMBtu

AGCout = 3.4

' Pouvoir calorifique du courant d'alimentation, Btu/SCF

PouvoirCalorifique = 0.0

For i = 1 to NC

    PouvoirCalorifique = PouvoirCalorifique + FM(i) \* PC(i)

Next

' Coût de l'alimentation en gaz, \$/t

CoutAlimentationGaz = PouvoirCalorifique \* 379.491 \* AGCout / 1e6 / MM

End Function

Remarque : dans le module d'évaluation économique, au niveau des champs de saisi des scripts (onglets « Source »), il est possible d'utiliser les fonctions de calculs de propriétés propres à chaque module. Dans le cas de « ALIM GAZ », les propriétés des courants sortant du module ont été utilisées.

### 2.3.2. Sortie « VENTE GAZ »

La script saisi pour le calcul du prix de revente de gaz (module « VENTE GAZ ») est analogue à celui utilisé pour « ALIM GAZ ». Seuls les noms de la fonction et de certaines variables ont été remplacés pour plus de clarté :

Fonction PrixVenteGaz

Dim PC(10)

```
PC(1) = 0           ' Pouvoir calorifique du constituant 1, Btu/SCF
PC(2) = 1009       ' Pouvoir calorifique du constituant 2, Btu/SCF
PC(3) = 1768.7     ' Pouvoir calorifique du constituant 3, Btu/SCF
PC(4) = 2517.2     ' Pouvoir calorifique du constituant 4, Btu/SCF
PC(5) = 3252.6     ' Pouvoir calorifique du constituant 5, Btu/SCF
PC(6) = 3262       ' Pouvoir calorifique du constituant 6, Btu/SCF
PC(7) = 3999.7     ' Pouvoir calorifique du constituant 7, Btu/SCF
PC(8) = 4008.7     ' Pouvoir calorifique du constituant 8, Btu/SCF
PC(9) = 4756.1     ' Pouvoir calorifique du constituant 9, Btu/SCF
PC(10) = 5502.8    ' Pouvoir calorifique du constituant 10, Btu/SCF
```

' Nombre de constituants

NC = Module.OutputStream(1).CompoundCount

' Dimensionnement du vecteur des fractions molaires

Redim FM(NC)

' Fractions molaires des constituants

For i = 1 to NC

```
FM(i) = Module.OutputStream(1).PartialMolarFlowrate(i) / Module.OutputStream(1).MolarFlowrate
Next
```

' Masse molaire, t/lbmol

MM = Module.OutputStream(1).MolarWeight ' lb/lbmol

MM = MM / 2204.62 ' t/lbmol

' Prix du gaz d'alimentation/résiduel, \$/MMBtu

AGPrix = 3.4

' Pouvoir calorifique, Btu/SCF

PouvoirCalorifique = 0.0

For i = 1 to NC

```
PouvoirCalorifique = PouvoirCalorifique + FM(i) * PC(i)
```

Next

' Prix de vente du gaz, \$/t

PrixVenteGaz = PouvoirCalorifique \* 379.491 \* AGPrix / 1e6 / MM

End Function

Remarque : dans le module d'évaluation économique, chaque sortie du procédé est définie au niveau du module auquel cette sortie est reliée. La sortie « VENTE GAZ » est par exemple définie au niveau du module « ECH05 ». Ainsi, pour avoir accès à une propriété d'une sortie (débit, masse molaire...), il faut déterminer l'indice du courant reliant le module et la sortie. La sortie « VENTE GAZ » correspond par exemple à la sortie 1 du module « ECH05 ». La syntaxe pour accéder au débit molaire total de la sortie « VENTE GAZ » est alors :

`Module.OutputStream(1).MolarFlowrate`

### 2.3.3. Sortie « GNL LIQUIDES 2 »

Pour calculer le prix de revente de cette sortie, la donnée fournie est ici le prix volumique des différents constituants ou groupe de constituants du courant. Afin de respecter l'unité requise par le module d'évaluation économique (€/t pour les alimentations/sorties), il faut convertir ce prix volumique en prix massique en déterminant la masse volumique du mélange.

Le script utilisé pour déterminer le prix de vente est le suivant :

Function PrixGNL

```

Dim C(6)

C(2) = 0.18      ' Coût des liquides C2, $/gal
C(3) = 0.355    ' Coût des liquides C3, $/gal
C(4) = 0.5      ' Coût des liquides IC4, $/gal
C(5) = 0.505    ' Coût des liquides NC4, $/gal
C(6) = 0.57     ' Coût des liquides C5+, $/gal

' Création du calculator, copie du calculator du courant de sortie de F_STP (GNL1b)
dim calc
set calc = Module.Outputstream(1).VBSCalculator

' Récupération de la température, de la pression et du nombre de constituants dans GNL1b
T = Module.Outputstream(1).Temperature
P = Module.Outputstream(1).Pressure
NC = Module.Outputstream(1).CompoundCount

' Dimensionnement des vecteurs
Redim FM(NC-1)
Redim FMPure(NC-1)
Redim VmLPure(NC-1)
Redim FV(NC-1)

' Initialisation de la norme du vecteur de fractions volumiques
NormFV = 0

' Calcul des fractions molaires de GNL1b
For i = 1 to NC
    FM(i-1) = Module.OutputStream(1).PartialMolarFlowrate(i)/Module.OutputStream(1).MolarFlowrate
Next

' Calcul du volume molaire liquide de GNL1b
VmL = calc.PCalcVmL(T,P,FM)

' Calcul des volumes molaires des corps purs, des fractions volumiques non normées
' et de la norme du vecteur de fractions volumiques
For i = 1 to NC

    VmLPure(i-1) = calc.Compounds.Items(i-1).LiquidMolarVolumeAtT(T)
    FV(i-1) = FM(i-1) * VmLPure(i-1) / VmL
    NormFV = NormFV + FV(i-1)

Next

' Normalisation des fractions volumiques
' (ceci revient à calculer les fractions volumiques avec l'hypothèse "mélange idéal")
For i = 1 to NC
    FV(i-1) = FV(i-1) / NormFV
Next

' Fraction volumique des liquides C5+ dans le GNL
FVC5plus = 0.0

