

# EXEMPLE D'APPLICATION DE PROSIMPLUS

## EVALUATION ECONOMIQUE D'UN PROCEDE D'HYDRODESALKYLATION DU TOLUENE

### INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple présente l'évaluation économique sous ProSimPlus d'un procédé d'hydrodésalkylation du toluène. Le réacteur d'hydrodésalkylation est alimenté par de l'hydrogène et du toluène préalablement chauffés. Les produits de la réaction (benzène, biphenyle et méthane) ainsi que les réactifs résiduels sont séparés par un flash et trois unités de séparation. Un recyclage permet de réinjecter une partie des réactifs résiduels dans le réacteur d'hydrodésalkylation.

Cet exemple illustre l'utilisation du module « Evaluation économique » de ProSimPlus sur un procédé faisant intervenir différents types d'équipements (réacteurs, colonnes, pompes, échangeurs...).

<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>FICHIERS PROSIMPLUS</b>	<i>PSPS_EX_FR-Cout-Procede-HDA-Toluene-MMF.pmp3</i>
<b>CORRESPONDANTS</b>	<i>PSPS_EX_FR-Cout-Procede-HDA-Toluene-MPE.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

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>2. MODELISATION DU PROCEDE</b>	<b>4</b>
2.1. Présentation du procédé	4
2.2. Schéma du procédé	7
2.3. Constituants	8
2.4. Modèle thermodynamique	8
2.5. Réactions chimiques	9
2.6. Conditions opératoires	10
2.7. Dimensionnement du ballon et des colonnes à distiller	14
2.7.1. Dimensionnement du ballon X1	14
2.7.2. Dimensionnement des colonnes T1, T2 et T3	16
2.7.3. Détermination des consommations d'utilités pour les condenseurs et rebouilleurs des colonnes T1, T2 et T3	19
<b>3. RESULTATS DE LA SIMULATION</b>	<b>23</b>
3.1. Commentaires sur les résultats	23
3.2. Bilans matière et énergie	24
3.3. Profils des colonnes	25
3.4. Résultats des dimensionnements	30
<b>4. EVALUATION ECONOMIQUE</b>	<b>31</b>
4.1. Paramètres généraux de l'évaluation économique	32
4.2. Coût d'investissement initial des équipements	33
4.2.1. Méthode des Modules Fonctionnels (MMF)	34
4.2.2. Méthode Pré-Estime (MPE)	37
4.2.3. Comparaison des résultats (MMF et MPE)	45
4.3. Coût d'investissement secondaire et valeur résiduelle des équipements	45
4.4. Coût de maintenance	47
4.5. Gains et coûts d'exploitation	49
4.6. Echancier	51
4.7. Profils fournis par le module d'évaluation économique	54
4.8. Résumés des résultats obtenus lors de l'évaluation économique	58
<b>5. BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>59</b>

## 1. INTRODUCTION

Cet exemple est basé sur un procédé de production de benzène par hydrodésalkylation du toluène. Ce procédé a notamment été utilisé après la seconde Guerre Mondiale pour convertir le fort excédent de toluène (suite à l'arrêt de son utilisation pour la fabrication du TNT) en benzène. Ce benzène est principalement utilisé afin de produire du cyclohexane, un précurseur du nylon.

La diversité des équipements utilisés dans ce procédé permet d'illustrer l'utilisation du module « Evaluation économique » de ProSimPlus. Ce module a pour fonction d'évaluer les coûts d'investissement et de fonctionnement d'un procédé. L'évaluation économique est une étape permettant de déterminer la viabilité d'un procédé.

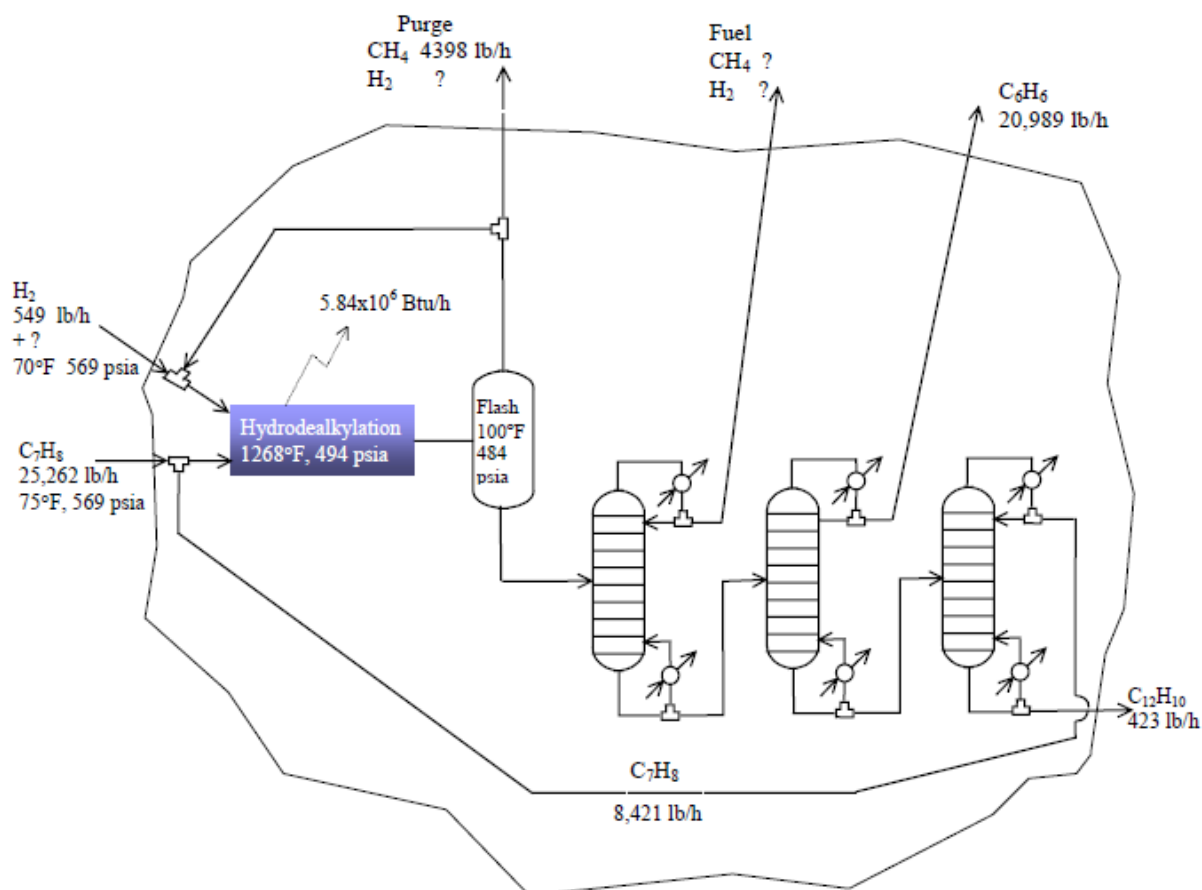
Deux méthodes d'évaluation économique des investissements des équipements sont disponibles dans ce module : la Méthode des Modules Fonctionnels (MMF) et la Méthode Pré-Estime (MPE) développées par CHAUVEL *et al.* [CHA01]. La MMF, basée essentiellement sur des paramètres procédés (débits, pression, température etc.), donne une évaluation économique rapide et fournit un bon ordre de grandeur des coûts d'investissement tandis que la MPE fournit une évaluation plus précise en prenant en compte le dimensionnement des équipements. Par ailleurs, la souplesse de conception de ce module « Evaluation économique » permet à l'utilisateur d'implémenter aisément ses propres méthodes d'évaluation des coûts.

Ces deux méthodes sont utilisées et comparées dans cet exemple.

## 2. MODELISATION DU PROCEDE

### 2.1. Présentation du procédé

Le schéma de principe du procédé étudié est le suivant [SEI04] :



Une partie des données nécessaires à l'élaboration de cet exemple provient de l'ouvrage de DOUGLAS [DOU88].

Le réacteur d'hydrodésalkylation est alimenté par de l'hydrogène et du toluène ainsi que des courants de recyclage à 650 °C et 36 bar.

Le protocole de séparation des produits de réaction est le suivant :

- Un flash en sortie de la section réactionnelle permet de recycler l'hydrogène n'ayant pas réagi
- Une première colonne à distiller permet la récupération des constituants légers (CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>)
- Une deuxième colonne à distiller sert ensuite à purifier le benzène
- Une troisième colonne à distiller est utilisée pour recueillir le toluène non converti en tête (courant recyclé) et le biphenyle en pied

Deux spécifications principales ont été imposées dans le procédé :

- Un ratio molaire d'hydrogène sur aromatiques (benzène, toluène et biphenyle) de 5 % en entrée de réacteur R1 pour éviter la cokéfaction  
(module mesure entre les courants 4 et 5)
- Une production de benzène de 120 kmol/h  
(module mesure entre les courants 21 et 22)

Les deux variables d'action associées sont :

- Le débit total d'alimentation en hydrogène
- Le débit total d'alimentation en toluène

Pour prendre en compte ces spécifications dans ProSimPlus, un module de type « gestion des contraintes » (SPEC) a été ajouté au flowsheet. Ce module est connecté par des courants d'information aux modules mesure et alimentations du procédé tel que présenté dans la partie **2.2 Schéma du procédé**.

Les informations saisies au niveau des modules mesure sont présentées dans les captures d'écran ci-après :

**Mesure (\$MESU)**

Nom: Mesure 1

Desc: Mesure ratio H2/aromatiques

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes

Mesure de

Rapport de composition(s)

Consigne d'un rapport de (somme de) Fraction(s)

☒ Fraction(s) molaire  
☐ Fraction(s) massique(s)

Ratio molaire

Numérateur

HYDROGEN	<input checked="" type="checkbox"/>
METHANE	<input type="checkbox"/>
BENZENE	<input type="checkbox"/>
TOLUENE	<input type="checkbox"/>
BIPHENYL	<input type="checkbox"/>

Tous  
Aucun

Dénominateur

HYDROGEN	<input type="checkbox"/>
METHANE	<input type="checkbox"/>
BENZENE	<input checked="" type="checkbox"/>
TOLUENE	<input checked="" type="checkbox"/>
BIPHENYL	<input checked="" type="checkbox"/>

Tous  
Aucun

OK Annuler

**Mesure (\$MESU1)**

Nom: Mesure 2

Desc: Mesure débit molaire sortie de benzène

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes

Mesure de

Débit total

Consigne de debit total

☒ Débit molaire  
☐ Débit massique  
☐ Débit volumique

Débit molaire  kmol/h

OK Annuler

Les informations saisies au niveau des courants d'information sont regroupées dans les captures d'écran ci-après :

**Courant information (\$ISTR2)**

Nom: Ratio H2 / aromatiques = 5

Desc :

Identification Paramètres Notes

Nature de l'information à émettre:

☒ Ecart entre la valeur mesurée et la consigne

Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Mesure 1"

Début: 0 Fin: 0

Nature de l'information à récupérer:

☒ Automatique

Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Gestion des contraintes 1"

Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

**Courant information (\$ISTR)**

Nom: Débit sortie benzène = 120 kmol/h

Desc :

Identification Paramètres Notes

Nature de l'information à émettre:

☒ Ecart entre la valeur mesurée et la consigne

Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Mesure 2"

Début: 0 Fin: 0

Nature de l'information à récupérer:

☒ Automatique

Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Gestion des contraintes 1"

Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

**Courant information (\$ISTR3)**

Nom: Débit total alimentation hydrogène

Desc :

Identification Paramètres Notes

Nature de l'information à émettre:

☒ Automatique

Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Gestion des contraintes 1"

Début: 0 Fin: 0

Nature de l'information à récupérer:

☒ Débit total du courant

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

Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

**Courant information (\$ISTR1)**

Nom: Débit total alimentation toluène

Desc :

Identification Paramètres Notes

Nature de l'information à émettre:

☒ Automatique

Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Gestion des contraintes 1"

Début: 0 Fin: 0

Nature de l'information à récupérer:

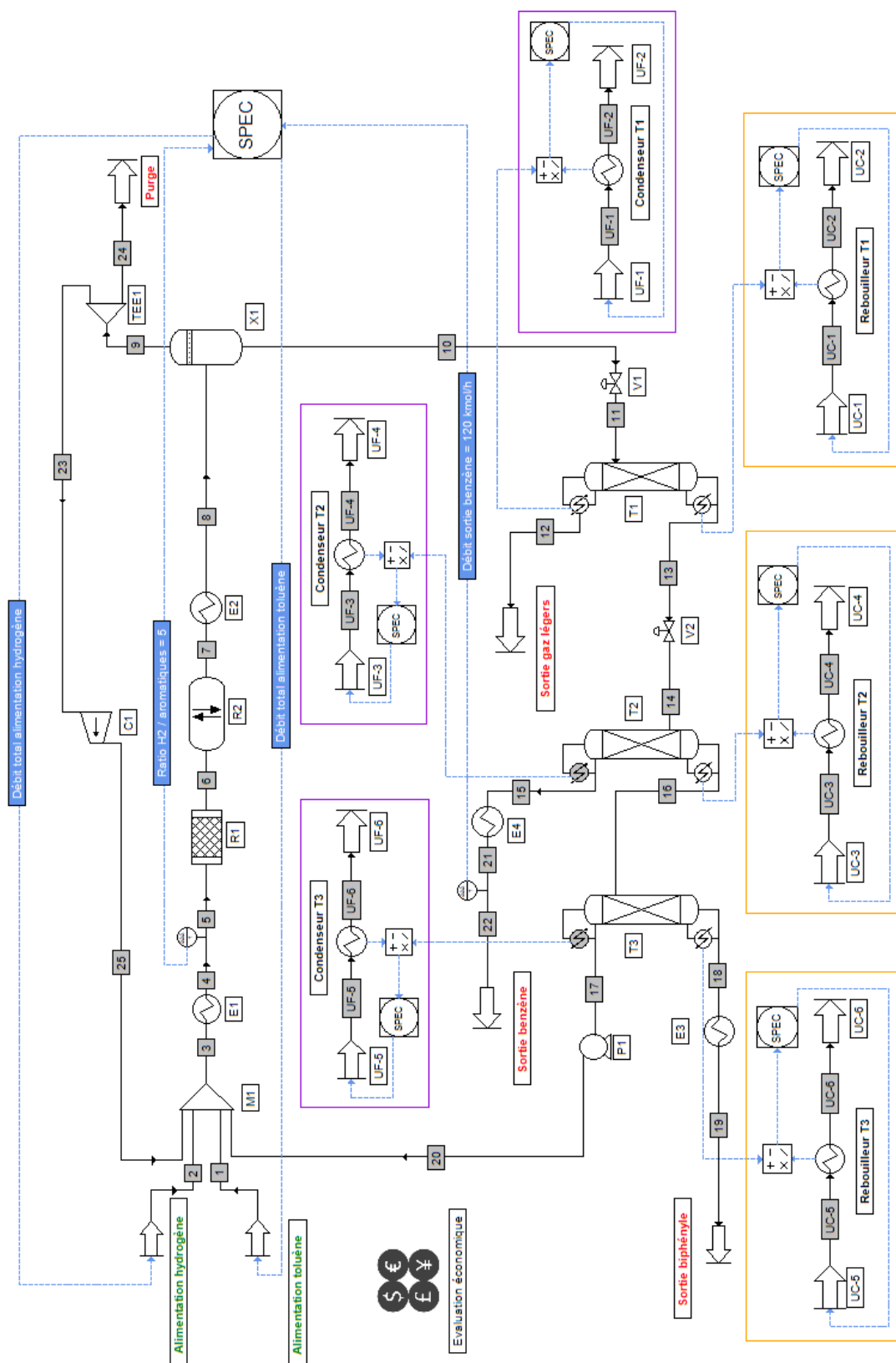
☒ Débit total du courant

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

Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

## 2.2. Schéma du procédé



*Schéma de l'unité d'hydrodésalkylation du toluène*

Pour améliorer la lisibilité du schéma du procédé, les entrées et sorties (hors utilités) sont respectivement en caractères verts et rouges, les parties du schéma représentant les condenseurs et rebouilleurs des colonnes sont respectivement encadrées en violet et en orange.

### 2.3. Constituants

Les constituants pris en considération dans cet exemple sont listés dans le tableau ci-dessous.

Nom	Formule chimique	Numéro CAS
Hydrogène	H <sub>2</sub>	1333-74-0
Méthane	CH <sub>4</sub>	74-82-8
Benzène	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	71-43-2
Toluène	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	108-88-3
Biphényle	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	92-52-4
Eau	H <sub>2</sub> O	7732-18-5

L'eau est considérée uniquement en tant qu'utilité et n'est pas en contact avec les autres constituants.

### 2.4. Modèle thermodynamique

Le système considéré contient des hydrocarbures et dérivés d'hydrocarbures ainsi que de l'hydrogène. La pression de travail ne dépasse jamais 100 bars. En conséquence le modèle SRK [SOA72] a été choisi. Les coefficients d'interaction binaire de la base de données de ProSim ont été utilisés.

Un deuxième calculator nommé « Eau pure » est utilisé pour modéliser les utilités chaudes et froides (UC et UF). Il contient uniquement le constituant « WATER » et est donc défini avec un profil thermodynamique « Eau pure » (basé sur les tables de vapeur NBS / NRC).



2.5. Réactions chimiques

Dans le réacteur d'hydrodésalkylation, la réaction suivante a lieu :

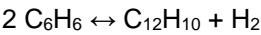


Dans ce réacteur, le taux de conversion du toluène est de 0,75 (75%).

Sous ProSimPlus, cette réaction est modélisée dans le module « Réacteur simple » (R1) et a été définie comme suit :

Réaction	C7H8 + H2 → C6H6 + CH4
Type de réaction	Contrôlée
Modèle cinétique	Instantané
Chaleur de réaction (kJ/mol)	-50

Il se produit également une réaction secondaire produisant du biphenyle à partir du benzène :



Pour modéliser cette réaction, le module « Réacteur de GIBBS » (R2) a été utilisé. La méthode sélectionnée est la minimisation de l'énergie libre de Gibbs. L'état physique des constituants est vapeur.

La décomposition atomique saisie dans le réacteur R2 est la suivante :

Décomposition atomique des constituants

Choix des constituants inertes

☐ HYDROGEN

☒ METHANE

☐ BENZENE

☒ TOLUENE

☐ BIPHENYL

☒ WATER

Tous

Aucun

Colonnes :

☒ C

☒ H

☒ CH4

☒ C7H8

☒ H2O

C	H	CH4	C7H8	H2O
0	2	0	0	0
0	0	1	0	0
6	6	0	0	0
0	0	0	1	0
12	10	0	0	0
0	0	0	0	1

OKAnnuler

2.6. Conditions opératoires

L'ensemble des conditions opératoires nécessaires à la définition du procédé est résumé dans cette partie, les données en vert sont des valeurs d'initialisation :

✓ Alimentation hydrogène

	Alimentation hydrogène
Fraction molaire H <sub>2</sub>	0,95
Fraction molaire CH <sub>4</sub>	0,05
Débit molaire total (kmol/h)	200
Température (°C)	37,85
Pression (bar)	37

✓ Alimentations toluène

	Alimentation toluène
Fraction molaire C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	1
Débit molaire total (kmol/h)	150
Température (°C)	37,85
Pression (bar)	37

✓ Utilités froides (UF) et utilités chaudes (UC)

	Condenseur T1 UF-1	Condenseur T2 UF-3	Condenseur T3 UF-6	Rebouilleur T1 UC-1	Rebouilleur T2 UC-3	Rebouilleur T3 UC-6
Fraction massique H <sub>2</sub> O	1	1	1	1	1	1
Débit massique total (t/h)	1	100	100	10	10	10
Pression (bar)	1	1	1	15	5	60
Température (°C)	15	15	15	Température de rosée	Température de rosée	Température de rosée

✓ Réacteurs

Paramètres de fonctionnement	Réacteur R1	Réacteur R2
------------------------------	-------------	-------------

Type de réacteur	Simple	GIBBS
Jeu de réaction	Hydrodésalkylation	-
Température en sortie (°C)	684	Température d'entrée
Pression en sortie (bar)	34,5	Pression d'entrée

✓ Séparateur

Paramètres de fonctionnement	Flash X1
Type de séparateur	Séparateur diphasique liquide-vapeur
Température (°C)	38
Pression (bar)	32