```

```

For i = 7 to NC
  FVC5plus = FVC5plus + FV(i-1)
Next

' Coût volumique du GNL, $/gal
CoutVolumiqueGNL = FV(2) * C(2) + FV(3) * C(3) + FV(4) * C(4) + FV(5) * C(5) + FVC5plus * C(6)

' Masse volumique, t/gal
MasseVolumique = Module.OutputStream(1).Density      ' kg/m3
MasseVolumique = MasseVolumique / 1000              ' t/m3
MasseVolumique = MasseVolumique / 264.172          ' t/gal

' Prix GNL, $/t
PrixGNL = CoutVolumiqueGNL / MasseVolumique

' Destruction du calculator
set calc = nothing

End Function
    
```

### 2.3.4. Compresseur « CMP2 »

L'utilité utilisée pour faire fonctionner le compresseur « CMP2 » est le gaz naturel. L'efficacité de l'apport de l'énergie est de 40 %.

Le script utilisé pour calculer le coût de fonctionnement du compresseur est le suivant :

Function CoutOperatoireCompresseur

```

' Coût du gaz d'alimentation/résiduel, $/MMBtu
AGCout = 3.4

' Coût opératoire du compresseur (efficacité : 40 %), $/MMBtu
CoutOperatoireCompresseur = AGCout / 0.4

' Coût opératoire du compresseur, $/MWh
CoutOperatoireCompresseur = CoutOperatoireCompresseur * 3600 / 1054.35
    
```

End Function

### 2.3.5. Pompe centrifuge « POM01 »

La pompe centrifuge « POM01 » fonctionne à l'énergie électrique dont le coût en \$/kWh est fourni. Le coût en \$/MWh (unité attendue par le module d'évaluation économique) est simplement ce coût multiplié par 1000 soit 27 \$/MWh.

Pour saisir ce coût, il faut cliquer sur l'icône  et sélectionner « Constant » pour prix constant. La valeur est à saisir en face du champ « Constante » qui apparait alors.



### 2.3.6. Rebouilleur de la colonne « COL1 »

Pour calculer le coût de fonctionnement du rebouilleur de la colonne « COL1 », il faut sélectionner l'icône **...** du champ en surbrillance bleu visualisable sur la figure suivante :

COL1	<input checked="" type="checkbox"/>	Colonne à distiller
Investissement	<input type="checkbox"/>	
Maintenance	<input type="checkbox"/>	
Quantité de chaleur au condenseur (utilité)	<input type="checkbox"/>	
Quantité de chaleur au rebouilleur (utilité)	<input checked="" type="checkbox"/>	
Prix (€/MWh)		Coût opératoire rebouilleur (\$/MWh) <b>...</b>

L'utilité utilisée pour faire fonctionner le rebouilleur est le gaz naturel. L'efficacité de l'apport de l'énergie est de 65 %.

Le script utilisé pour calculer le coût de fonctionnement du rebouilleur est le suivant :

Function CoutOperatoireRebouilleur

```
' Coût du gaz d'alimentation/résiduel, $/MMBtu
AGCout = 3.4
```

```
' Coût opératoire du rebouilleur (efficacité : 65 %), $/MMBtu
CoutOperatoireRebouilleur = AGCout / 0.65
```

```
' Coût opératoire du rebouilleur, €/MWh
CoutOperatoireRebouilleur = CoutOperatoireRebouilleur * 3600 / 1054.35
```

End Function

## 2.4. Paramètres généraux du module d'évaluation économique

L'ensemble des paramètres généraux à renseigner dans l'onglet « Général » du module d'évaluation économique est visible sur la figure suivante :

The screenshot shows a software window titled "Evaluation économique (\$COST)". It has a menu bar with "Identification", "Paramètres", "Scripts", "Rapport", "Profils", "Notes", and "Paramètres avancés". Below the menu bar, there are sub-tabs: "Opérations unitaires", "Catégories", "Général" (selected), and "Validation". The "Général" tab contains several sections:

- Mode de calcul:** Two radio buttons, "On-run" (selected) and "Post-run".
- Devises:** "Devise du rapport" set to "\$" and "Facteur de conversion de € vers devise du rapport" set to "1".
- Paramètres économiques:** Three input fields: "Taux d'actualisation" (0 %), "Taux d'imposition" (0 %), and "Fonds de roulement" (0 €).
- Temps:** "Temps de fonctionnement annuel de l'usine" set to "24 h/an" and "Horizon de temps" set to "1 an(s)".

At the bottom of the window, there is a "Paramètres avancés..." button, and "OK" and "Annuler" buttons.

Ce qui suit est la justification des paramètres renseignés :

Mode de calcul :

Le mode de calcul « On-run » permet d'effectuer l'évaluation économique au cours de la simulation ce qui est indispensable pour cet exemple puisque l'on souhaite coupler cette évaluation économique à un module d'optimisation.

Paramètres économiques :

Dans cet exemple, il s'agit uniquement de déterminer le solde d'exploitation. Le taux d'actualisation, le taux d'imposition et le fonds de roulement étant des paramètres utilisés dans l'élaboration de l'échéancier, ils ne sont pas utilisés et leur valeur est laissée par défaut à 0.

Devise :

Comme précisé dans une remarque précédente, les prix ayant été renseignés directement en \$ de la référence [PRO95], le facteur de conversion a été fixé à 1 et le symbole de la devise correspondante fixé à « \$ ».

Temps :

Par défaut, le temps de fonctionnement annuel de l'usine correspond à une marche ininterrompue de l'usine 24h/24h et 7j/7j soit 8766 h/an. Dans cet exemple, on souhaite raisonner en bénéfice journalier. Pour ce faire, la solution choisie a été de saisir un fonctionnement annuel de l'usine de 24h (soit une journée).

L'horizon de temps étant là encore un paramètre utilisé dans l'élaboration de l'échéancier, qui n'est pas considéré dans cet exemple, la valeur par défaut de 1 an a été laissée.

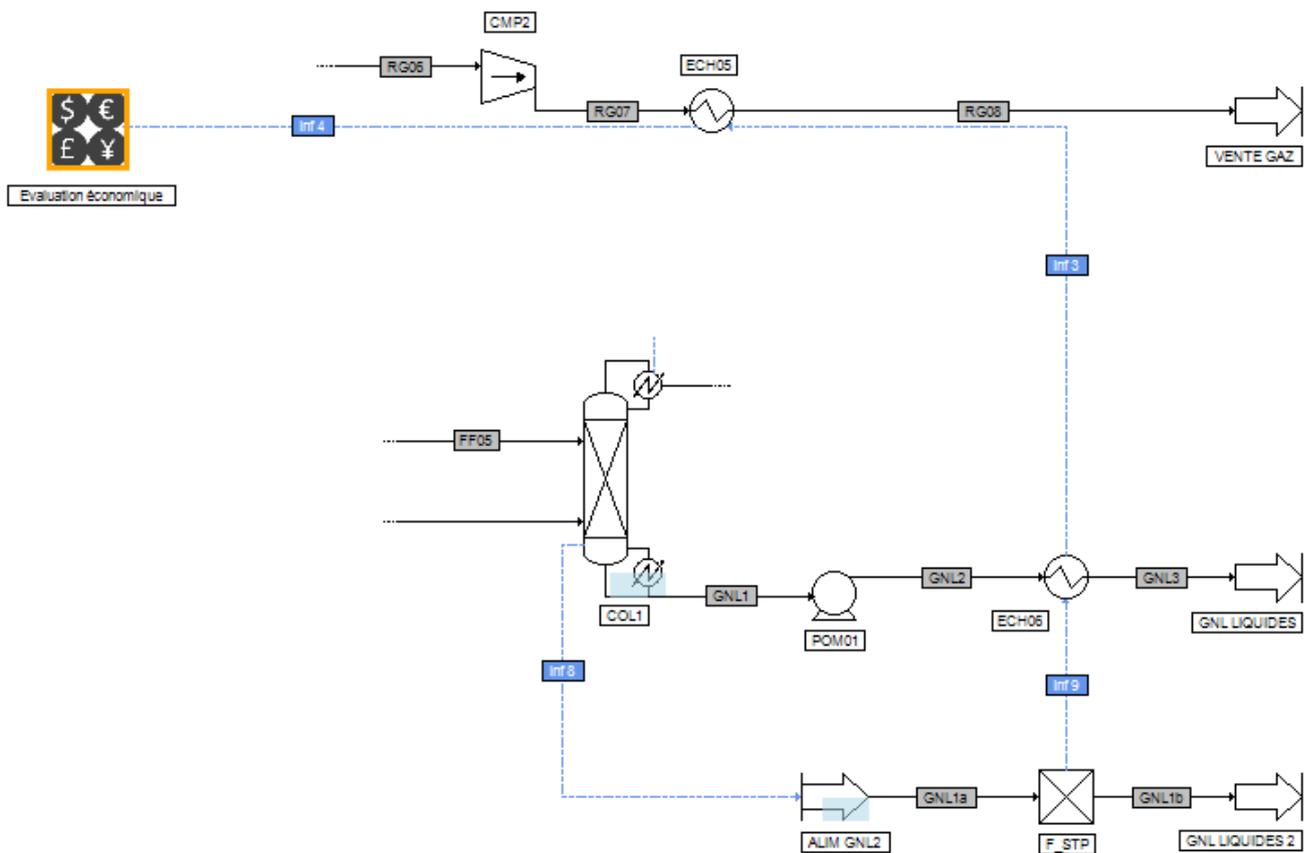
Remarque : la configuration de l'onglet « Catégories » n'est pas évoquée ici car il n'est utilisé que pour le calcul de l'investissement.

### 2.5. Position du module d'évaluation économique dans la séquence de calcul

Pour calculer correctement les gains et coûts d'exploitation, le module d'évaluation économique doit être placé de manière adéquate dans la séquence de calcul c'est-à-dire après les modules suivants :

- « F\_STP »
- « POM01 »
- « ECH05 »

La solution choisie pour parvenir à ce résultat est de relier les modules précédents (ou ceux placés après dans la séquence de calcul) par des courants « -1/-1 » au module d'évaluation économique. Pour des raisons de lisibilité du flowsheet, la configuration suivante a été sélectionnée :



Remarque : les courants d'information « Inf9 », « Inf3 » et « Inf4 » sont en « -1/-1 ».