✓ Colonnes

Paramètres de fonctionnement	Colonne à distiller T1	Colonne à distiller T2	Colonne à distiller T3
Type de colonne	Colonne à distiller diphasique avec condenseur partiel	Colonne à distiller diphasique avec condenseur total	Colonne à distiller diphasique avec condenseur total
Nombre d'étages théoriques	10	40	7
Étage d'alimentation	2	20	2
Débit de distillat (kmol/h) : vapeur (condenseur partiel) liquide (condenseur total)	0,05*	120	Calculé
Taux molaire de reflux	0,05	1,3	0,06
Quantité de chaleur à fournir au rebouilleur (kcal/h)	Calculée	Calculée	353 943
Pression en tête de colonne (bar)	10,2	1,5	2
Pression en pied de colonne (bar)	10,2	2	2
Efficacité des plateaux	1	1	1

\* : Ramené à 1 kmol/h de débit des alimentations

Spécification complémentaire pour la colonne T1 :

Spécification	Type de produit	Constituant	Valeur	Type	Action
Pureté	Distillat vapeur	BENZENE	0,01	Molaire	Débit de distillat vapeur

Spécifications complémentaires pour la colonne T2 :

Spécification	Type de produit	Constituant	Valeur	Type	Action
Pureté	Distillat liquide	BENZENE	0,995	Molaire	Débit de distillat liquide

✓ Échangeurs de chaleur

Nom	Type	Température de sortie (°C)	Perte de charge (bar)
E1	Consignateur de température	650	1
E2	Consignateur de température	38	0,5
E3	Consignateur de température	38	0,2
E4	Consignateur de température	30	0,5
Condenseur T1	Consignateur de température	25	0
Condenseur T2	Consignateur de température	25	0
Condenseur T3	Consignateur de température	25	0
Rebouilleur T1	Consignateur de température	Température de bulle	0
Rebouilleur T2	Consignateur de température	Température de bulle	0
Rebouilleur T3	Consignateur de température	Température de bulle	0

✓ Compresseur

Paramètres de fonctionnement	Compresseur C1
Pression de refoulement (bar)	37
Efficacité isentropique	0,65
Efficacité mécanique	1

✓ Pompe

Paramètres de fonctionnement	P1
Pression de refoulement (bar)	37
Efficacité volumétrique	0,65
Efficacité mécanique	1

✓ Mélangeur

Paramètre de fonctionnement	M1
Pression de sortie (bar)	Egale à la plus faible des alimentations

✓ *Vannes de détente*

<b>Paramètre de fonctionnement</b>	<b>V1</b>	<b>V2</b>
<b>Pression de sortie (bar)</b>	10,2	1,8

✓ *Diviseur de courant*

<b>Paramètre de fonctionnement</b>	<b>TEE1</b>
<b>Taux de partage courant 23</b>	0,92
<b>Pression de sortie (bar)</b>	Egale à la pression d'entrée

## 2.7. Dimensionnement du ballon et des colonnes à distiller

ProSimPlus permet de dimensionner certains équipements tels que les ballons et colonnes à distiller. Ce dimensionnement sera particulièrement utile lors de l'évaluation économique avec la MPE.

### 2.7.1. Dimensionnement du ballon X1

Pour dimensionner le ballon X1, il faut ouvrir la fenêtre d'édition du module X1 et sélectionner le sous-onglet « Dimensionnement » situé au niveau de l'onglet « Paramètres ». Il faut ensuite cocher la case « Dimensionnement » et définir la configuration du ballon. Comme illustré à la page suivante, un ballon tampon vertical a été choisi.

Il faut ensuite cliquer sur le bouton « Paramètres du ballon... » et saisir les paramètres nécessaires au dimensionnement tel qu'indiqué à la page suivante.

Tous les paramètres ont été laissés par défaut hormis :

- Type de temps séjour : Total
- Rapport (H/D) : 3
- Type d'acier : SA 285 C

**Séparateur diphasique liquide-vapeur (SFLAS)**

Nom: X1

Desc :

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes Paramètres avancés

Conditions opératoires **Dimensionnement**

☒ Dimensionnement

Configuration

Type de ballon: Ballon tampon

Disposition: Vertical

Paramètres du ballon...

Paramètres numériques...

OK Annuler

**Paramètres du ballon**

**Caractéristiques du ballon**

Type de ballon: Ballon tampon

Disposition: Vertical

Type de temps de séjour: Total

Temps de rétention total: 0.333333333 h

Distance min. entre le niveau maxi et l'alimentation (Hf): 0.45 m

Coefficient min.  $\beta$ : 1.2

Distance niveau mini (Hb): 0.15 m

**Contrainte de dimension**

Type de contrainte: Diamètre et hauteur calculés

Rapport (H/D): 3

**Calcul de l'épaisseur**

Coefficient de soudure: 1

Surépaisseur de corrosion: 0.003 m

Définition de la contrainte maximum: Base de données

Type d'acier: SA 285 C

**Paramètres de la jupe**

☐ Présence d'une jupe

Hauteur de la jupe: 1 m

Epaisseur de la jupe: 0.008 m

OK Annuler

### 2.7.2. Dimensionnement des colonnes T1, T2 et T3

De même que dans le cas des ballons, pour dimensionner les colonnes, il faut ouvrir leur fenêtre d'édition et sélectionner le sous-onglet « Dimensionnement / Vérification » situé au niveau de l'onglet « Paramètres ». Sélectionner ensuite le type de dimensionnement « Recherche d'un diamètre minimum » ainsi que la configuration suivante pour les 3 colonnes :

Alimentation(s)/Soutirage(s) Conditions opératoires Spécifications complémentaires **Dimensionnement / Vérification**

☒ Dimensionnement / Vérification

Type de spécification

☒ Dimensionnement : Recherche de diamètre minimum

☐ Dimensionnement : Perte de charge imposée

☐ Vérification : Colonne existante

☒ Méthode automatique de découpage de sections

☒ Méthode automatique de détermination des étages dimensionnants

Liste des internes Sections Etage dimensionnant

Interne	Actif	Début	Fin	Etage	Propriétés	Engorgement	Options
1	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	0	Editer...	0,6	Editer...

Jupe... Calcul de l'épaisseur...

Les paramètres par défaut sont utilisés pour la configuration de la jupe de la colonne.

L'acier SA 85 C est utilisé pour les 3 colonnes. Pour le définir, il suffit de choisir l'acier dans la liste de la base de données. Le type d'acier et la surépaisseur de corrosion sont des paramètres utilisés dans le calcul de l'épaisseur de la virole et des fonds des colonnes.

Epaisseur

Calcul de l'épaisseur


Surépaisseur de corrosion 0.003 m

Définition de la contrainte maximum Base de données

Type d'acier SA 285 C

OK Annuler



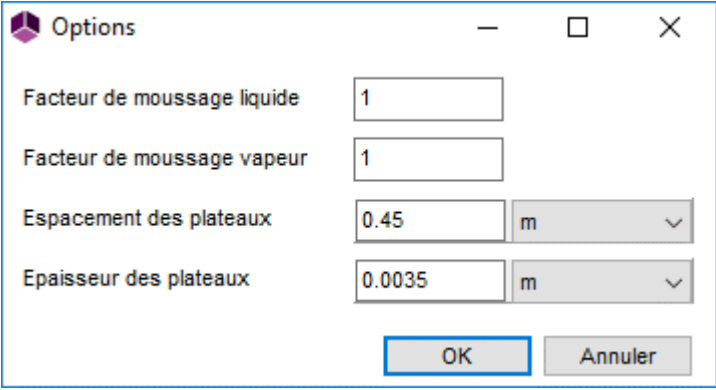
Pour ajouter un interne dans la liste des internes, cliquer sur « Ajouter » . Les informations à renseigner, en cliquant sur le bouton « Editer... » au niveau des rubriques « Propriétés » et « Options », pour les différentes colonnes sont les suivantes :

### Colonne T1 :

Rubrique « Propriétés » :

Type d'interne : sélectionner « Plateaux à clapets Nutter » en laissant les paramètres par défaut.

Rubrique « Options » : renseigner la configuration ci-après :



Options

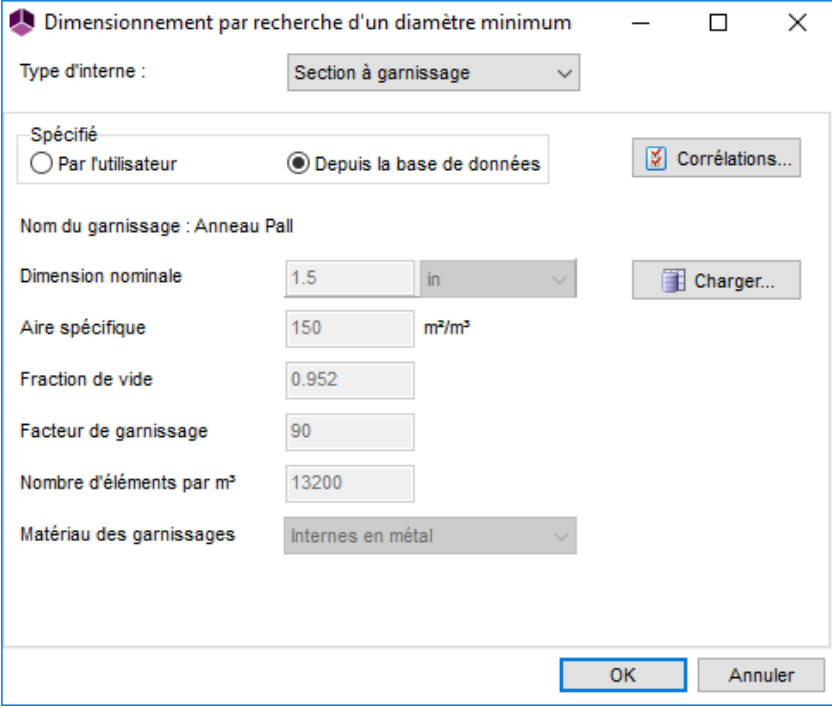
Facteur de moussage liquide	1
Facteur de moussage vapeur	1
Espacement des plateaux	0.45 m
Epaisseur des plateaux	0.0035 m

OK Annuler

### Colonne T2 :

Rubrique « Propriétés » :

Type d'interne : sélectionner « Sections à garnissage ». Le garnissage est directement chargé depuis la base de données (bouton « Charger ») :

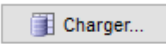


Dimensionnement par recherche d'un diamètre minimum

Type d'interne : Section à garnissage

Spécifié  
☐ Par l'utilisateur ☒ Depuis la base de données ☒ Corrélations...

Nom du garnissage : Anneau Pall

Dimension nominale 1.5 in 

Aire spécifique 150 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Fraction de vide 0.952

Facteur de garnissage 90

Nombre d'éléments par m<sup>3</sup> 13200

Matériau des garnissages Internes en métal

OK Annuler

Le garnissage utilisé est : « Anneau Pall / 1,5 in / métal ».

**Sélection d'un garnissage de la section**

Sélectionner le garnissage à importer

#	Type	Numéro	Matériau	Dimension nomi...	Dimension nomin...	Aire spécifique (m²/m³)	Fraction de vid...	Facteur
5	Anneau Pall	#1,5	métal	1.5	38.1	150	0.952	90
6	Anneau Pall	#2	métal	2	50.8	110	0.952	65
7	Anneau Pall	#2,3	métal	2.3	58.42	105	0.97	64.25
8	Anneau Pall	#3,1	métal	3.1	80	78	0.96	52.71
9	Anneau Pall	#3,5	métal	3.5	88.9	54	0.97	50
10	Anneau Pall	#1	plastique	1	25.4	220	0.89	170
11	Anneau Pall	#1,4	plastique	1.4	35.56	160	0.905	127.05
12	Anneau Pall	#2	plastique	2	50.8	110	0.92	80
13	Anneau Pall	#3,5	plastique	3.5	88.9	86	0.92	50
14	Anneau Pall	#1	céramique	1	25.4	220	0.73	350
15	Anneau Pall	#2	céramique	2	50.8	120	0.77	142
16	Selle Intalox	#1/4	céramique	0.25	6.35	984	0.65	2380
17	Selle Intalox	#3/8	céramique	0.375	9.525	850	0.67	1030
18	Selle Intalox	#1/2	céramique	0.5	12.7	623	0.71	655
19	Selle Intalox	#3/4	céramique	0.75	19.05	335	0.73	475
20	Selle Intalox	#1	céramique	1	25.4	197	0.704	300
21	Selle Intalox	#1,5	céramique	1.5	38.1	133	0.743	170
22	Selle Intalox	#2	céramique	2	50.8	99	0.77	130
23	Selle Intalox	#3	céramique	3	76.2	92	0.79	72
24	Selle Intalox	#1/2	plastique	0.5	12.7	622	0.83	221.06
25	Selle Intalox	#3/4	plastique	0.75	19.05	335	0.89	166.25
26	Selle Intalox	#1	plastique	1	25.4	255	0.89	131
27	Selle Intalox	#1,5	plastique	1.5	38.1	170	0.91	102.12
28	Selle Intalox	#2	plastique	2	50.8	120	0.91	92
29	Selle Intalox	#3	plastique	3	76.2	105	0.93	59
30	Anneau Hiflow	#1	métal	1	25.4	202.9	0.962	0
31	Anneau Hiflow	#1,1	métal	1.1	28	185	0.965	0
32	Anneau Hiflow	#2	métal	2	50.8	92.3	0.977	52

OK Annuler

En cliquant sur le bouton « Corrélations », l'utilisateur peut définir les corrélations utilisées pour le calcul de l'engorgement, des pertes de charge, de la rétention liquide, du débit de mouillage et de la HEPT.

Rubrique « Corrélations » : renseigner la configuration ci-après :

**Corrélations**

Calculs...

Engorgement Eckert

Pertes de charge Eckert

Rétention liquide Mersmann et Deixler

Débit minimum de mouillage Standard

HEPT HEPT fournie

valeur HEPT 0.487 m

OK Annuler

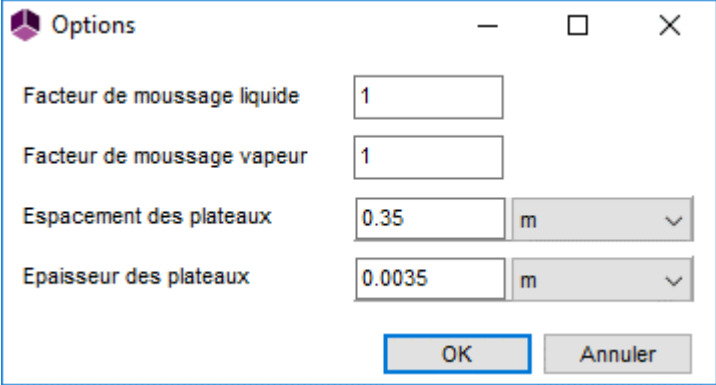
Rubrique « Options » : laisser les options par défaut.

### Colonne T3 :

Rubrique « Propriétés » :

Type d'interne : sélectionner « Plateaux à clapets Nutter » en laissant les paramètres par défaut.

Rubrique « Options » : renseigner la configuration ci-après :



Paramètre	Valeur	Unité
Facteur de moussage liquide	1	
Facteur de moussage vapeur	1	
Espace des plateaux	0.35	m
Epaisseur des plateaux	0.0035	m

### 2.7.3. Détermination des consommations d'utilités pour les condenseurs et rebouilleurs des colonnes T1, T2 et T3

Les condenseurs et rebouilleurs des colonnes ont été simulés à l'aide de consigneurs de température. Les caractéristiques physiques d'alimentation des utilités employées sont regroupées dans le tableau de la partie **2.6 Conditions opératoires**.

On utilise ainsi de l'eau liquide à 15°C et pression atmosphérique dans les condenseurs et de la vapeur saturée à différents niveaux de pression dans les rebouilleurs.

En sortie de condenseur, on impose que l'eau atteigne 25°C. Au niveau des rebouilleurs, on souhaite utiliser intégralement et uniquement la chaleur de vaporisation. Pour ce faire, on impose que la sortie soit à la température de bulle. La figure suivante illustre la configuration saisie au niveau du condenseur et du rebouilleur de la colonne T1 :

Consignateur de température (STC...

Nom: Condenseur T1

Desc :

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes

Température de sortie

Fournie par l'utilisateur

Température 25 °C

Incrément de température 0 K

☐ Utilité

Editer l'utilité

Quantité de chaleur spécifiée 0 kcal/h

Perte de charge 0 atm

☐ Tabulation de la température en fonction de la quantité de chaleur échangée

Type de Flash Flash (T - P)

Nombre de points à calculer 10

OK Annuler

Consignateur de température (STC...

Nom: Rebouilleur T1

Desc :

Identification Paramètres Scripts Rapport Courants Notes

Température de sortie

Egale à la température de bulle

Incrément de température 0 K

☐ Utilité

Editer l'utilité

Quantité de chaleur spécifiée 0 kcal/h

Perte de charge 0 atm

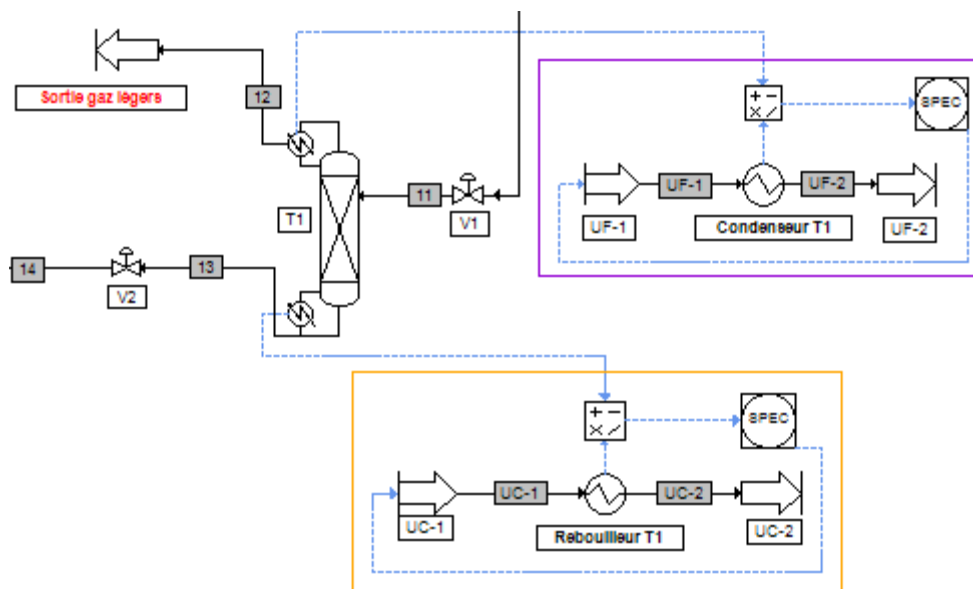
☐ Tabulation de la température en fonction de la quantité de chaleur échangée

Type de Flash Flash (T - P)

Nombre de points à calculer 10

OK Annuler

Pour déterminer les débits d'utilité nécessaires, on utilise un module SPEC comme illustré ci-après dans le cas de la colonne T1 :



La démarche est identique pour les rebouilleurs et condenseurs des différentes colonnes : on récupère les valeurs de quantités de chaleur au rebouilleur (respectivement au condenseur) du module colonne et du module consignateur de température associé à l'aide de courants d'information que l'on relie à un module manipulateur de courant d'information comme présenté ci-après dans le cas du rebouilleur de la colonne T1 :

Courant information (\$ISTR16)

Nom:

Desc:

Identification

Paramètres

Notes

Nature de l'information à émettre:

☒ Quantité de chaleur au bouilleur

Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "T1"

Début:

Fin:

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 "Q/Qb + 1 (T1)"

Début:

Fin:

OK

Annuler

Courant information (\$ISTR10)

Nom:

Desc:

Identification

Paramètres

Notes

Nature de l'information à émettre:

☒ Quantité de chaleur nécessaire pour atteindre la te...

Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Rebouilleur T1"

Début:

Fin:

Nature de l'information à récupérer:

☒ Valeur du facteur multiplicatif (A)

Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "Q/Qb + 1 (T1)"

Début:

Fin:

OK

Annuler

On souhaite calculer à l'intérieur du module manipulateur de courant d'information l'écart entre le rapport de la quantité de chaleur au rebouilleur (respectivement au condenseur) de la colonne sur la quantité de chaleur calculée au niveau du module consignateur de température associé et 1.