### 3. OPTIMISATION DU SOLDE D'EXPLOITATION DU PROCEDE

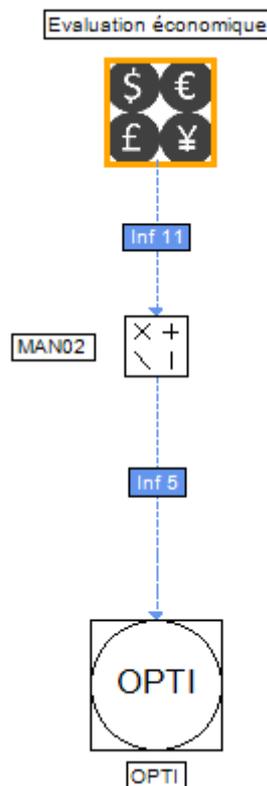
#### 3.1. Description du problème d'optimisation considéré

L'objectif est de maximiser le solde d'exploitation en jouant sur deux paramètres du procédé :

- le taux de partage du courant « ALIM02 » sortant du diviseur de courant « DIV01 »
- la pression de décharge de la turbine « TUR1 »

#### 3.2. Configuration du module d'optimisation

Le module d'optimisation minimise la grandeur définie comme étant sa fonction objectif. Or, on cherche ici à maximiser le solde d'exploitation. Il faut donc définir comme fonction objectif du module d'optimisation « Moins » le solde d'exploitation. Pour ce faire, on relie le module d'évaluation économique au module d'optimisation en interposant un manipulateur de courant d'information de la façon suivante :



Les courants d'information entrant et sortant du manipulateur « MAN02 » sont configurés de la façon suivante :

**Courant information (\$ISTR11)**

Nom: Inf 11  
 Desc:

Identification Paramètres Notes

Nature de l'information à émettre:  
 Solde global d'exploitation  
 Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Evaluation économique"  
 Début: 0 Fin: 0

Nature de l'information à récupérer:  
 Valeur du courant d'information entrant (Entrée)  
 Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "MAN02"  
 Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

**Courant information (\$ISTR5)**

Nom: Inf 5  
 Desc:

Identification Paramètres Notes

Nature de l'information à émettre:  
 Valeur du courant d'information sortant (Sortie)  
 Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "MAN02"  
 Début: 9 Fin: 9

Nature de l'information à récupérer:  
 Automatique  
 Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "OPT"  
 Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

Pour que la fonction objectif envoyée vers le module d'optimisation soit bien égale à « Moins » le solde d'exploitation, on configure le manipulateur d'information de la façon suivante :

**Manipulateur de courant d'information (\$MA...)**

Nom: MAN02  
 Desc:

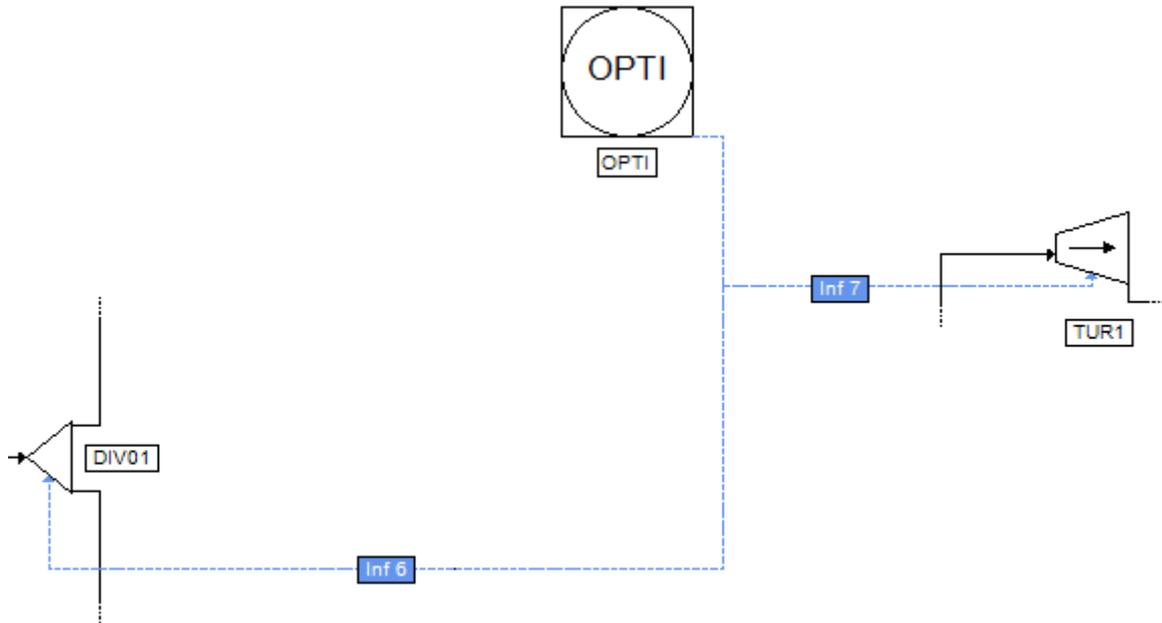
Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes

$$Sortie = A * Entrée^P + B - C$$

Valeur de A: -1  
 Valeur de B: 0  
 Valeur de C: 0  
 Puissance:  
 Valeur réelle: 1  
 Valeur entière: 1

OK Annuler

Afin d'ajuster les deux paramètres du problème d'optimisation, le module « OPTI » doit être relié au diviseur de courant « DIV01 » et à la turbine « TUR1 » de la façon suivante :



Les courants d'information utilisés sont configurés de la façon suivante :

The screenshot shows the configuration window for information current 'Inf 6'. The 'Nom' field is set to 'Inf 6'. The 'Identification' tab is active. Under 'Nature de l'information à émettre', the 'Automatique' option is selected. Below this, a text box states: 'Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "OPTI"'. The 'Début' and 'Fin' fields are both set to 0. Under 'Nature de l'information à récupérer', the 'Taux de partage des courants sortants' option is selected. A text box below states: 'Saisissez ici les positions de début et de fin définissant le segment d'informations à recevoir dans "DIV01"'. The 'Début' and 'Fin' fields are both set to 2. The window has 'OK' and 'Annuler' buttons at the bottom.