Les quantités de chaleur au rebouilleur et au condenseur sont positives et les quantités de chaleur des consignateurs de température associés sont respectivement négative et positive. Ainsi il faut faire attention aux signes lors de la configuration des modules manipulateur de courant d'information selon que l'on est dans le cas du rebouilleur ou du condenseur comme illustré ci-après :

Rebouilleur

Manipulateur de courant d'informati...

Nom:

Desc:

Identification

Paramètres

Scripts

Rapport

Courants

Notes

$Sortie = A * Entrée^P + B - C$

Valeur de A

Valeur de B

Valeur de C

Puissance

☐ Valeur réelle

☒ Valeur entière

OK

Annuler

Condenseur

Manipulateur de courant d'informati...

Nom:

Desc:

Identification

Paramètres

Scripts

Rapport

Courants

Notes

$Sortie = A * Entrée^P + B - C$

Valeur de A

Valeur de B

Valeur de C

Puissance

☐ Valeur réelle

☒ Valeur entière

OK

Annuler

L'écart entre le rapport de la quantité de chaleur au rebouilleur (respectivement au condenseur) de la colonne sur celle calculée au niveau du module consignateur de température associé et 1 est envoyé au niveau d'un module SPEC. Ce module SPEC est relié au module d'alimentation de l'utilité par un courant d'information configuré ainsi :

Ainsi le module SPEC va ajuster le débit d'utilité pour que l'écart entre le ratio des quantités de chaleur et 1 s'annule. Le module consignateur de température représentera alors le rebouilleur (respectivement le condenseur) et le débit d'utilité calculé correspondra au débit d'utilité circulant dans le rebouilleur ou le condenseur. Les débits massiques obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

	<b>Condenseur T1 UF-1</b>	<b>Condenseur T2 UF-3</b>	<b>Condenseur T3 UF-5</b>	<b>Rebouilleur T1 UC-1</b>	<b>Rebouilleur T2 UC-3</b>	<b>Rebouilleur T3 UC-6</b>
<b>Débit massique (kg/h)</b>	774	199 611	32 881	2 095	2 840	943

### 3. RESULTATS DE LA SIMULATION

#### 3.1. Commentaires sur les résultats

La séquence de calcul (l'ordre de calcul des modules) est générée automatiquement. Le courant coupé « 5 » est initialisé avec les caractéristiques suivantes :

	<b>Courant coupé « 5 »</b>
<b>Fraction molaire H<sub>2</sub></b>	0,36
<b>Fraction molaire CH<sub>4</sub></b>	0,57
<b>Fraction molaire C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b>	0,005
<b>Fraction molaire C<sub>7</sub>H<sub>8</sub></b>	0,065
<b>Débit molaire total (kmol/h)</b>	2600
<b>Température (°C)</b>	650
<b>Pression (bar)</b>	36

Deux débits d'entrée sont ajustés afin d'atteindre les bonnes conditions opératoires pour la réaction d'hydrodésalkylation (ratio molaire d'hydrogène sur aromatiques de 5 %) ainsi que la production de 120 kmol/h de benzène à une pureté molaire de 99,5 %.

Les débits d'alimentation nécessaires sont de 199,6 kmol/h d'hydrogène et 127,9 kmol/h de toluène.

### 3.2. 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.

#### Courants entrées/sorties (hors utilités) :

Courants		1	2	12	19	22	24
De		Alimentation toluène	Alimentation hydrogène	T1	E3	Mesure 2	TEE1
Vers		M1	M1	Sortie gaz légers	Sortie biphenyle	Sortie benzène	Purge
Débits partiels		kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h
HYDROGEN		0	189,6	0,8	0	0	64,8
METHANE		0	10,0	8,4	0	0	128,7
BENZENE		0	0	0,09	3E-07	119,4	1,5
TOLUENE		127,9	0	4E-03	1,3E-01	0,6	0,2
BIPHENYL		0	0	1E-09	3,0	0	3E-05
WATER		0	0	0	0	0	0
Débit total	kmol/h	127,9	199,6	9,2	3,1	120,0	195,1
Fractions molaires							
HYDROGEN		0	0,95	0,082	0	0	0,332
METHANE		0	0,05	0,908	0	0	0,659
BENZENE		0	0	1,0E-02	1E-07	0,995	8E-03
TOLUENE		1	0	4E-04	0,041	0,005	9E-04
BIPHENYL		0	0	1E-10	0,959	0	2E-07
WATER		0	0	0	0	0	0
Etat physique		Liquide	Vapeur	Vapeur	Liquide	Liquide	Vapeur
Température	°C	37,85	37,85	18,75	38	30	38
Pression	bar	37	37	10,2	1,8	1	32
Flux enthalpique	kcal/h	-1 095 998	18 343	-849	-44 548	-940 762	8 135
Fraction molaire vapeur		0	1	1	0	0	1

#### Courants entrées/sorties (utilités chaudes) :

Courants		UC-1	UC-2	UC-3	UC-4	UC-5	UC-6
De		UC-1	Rebouilleur T1	UC-3	Rebouilleur T2	UC-5	Rebouilleur T3
Vers		Rebouilleur T1	UC-2	Rebouilleur T2	UC-4	Rebouilleur T3	UC-6
Débits partiels		kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h
WATER		116,3	116,3	157,6	157,6	52,3	52,3
Débit total	kmol/h	116,3	116,3	157,6	157,6	52,3	52,3
Fractions molaires							
WATER		1	1	1	1	1	1
Etat physique		Vapeur	Liquide	Vapeur	Liquide	Vapeur	Liquide
Température	°C	198,3	198,3	151,9	151,9	275,6	275,6
Pression	bar	15	15	5	5	60	60
Flux enthalpique	kcal/h	122 186	-852 310	136 547	-1 294 340	53 300	-300 643
Fraction molaire vapeur		1	0	1	0	1	0



## Courants entrées/sorties (utilités froides) :

Courants		UF-1	UF-2	UF-3	UF-4	UF-5	UF-6
De		UF-1	Condenseur T1	UF-3	Condenseur T2	UF-5	Condenseur T3
Vers		Condenseur T1	UF-2	Condenseur T2	UF-4	Condenseur T3	UF-6
Débits partiels		kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h	kmol/h
WATER		42,9	42,9	11 080,1	11 080,1	1 825,2	1 825,2
Débit total	kmol/h	42,9	42,9	11080,1	11080,1	1825,2	1825,2
Fractions molaires							
WATER		1	1	1	1	1	1
Etat physique		Liquide	Liquide	Liquide	Liquide	Liquide	Liquide
Température	°C	15	25	15	25	15	25
Pression	bar	1	1	1	1	1	1
Flux enthalpique	kcal/h	-459 378	-451 643	-118 526 712	-116 531 022	-19 524 602	-19 195 857
Fraction molaire vapeur		0	0	0	0	0	0

### 3.3. 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, sous ProSimPlus, les étages des colonnes sont numérotés de haut en bas (le premier plateau correspond au condenseur, le dernier au rebouilleur).

Colonne à distiller (\$COLD2)

Nom: T1

Desc :

Identification

Paramètres

Scripts

Rapport

Courants

Profils

Notes

Paramètres avancés

Nom	Description
T1 - Profil de température	Profil de température dans la colonne
T1 - Profil de pression	Profil de pression dans la colonne
T1 - Fractions molaires liquide	Profil des fractions molaires liquide dans la colonne
T1 - Fractions molaires vapeur	Profil des fractions molaires vapeur dans la colonne
T1 - Fractions massiques liquide	Profil des fractions massiques liquide dans la colonne
T1 - Fractions massiques vapeur	Profil des fractions massiques vapeur dans la colonne
T1 - Enthalpies	Profil des enthalpies dans la colonne
T1 - Débits molaires	Profil des débits molaires dans la colonne
T1 - Débits massiques	Profil des débits massiques dans la colonne
T1 - Débits volumiques	Profil des débits volumiques dans la colonne

Graphe...

Valeurs...

Options du graphe

☐ Intervertir les axes

☐ Inverser l'axe X

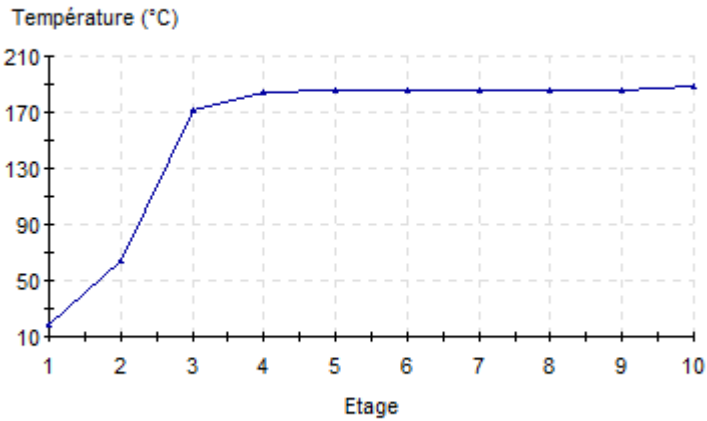
☐ Inverser l'axe Y

OK

Annuler

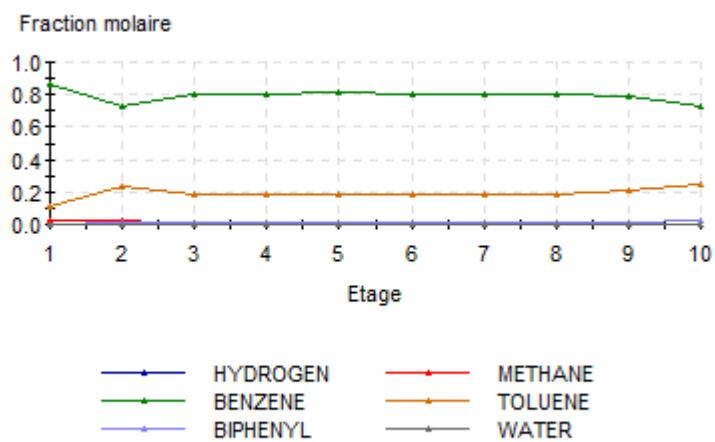
Colonne T1

T1 - Profil de température



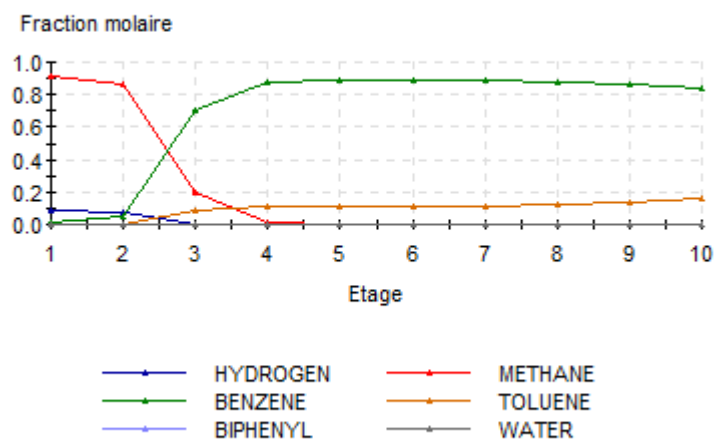
Profil de température dans la colonne

### T1 - Fractions molaires liquide



Profil des fractions molaires liquide dans la colonne

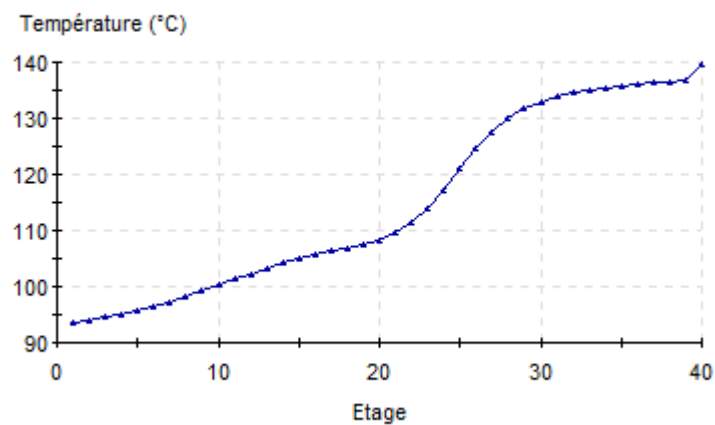
### T1 - Fractions molaires vapeur



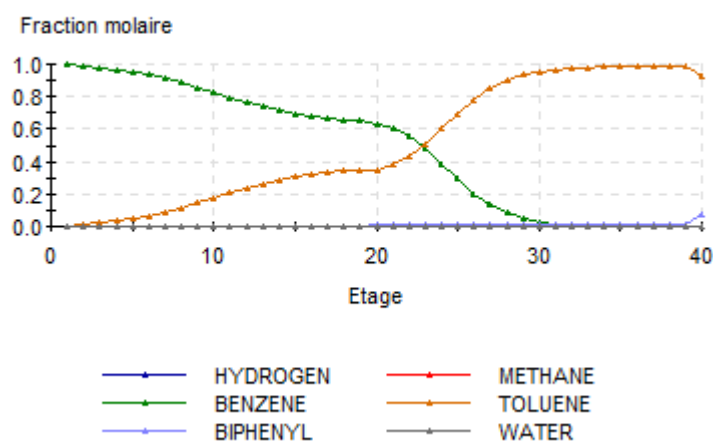
Profil des fractions molaires vapeur dans la colonne

## Colonne T2

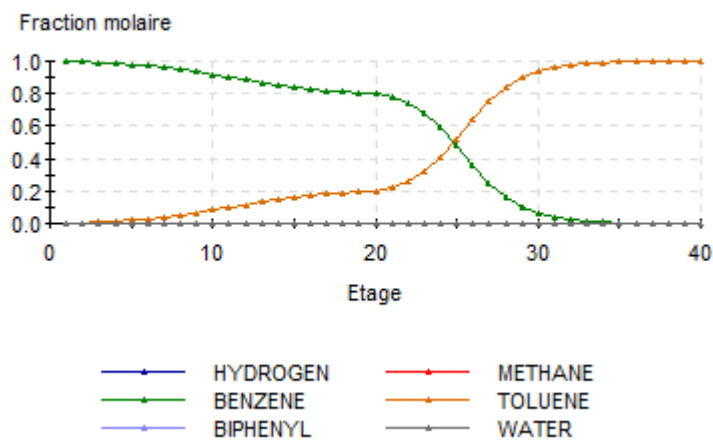
### T2 - Profil de température



### T2 - Fractions molaires liquide

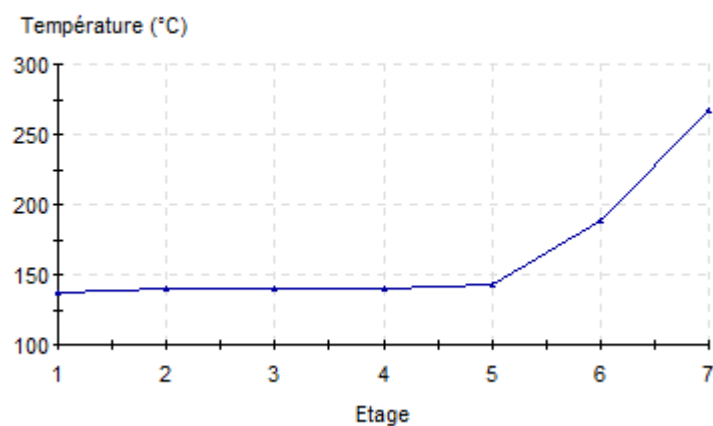


### T2 - Fractions molaires vapeur

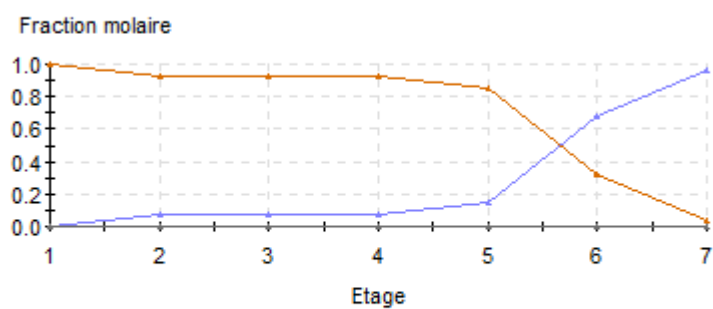


## Colonne T3

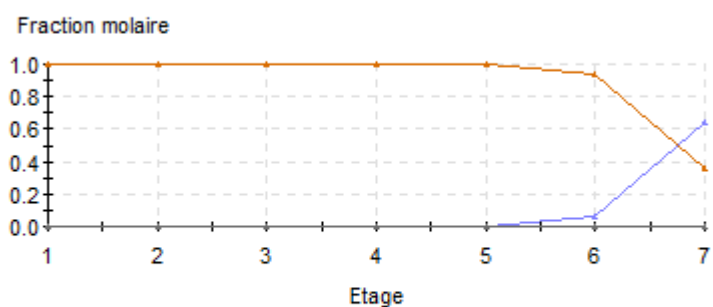
### T3 - Profil de température



### T3 - Fractions molaires liquide



### T3 - Fractions molaires vapeur



### 3.4. Résultats des dimensionnements

Les résultats de dimensionnement des modules concernés sont visualisables dans le rapport de simulation. Ce qui suit présente uniquement les résultats qui seront utilisés pour l'évaluation économique.

Ballon X1 :

<b>Hauteur (m)</b>	5,1
<b>Diamètre (m)</b>	1,7
<b>Epaisseur (mm)</b>	30,8

Colonne T1 :

<b>Diamètre intérieur (m)</b>	1,022
<b>Diamètre extérieur (m)</b>	1,050
<b>Hauteur (m)</b>	4,05
<b>Epaisseur (mm)</b>	14

Colonne T2 :

<b>Diamètre intérieur (m)</b>	1,288
<b>Diamètre extérieur (m)</b>	1,300
<b>Hauteur (m)</b>	19
<b>Epaisseur virole (mm)</b>	6

Colonne T3 :

<b>Diamètre intérieur (m)</b>	0,69
<b>Diamètre extérieur (m)</b>	0,70
<b>Hauteur (m)</b>	2,45
<b>Epaisseur virole (mm)</b>	5

## 4. EVALUATION ECONOMIQUE

L'évaluation économique sous ProSimPlus, traite des aspects suivants :

- Calcul du coût d'**investissement initial** et **secondaire** des équipements
- Calcul des **valeurs résiduelles** des équipements à la fin de l'horizon de temps
- Calcul des **coûts de maintenance** des équipements
- Calcul des **gains et coûts d'exploitation**
- Calcul de différents **indicateurs économiques**
- Etablissement d'un **échancier**
- Tracé des **profils d'indicateurs économiques**

Les indicateurs économiques comprennent les grandeurs suivantes :

- **Temps de récupération**
- **Taux de rentabilité interne**
- **Valeurs résiduelles des équipements**
- **Bénéfice actualisé du procédé**
- **Valeur actualisée nette du procédé**

Cette évaluation économique s'effectue en plaçant sur le flowsheet le module totalisateur « Evaluation économique » tel que représenté sur la figure suivante :



Cette partie décrit les paramètres retenus pour l'évaluation économique et les résultats correspondants.

## 4.1. Paramètres généraux de l'évaluation économique

Les paramètres généraux saisis dans le cadre de cet exemple sont visualisables ci-dessous :

The screenshot shows the 'Economic evaluation (\$COST)' dialog box with the 'Général' tab selected. The 'Nom' field contains 'Economic evaluation'. The 'Desc' field is empty. The 'Mode de calcul' section has 'Post-run' selected. The 'Devises' section shows 'Devise du rapport' as '€' and 'Facteur de conversion de € vers devise du rapport' as '1'. The 'Paramètres économiques' section shows 'Taux d'actualisation' as '4 %', 'Taux d'imposition' as '40 %', and 'Fonds de roulement' as '1000000 €'. The 'Temps' section shows 'Temps de fonctionnement annuel de l'usine' as '8766 h/an' and 'Horizon de temps' as '20 an(s)'. The 'Niveau de log' is set to 'Aucun'. There are 'OK' and 'Annuler' buttons at the bottom right.

Dans cet exemple, aucun paramètre du module d'évaluation économique (COST) n'étant utilisé en optimisation, le mode « Post-run » a été choisi. La devise d'impression des résultats par défaut (€) a été conservée. Le temps de fonctionnement annuel de l'usine correspond au maximum saisissable (une marche continue 24h/24 pendant 365,25 jours/an). Pour plus de détails sur les définitions des paramètres généraux, se référer à l'aide en ligne de ProSimPlus.