The screenshot shows the configuration window for information current 'Inf 7'. The 'Nom' field is set to 'Inf 7'. The 'Identification' tab is active. Under 'Nature de l'information à émettre', the 'Automatique' option is selected. Below this, a text box states: 'Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "OPTI"'. The 'Début' and 'Fin' fields are both set to 0. Under 'Nature de l'information à récupérer', the 'Valeur de la spécification' option is selected. A text box below states: 'Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "TUR1"'. The 'Début' and 'Fin' fields are both set to 0. The window has 'OK' and 'Annuler' buttons at the bottom.

Les paramètres à saisir dans la fenêtre de définition du module d'optimisation sont en partie présentés sur la figure suivante :

The screenshot shows the 'Optimisation (\$OPTI)' window with the following settings:

- Nom: OPTI
- Desc: (empty)
- Identification: Paramètres
- Propriétés de l'optimiseur:
  - Méthode: Programmation quadratique successive (SQP)
  - Nombre de périodes: 1
  - Nombre de contraintes inégalité: 0
  - Nombre de pas de repos: 2
  - Ordre pour le calcul du gradient: 1
  - Normalisation des contraintes:
- Variables d'action: Bornes et incréments des variables d'action... (button)
- Variables itératives des courants contrôlés:
  - Température:
  - Pression:
- Courants contrôlés:
  - ALIM00:
  - ALIM01:
  - ALIM02:
  - ALIM03:
  - ALIM04:
  - ALIM05:
  - FC01:
  - FC02:
- Bornes et incréments des:
  - Températures... (button)
  - Pressions... (button)
  - Débits partiels... (button)
- Paramètres de la méthode SQP:
  - Nombre maximum d'itérations: 200
  - Paramètre Kuhn Tucker: 0,005
  - Violation de contrainte: 0,001
  - Non évolution du critère: 0,0001
  - Non évolution des variables: 0,0001
- Imprimer:
  - Impression toutes les: 1 itérations
- Test d'arrêt:
  - Nombre maximum de passages dans le RCM: 1000

Buttons: OK, Annuler

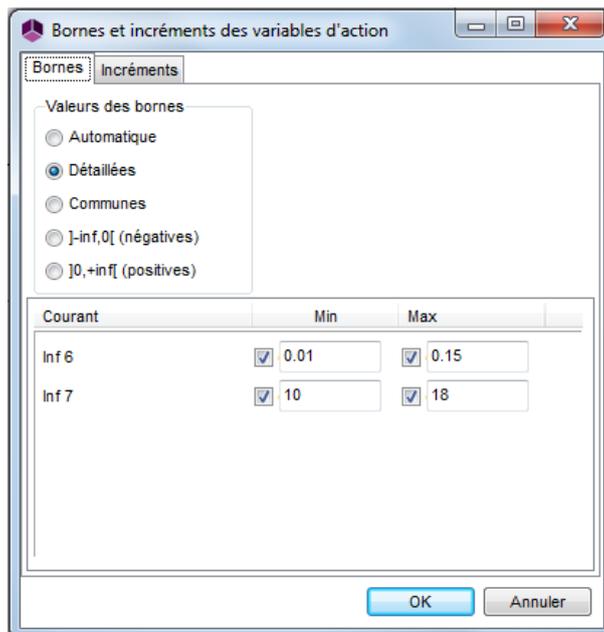
Remarque : le paramètre de Kuhn Tucker dépend notamment de l'ordre de grandeur de la dérivée de la fonction objectif par rapport aux différentes variables d'action. Il est donc important, comme c'est le cas ici, d'ajuster la valeur de ce paramètre en fonction de cet ordre de grandeur.

Au niveau du module d'optimisation, il est important de spécifier les courants coupés (ou contrôlés) de la simulation. Le courant « ALIM05 » a été choisi comme courant coupé, celui-ci étant initialisé avec les caractéristiques suivantes :

		<b>Courant coupé « ALIM05 »</b>
<b>Débit molaire (lbmol/h)</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	10,2112
	<b>CH<sub>4</sub></b>	1469,6
	<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	114,63
	<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	36,7276
	<b>iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	4,77623
	<b>nC<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	7,74079
	<b>iC<sub>5</sub>H<sub>12</sub></b>	1,48228
	<b>nC<sub>5</sub>H<sub>12</sub></b>	1,15288
	<b>nC<sub>6</sub>H<sub>14</sub></b>	0,494093
<b>nC<sub>7</sub>H<sub>16</sub></b>	0,164698	
<b>Température (°F)</b>		-40
<b>Pression (psi)</b>		510

Les débits molaires partiels du courant « ALIM05 » ont été initialisés avec ceux du courant d'alimentation « ALIM01 » car, par simple bilan matière, on peut constater que ceux-ci sont identiques.