Les paramètres avancés choisis dans le cadre de cet exemple sont les suivants :

The screenshot shows the 'Paramètres avancés' dialog box. It contains a table with four rows: 'Investissement', 'Gain d'exploitation', 'Coût d'exploitation', and 'Maintenance'. Each row has a dropdown menu set to 'Courante'. The title bar says 'Paramètres avancés'. There are 'OK' and 'Annuler' buttons at the bottom right.



## 4.2. Coût d'investissement initial des équipements

Deux méthodes sont disponibles dans ProSimPlus pour effectuer le calcul du coût d'investissement initial des équipements. Ces méthodes (Méthode des Modules Fonctionnels, notée MMF, et Méthode Pré-Estime, notée MPE) sont présentées dans le « Manuel d'évaluation économique des procédés – Nouvelle édition revue et augmentée » de CHAUVEL *et al.* [CHA01].

Elles permettent de calculer :

- Les **prix de base** des équipements (prix **avant** application de facteurs correctifs liés notamment au type, au matériau, à la gamme de fonctionnement de l'équipement)
- Les **prix réels non montés** des équipements (prix **après** application des facteurs correctifs évoqués précédemment et **avant** l'ajout du surcoût dû au **montage**)
- Les **prix réels montés** des équipements (prix réel **après** application du surcoût dû au **montage** avec application d'un facteur correctif de taille dans le cas de la MPE)
- Les **prix des catégories d'équipements** (somme des prix réels montés des équipements d'une catégorie).

Dans le cadre de cet exemple, l'évaluation économique a été menée en utilisant chacune des deux méthodes.

La plupart des données nécessaires à l'utilisation de ces deux méthodes sont déjà pré renseignées avec des valeurs par défaut dès le placement du module « Evaluation économique » sur le flowsheet. Certaines données doivent être fournies par l'utilisateur, c'est notamment le cas pour celles relatives au dimensionnement des équipements dans le cadre de la MPE ou dans le cadre d'utilisation de matériau spécifique pour un équipement.

Dans cet exemple, tous les modules présents sur le flowsheet à l'exception des alimentations, des mesures, des vannes, du mélangeur et du diviseur de courants sont pris en compte pour le calcul de l'investissement initial. Les modules pris en compte sont regroupés dans le tableau suivant :

Modules pris en compte
C1
Condenseur T1
Condenseur T2
Condenseur T3
E1
E2
E3
E4
P1
R1 + R2
Rebouilleur T1
Rebouilleur T2
Rebouilleur T3
T1
T2
T3
X1

**Remarque** : Le réacteur du procédé est simulé à l'aide de deux modules (un module réacteur simple et un module réacteur équilibré). Ces deux modules représentent en réalité un seul réacteur. Ainsi, dans le cadre de l'évaluation économique, le prix du réacteur est évalué en ne considérant qu'un seul module noté dans ce qui suit R1 + R2.

#### 4.2.1. Méthode des Modules Fonctionnels (MMF)

La MMF a pour avantage de ne pas nécessiter de données de dimensionnement pour les équipements. Elle utilise pour le calcul des prix de base les paramètres procédés qui sont majoritairement déjà pré-renseignés par récupération des résultats de la simulation. Pour les facteurs correctifs de matériau, l'acier ordinaire est la valeur par défaut mais d'autres choix sont disponibles dans la base de données ProSimPlus. Pour certains équipements, les facteurs correctifs liés au montage dépendent d'aspects technologiques ou de fonctionnement ; là encore, les valeurs par défaut sont modifiables par l'utilisateur.

La première étape de la MMF consiste à choisir le module fonctionnel utilisé pour calculer le coût de chaque opération. Une valeur est attribuée par défaut pour chaque module ProSimPlus, valeur qu'il est possible de modifier. Pour cet exemple, les modules fonctionnels choisis pour chaque opération sont :

Module	Nature du module (MMF)
C1	Compression
E1	Four de chauffe
E2	Echangeur de chaleur
E3	Echangeur de chaleur
E4	Echangeur de chaleur
P1	Compression
R1 + R2	Réacteur homogène à lit fixe avec pompage externe
T1	Distillation
T2	Distillation
T3	Distillation
X1	Ballon

**Remarque** : Avec la MMF, on calcule le prix d'une opération unitaire (distillation, compression, réaction...). Le module fonctionnel « Distillation » de la MMF inclut notamment le condenseur et le bouilleur. Pour les colonnes, il ne faut donc pas calculer le prix des modules ProSimPlus « Condenseur Ti » ( $i = 1$  à 3) et « Rebouilleur Ti » pour ne pas prendre en compte deux fois le prix de ces équipements.

Pour chaque module fonctionnel, un certain nombre de paramètres est nécessaire pour le calcul du prix de base de l'opération. La plupart des paramètres sont pré renseignés et reliés aux résultats de simulation, d'autres sont à saisir manuellement. Les paramètres à saisir manuellement pour la MMF dans cet exemple sont renseignés dans le tableau suivant :

Module	Paramètres	
C1	Taux de compression (-)	1,1563
E2	Coefficient global de transfert de chaleur (kcal/h/m <sup>2</sup> /°C)	500
E3	Coefficient global de transfert de chaleur (kcal/h/m <sup>2</sup> /°C)	600
E4	Coefficient global de transfert de chaleur (kcal/h/m <sup>2</sup> /°C)	500
R1 + R2	Débit molaire (kmol/h)	2611
R1 + R2	Temps de séjour (s)	10
T1	Volatilité relative (-)	50
T2	Volatilité relative (-)	2,23
T3	Volatilité relative (-)	33,73

Le tableau suivant regroupe les prix de base obtenus par la MMF :

UNIT OPERATION NAME	EQUIPMENT /SUB-EQUIPMENT	BASE PRICE (€)
C1	Compressor	393 287.56
	Compression (FMM)	393 287.56
E1	Cooler/Heater	698 381.40
	Heating furnace (FMM)	698 381.40
E2	Cooler/Heater	33 589.71
	Heat exchanger (FMM)	33 589.71
E3	Cooler/Heater	1 109.08
	Heat exchanger (FMM)	1 109.08
E4	Cooler/Heater	5 503.11
	Heat exchanger (FMM)	5 503.11
R1	Simple reactor	229 999.95
	Homogeneous fixed bed reactor with external pump system (FMM)	229 999.95
T1	Distillation column	11 545.61
	Distillation (FMM)	11 545.61
T2	Distillation column (total condenser)	85 527.25
	Distillation (FMM)	85 527.25
T3	Distillation column (total condenser)	13 108.57
	Distillation (FMM)	13 108.57
X1	Liquid-vapor separator	719 491.56
	Drum (FMM)	719 491.56

\* les types d'équipement sont affichés en anglais car ils sont issus initialement de la base de données en version anglaise. Pour obtenir les versions françaises, il suffit de remplacer le module « Evaluation économique » de l'exemple dans la version française du logiciel.

Pour déterminer les prix réels non montés et montés des équipements, des facteurs correctifs doivent être appliqués. Ces facteurs correctifs sont décrits dans l'onglet « Catégories » du module d'évaluation économique :

Evaluation économique (\$COST1)

Nom: Evaluation économique

Desc :

Identification

Paramètres

Scripts

Rapport

Notes

Paramètres avancés

Opérations unitaires

Catégories

Général

Validation

☒ Méthode des Modules Fonctionnels

☐ Méthode Pré-Estime

☐ Méthode Multiplicative Simple

Autres fours de réaction	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Facteur de montage	2.14000
Ballons de détente ou de séparation	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Ballons de stockage intermédiaire	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Compressions alternatives	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Compressions autres	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Compressions centrifuges	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Cristallisations	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Distillations	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Echangeurs de chaleur	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Evaporations	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Fours de chauffe	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Fours de réaction de préchauffage	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Fours de réaction de pyrolyse	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Mélangeurs	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Réacteurs agités	Méthode des Modules Fonctionnels ...
Réacteurs homogènes à lit fixe avec pompage externe avec virole et avec trempe	Méthode des Modules Fonctionnels ...

OK

Annuler

Les prix réels non montés et montés des équipements obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

UNIT OPERATION NAME	EQUIPMENT /SUB-EQUIPMENT	UNASSEMBLED REAL PRICE (€)	ASSEMBLED REAL PRICE (€)
C1	Compressor	393 287.56	1 144 466.81
	Compression (FMM)	393 287.56	
E1	Cooler/Heater	768 219.54	984 717.78
	Heating furnace (FMM)	768 219.54	
E2	Cooler/Heater	45 346.10	107 151.16
	Heat exchanger (FMM)	45 346.10	
E3	Cooler/Heater	1 109.08	3 149.78
	Heat exchanger (FMM)	1 109.08	
E4	Cooler/Heater	5 503.11	15 628.83
	Heat exchanger (FMM)	5 503.11	
R1	Simple reactor	229 999.95	1 885 999.62
	Homogeneous fixed bed reactor with external pump system (FMM)	229 999.95	
T1	Distillation column	11 545.61	39 139.62
	Distillation (FMM)	11 545.61	
T2	Distillation column (total condenser)	85 527.25	289 937.37
	Distillation (FMM)	85 527.25	
T3	Distillation column (total condenser)	13 108.57	44 438.04
	Distillation (FMM)	13 108.57	
X1	Liquid-vapor separator	719 491.56	1 957 017.04
	Drum (FMM)	719 491.56	

Pour calculer le prix total d'une catégorie d'équipements, la somme des prix réels montés des équipements appartenant à la catégorie est effectuée. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Catégorie (au sens de la MMF)	Equipements de la catégorie	Prix de la catégorie (€)
Ballons	X1	1 957 017
Compression	C1	1 144 466
Distillation	T1, T2, T3	373 515
Echangeurs de chaleur	E2, E3, E4	125 929
Fours de chauffe	E1	984 718
Réacteurs homogènes à lit fixe avec pompage externe avec virole et sans trempe	R1 + R2	1 885 999
<b>Total</b>	<b>(Procédé)</b>	<b>6 471 646</b>

#### 4.2.2. Méthode Pré-Estime (MPE)

Dans la MPE, l'évaluation des coûts initiaux d'investissement se base principalement sur des aspects de dimensionnement. Dans certains cas complexes (réacteurs ou colonnes par exemple), l'équipement peut être divisé en sous-équipements dont les prix sont évalués séparément.