A ces paramètres s'ajoutent les bornes des variables d'action présentés sur la figure ci-dessous :



## 4. RESULTATS DE LA SIMULATION

### 4.1. Commentaires sur les résultats

L'optimisation donne un solde d'exploitation optimal de **661,534 \$/jour** pour un **taux de partage du courant « ALIM02 » de 0,15** et une **pression de décharge pour la turbine « TUR1 » de 15,92 atm (233,92 psi)**.

Remarque : le message d'avertissement en rapport avec le module d'évaluation économique qui apparaît à la fin de la simulation informe l'utilisateur qu'un calcul n'a pas pu être effectué au sein du module d'évaluation économique. En l'occurrence, il s'agit du calcul du taux de rentabilité interne qui est un résultat qui ne concerne pas cet exemple puisque l'investissement du procédé et l'échéancier correspondant ne sont pas considérés.

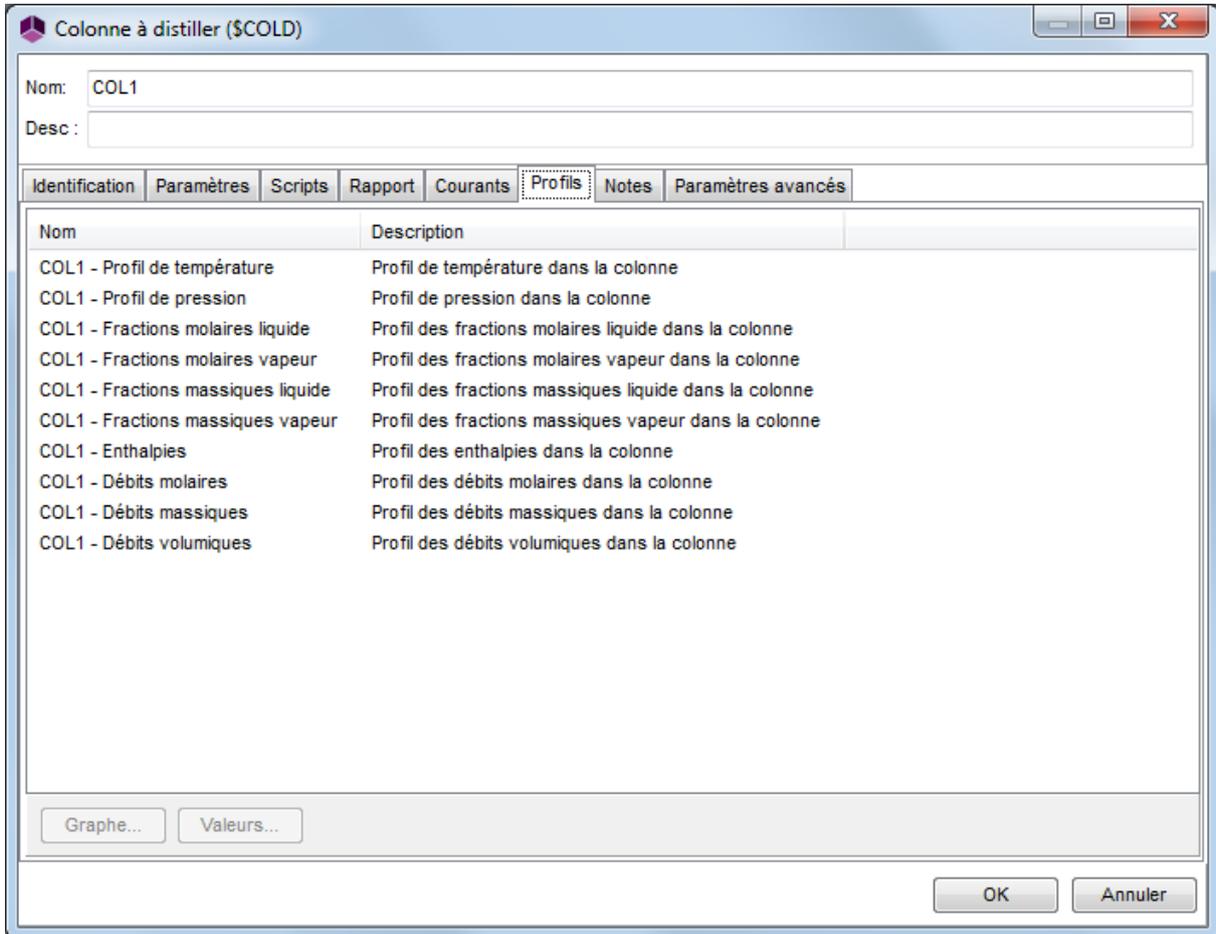
### 4.2. Bilans matière et énergie

Ce document ne présente que les bilans matière et énergie sur les courants entrées/sorties du procédé. ProSimPlus fournit cependant des résultats complets sur tous les courants et sur chaque opération unitaire.

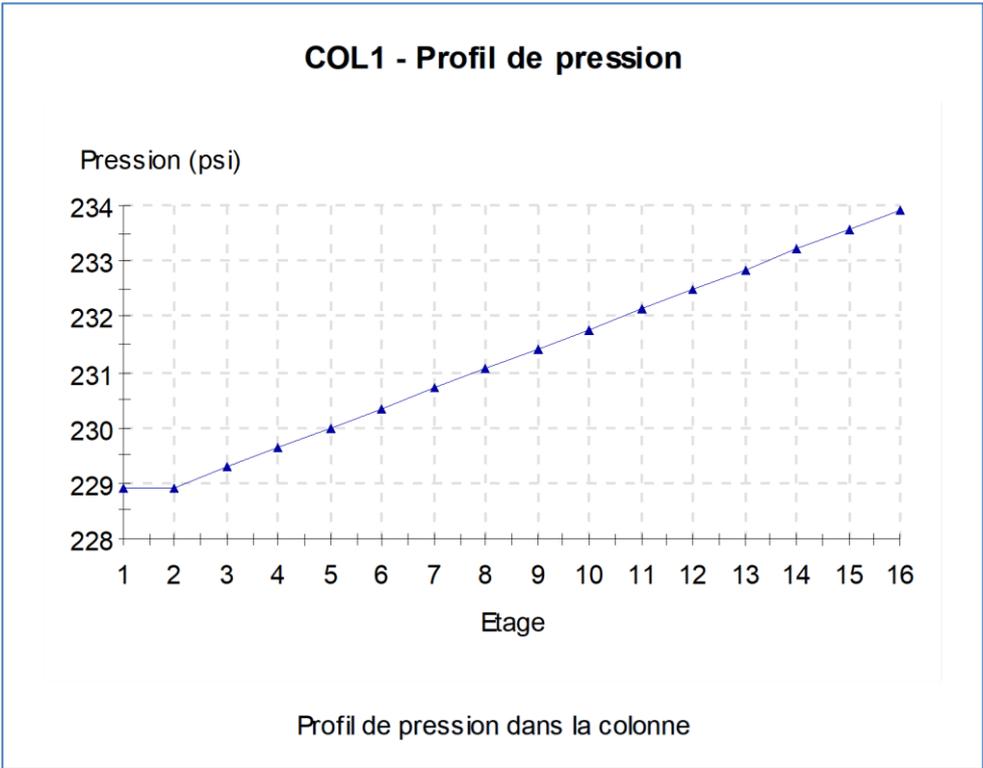
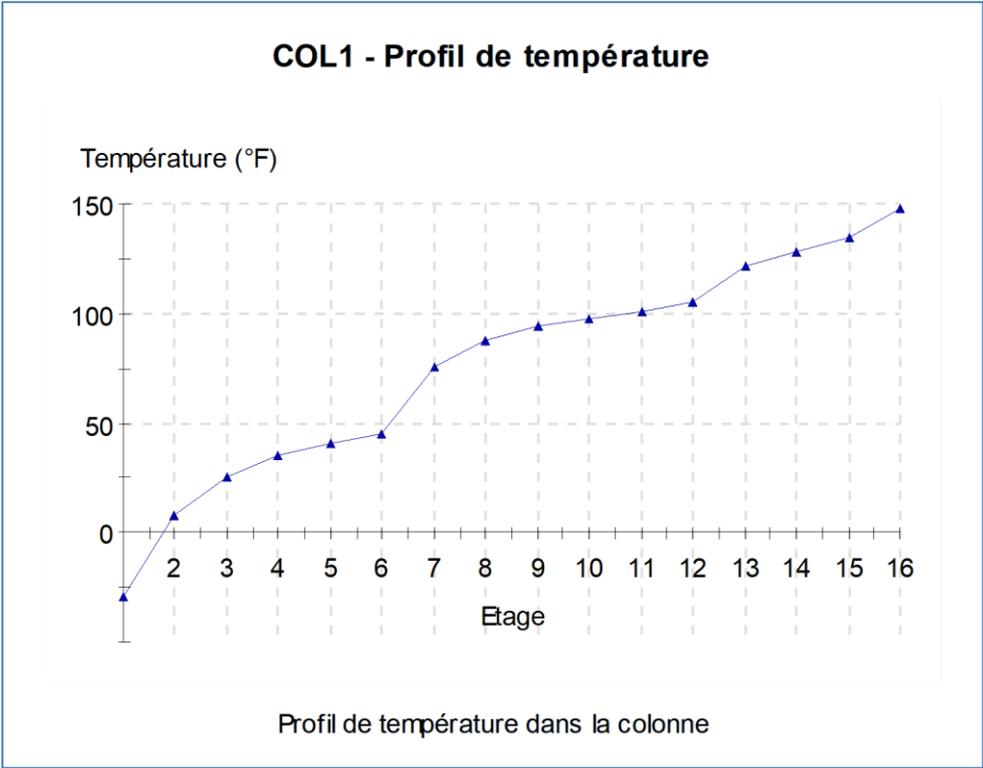
<b>Courants</b>		<b>ALIM00</b>	<b>GNL1b</b>	<b>RG08</b>
<b>De</b>		<b>ALIM GAZ</b>	<b>F_STP</b>	<b>ECH05</b>
<b>Vers</b>		<b>DIV01</b>	<b>GNL LIQUIDES 2</b>	<b>VENTE GAZ</b>
<b>Débits partiels</b>		<b>lbmol/h</b>	<b>lbmol/h</b>	<b>lbmol/h</b>
NITROGEN		10,21	1E-08	10,21
METHANE		1469,60	3E-04	1469,60
ETHANE		114,63	0,11	114,52
PROPANE		36,73	24,09	12,64
ISOBUTANE		4,78	4,48	0,30
n-BUTANE		7,74	7,49	0,26
ISOPENTANE		1,48	1,48	0,01
n-PENTANE		1,15	1,15	3E-03
n-HEXANE		0,49	0,49	2E-05
n-HEPTANE		0,16	0,16	4E-07
<b>Débit total</b>	<b>lbmol/h</b>	1646,98	39,45	1607,52
<b>Débit total</b>	<b>bbl/h</b>	3376,36	10,61	3281,83
<b>Température</b>	<b>°F</b>	120	60	115
<b>Pression</b>	<b>psi</b>	510,0	75,1	510,0

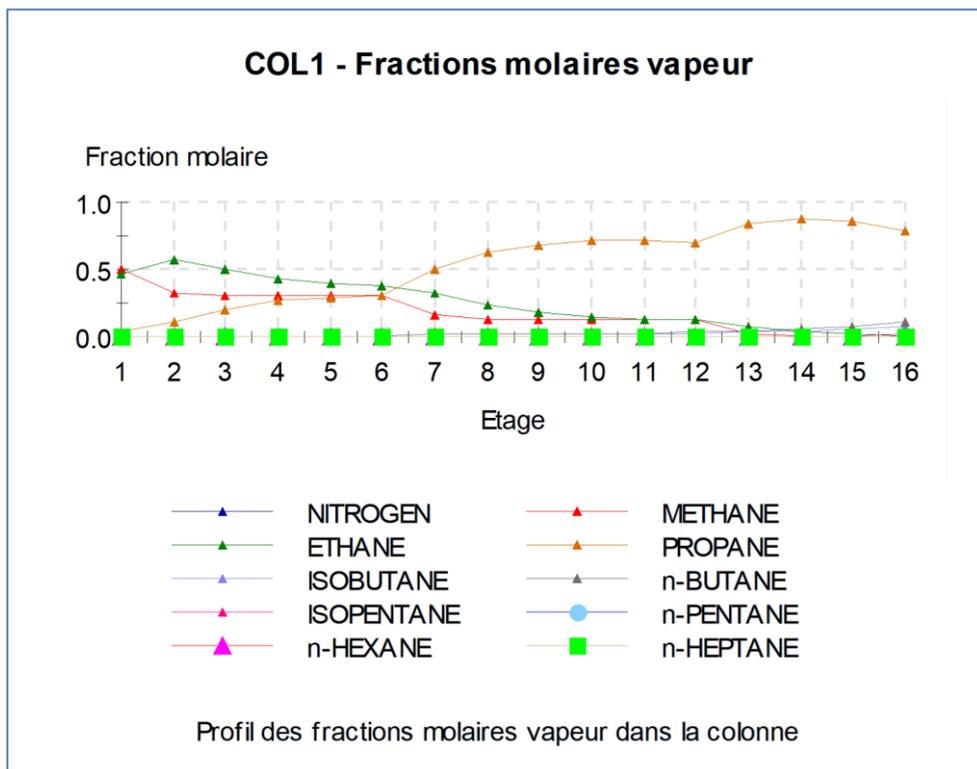
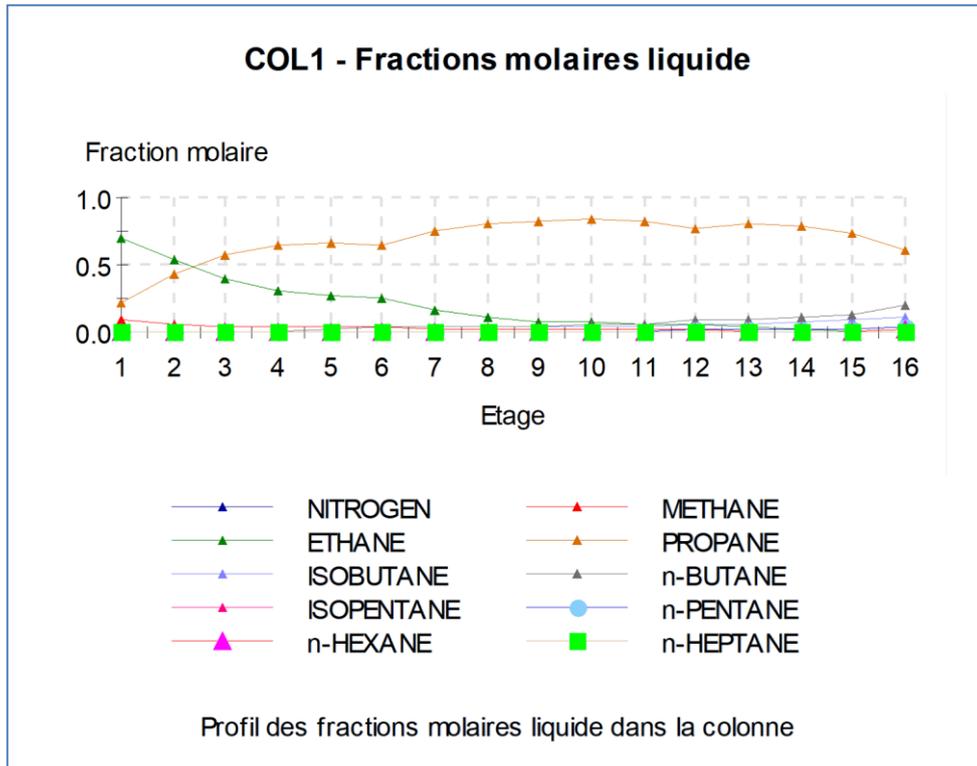
### 4.3. Profils des colonnes

Les profils de colonne sont obtenus après la simulation dans la fenêtre de configuration de la colonne, sous l'onglet « Profils ». Un double-clic sur le profil souhaité génère le graphique. Il est à noter que, dans ProSimPlus, les étages des colonnes sont numérotés de haut en bas (le premier plateau correspond au condenseur, le dernier au rebouilleur).



Colonne « COL1 »





## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [PRO95] Turbo-Expander Gas Plant Optimization  
PRO/II Application Briefs (August 1995)