Le tableau suivant regroupe, pour chaque module ProSimPlus, la nature de l'équipement (au sens de la MPE) utilisée pour le calcul des prix.

Module	Nature de l'équipement (MPE)
<b>C1</b>	<b>Compresseur centrifuge</b>
<b>Condenseur T1</b>	<b>Echangeur tubulaire</b>
<b>Condenseur T2</b>	<b>Echangeur tubulaire</b>
<b>Condenseur T3</b>	<b>Echangeur tubulaire</b>
<b>E1</b>	<b>Four de chauffe</b>
<b>E2</b>	<b>Aéroréfrigérant</b>
<b>E3</b>	<b>Echangeur tubulaire</b>
<b>E4</b>	<b>Echangeur tubulaire</b>
<b>P1</b>	<b>Pompe centrifuge (entraînement compris)</b>
<b>R1 + R2</b>	<b>Réacteur sous pression (Réacteur)</b>
	Virole
	Fonds
	Accessoires
<b>Rebouilleur T1</b>	<b>Echangeur tubulaire</b>
<b>Rebouilleur T2</b>	<b>Echangeur tubulaire</b>
<b>Rebouilleur T3</b>	<b>Echangeur tubulaire</b>
<b>T1</b>	<b>Réacteur sous pression (Colonne)</b>
	Virole
	Fonds
	Jupe
	Accessoires
	Plateaux (8) (Clapets, acier ordinaire 3,5 mm)
<b>T2</b>	<b>Réacteur sous pression (Colonne)</b>
	Virole
	Fonds
	Jupe
	Accessoires
	Garnissage (Anneaux Pall, acier ordinaire, 1,5 in)
<b>T3</b>	<b>Réacteur sous pression (Colonne)</b>
	Virole
	Fonds
	Jupe
	Accessoires
	Plateaux (5) (Clapets, acier ordinaire 3,5 mm)
<b>X1</b>	<b>Réacteur sous pression (Ballon)</b>
	Virole
	Fonds
	Accessoires

Légende : Nature de l'équipement en gras : équipement complet, en non gras : sous-équipement

Pour chaque équipement et sous-équipement, un ou plusieurs paramètres sont requis pour déterminer le prix de base. Comme pour la méthode MMF, certains paramètres sont directement issus des résultats de simulation et d'autres sont à renseigner par l'utilisateur dans l'interface du module. Le tableau suivant présente, pour cet exemple, l'ensemble des paramètres à renseigner par l'utilisateur et nécessaires à la MPE.

Module	Type d'équipement (MPE)	Paramètres	Valeur
E2	Air-cooler	Air inlet temperature (°C)	20
		Fluid designation	Cooling : light hydrocarbons
E3	Tube-type heat exchanger	Exchanger surface (m²)	1,8
E4	Tube-type heat exchanger	Exchanger surface (m²)	14,1
R1 + R2	Shell	Diameter (mm)	2000
		Weight (kg)	10374
	Bottoms	Diameter (mm)	2000
		Weight (kg)	2961
	Accessories	Weight (Shell + Bottoms) (kg)	13335
Condenseur T1	Tube-type heat exchanger	Exchanger surface (m²)	128,6
Rebouilleur T1	Tube-type heat exchanger	Exchanger surface (m²)	176,3
Condenseur T2	Tube-type heat exchanger	Exchanger surface (m²)	26,4
Rebouilleur T2	Tube-type heat exchanger	Exchanger surface (m²)	138,5
Condenseur T3	Tube-type heat exchanger	Exchanger surface (m²)	16,5
Rebouilleur T3	Tube-type heat exchanger	Exchanger surface (m²)	64,8

Le poid du réacteur a été calculé à l'aide de la méthode présentée dans l'ouvrage de CHAUVEL *et al.* [CHA01] :

Le poids de la virole est ainsi déterminé comme suit :

$$poids\ virole\ (kg) = 24,7 \cdot D' \cdot H \cdot e$$

Avec  $D'$  : diamètre de la virole (m)

$H$  : longueur ou hauteur de la virole (m)

$e$  : épaisseur de la virole (mm)

Le poids des fonds est quant à lui calculé comme suit :

$$poids\ fonds\ (kg) = poids\ unitaire \cdot e$$

Avec  $e$  : épaisseur des fonds (prise égale à celle de la virole) (mm)

poids unitaire : poids des fonds (kg) pour une épaisseur unitaire (1 mm)

La courbe donnant le poids unitaire des fonds en fonction du diamètre de la virole est disponible dans [CHA01]. En régressant cette courbe, on trouve :

$$poids\ unitaire\ (kg) = \exp(2,83 + 2,23 \ln(D') - 0,32 \ln(D')^2 + 0,13 \ln(D')^3)$$

Pour calculer le poids de la jupe, on utilise la même expression que pour le poids de la virole mais en remplaçant la hauteur et l'épaisseur de la virole par celles de la jupe.

Les diamètres des colonnes ont été calculés avec la méthode de dimensionnement présentée dans les modules « Colonne à distiller » sous ProSimPlus.

Pour les échangeurs tubulaires, l'aire d'échange est cohérente avec les valeurs de la MMF et approximée comme suit :

$$A = \frac{Q}{U \cdot TML}$$

Avec A : aire d'échange (m<sup>2</sup>)

Q : quantité de chaleur échangée (kcal/h)

U : coefficient global de transfert (kcal/h/m<sup>2</sup>/°C)

TML : température logarithmique moyenne (°C)



Le tableau suivant résume l'ensemble des prix de base des équipements de l'exemple calculés par la MPE :

NOM DU MODULE	EQUIPEMENT SOUS-EQUIPEMENT	PRIX DE BASE (€)
C1	Compresseur	630 416.25
	Centrifugal compressor (driver included) (PEM)	630 416.25
Condenseur T1	Consignateur de température	35 247.85
	Tube-type exchanger (PEM)	35 247.85
Condenseur T2	Consignateur de température	13 790.49
	Tube-type exchanger (PEM)	13 790.49
Condenseur T3	Consignateur de température	10 989.02
	Tube-type exchanger (PEM)	10 989.02
E1	Consignateur de température	1 132 299.05
	Heating furnace (PEM)	1 132 299.05
E2	Consignateur de température	87 564.68
	Air-cooler (PEM)	87 564.68
E3	Consignateur de température	4 416.86
	Tube-type exchanger (PEM)	4 416.86
E4	Consignateur de température	10 225.17
	Tube-type exchanger (PEM)	10 225.17
P1	Pompe centrifuge	54 491.96
	Centrifugal pump (driver included) (PEM)	54 491.96
R1	Réacteur simple	97 126.06
	Reactor shell (PEM)	43 293.85
	Reactor bottoms (PEM)	12 357.15
	Reactor accessories (PEM)	41 475.05
Rebouilleur T1	Consignateur de température	44 264.88
	Tube-type exchanger (PEM)	44 264.88
Rebouilleur T2	Consignateur de température	37 134.59
	Tube-type exchanger (PEM)	37 134.59
Rebouilleur T3	Consignateur de température	22 603.27
	Tube-type exchanger (PEM)	22 603.27
T1	Colonne à distiller	30 390.63
	Column shell (PEM)	7 106.12
	Column bottoms (PEM)	1 229.12
	Column skirt (PEM)	3 007.88
	Column accessories (PEM)	16 761.51
	Column trays (PEM)	2 285.99
T2	Colonne à distiller avec condenseur total	121 765.76
	Column shell (PEM)	17 033.75
	Column bottoms (PEM)	785.56
	Column skirt (PEM)	3 587.38
	Column accessories (PEM)	21 541.58
	Column packing (PEM)	78 817.49
T3	Colonne à distiller avec condenseur total	15 369.80
	Column shell (PEM)	1 134.48
	Column bottoms (PEM)	218.20
	Column skirt (PEM)	2 222.65
	Column accessories (PEM)	10 660.94
	Column trays (PEM)	1 133.53
X1	Séparateur diphasique liquide-vapeur	51 321.15
	Drum shell (PEM)	28 790.47
	Drum bottoms (PEM)	5 070.40
	Drum accessories (PEM)	17 460.27

Les prix réels non montés des équipements et sous-équipements sont regroupés dans le tableau suivant :

NOM DU MODULE	EQUIPEMENT SOUS-EQUIPEMENT	PRIX REEL NON MONTE (€)
C1	Compresseur	630 416.25
	Centrifugal compressor (driver included) (PEM)	630 416.25
Condenseur T1	Consignateur de température	36 779.87
	Tube-type exchanger (PEM)	36 779.87
Condenseur T2	Consignateur de température	14 389.88
	Tube-type exchanger (PEM)	14 389.88
Condenseur T3	Consignateur de température	11 466.65
	Tube-type exchanger (PEM)	11 466.65
E1	Consignateur de température	1 415 373.82
	Heating furnace (PEM)	1 415 373.82
E2	Consignateur de température	96 321.15
	Air-cooler (PEM)	96 321.15
E3	Consignateur de température	4 608.84
	Tube-type exchanger (PEM)	4 608.84
E4	Consignateur de température	10 669.60
	Tube-type exchanger (PEM)	10 669.60
P1	Pompe centrifuge	54 491.96
	Centrifugal pump (driver included) (PEM)	54 491.96
R1	Réacteur simple	269 872.02
	Reactor shell (PEM)	95 891.54
	Reactor bottoms (PEM)	54 739.71
	Reactor accessories (PEM)	119 240.77
Rebouilleur T1	Consignateur de température	46 188.82
	Tube-type exchanger (PEM)	46 188.82
Rebouilleur T2	Consignateur de température	38 748.62
	Tube-type exchanger (PEM)	38 748.62
Rebouilleur T3	Consignateur de température	23 585.71
	Tube-type exchanger (PEM)	23 585.71
T1	Colonne à distiller	35 174.53
	Column shell (PEM)	7 225.39
	Column bottoms (PEM)	1 874.62
	Column skirt (PEM)	3 512.66
	Column accessories (PEM)	19 275.74
	Column trays (PEM)	3 286.11
T2	Colonne à distiller avec condenseur total	144 832.86
	Column shell (PEM)	23 598.09
	Column bottoms (PEM)	1 632.43
	Column skirt (PEM)	4 189.41
	Column accessories (PEM)	24 772.82
	Column packing (PEM)	90 640.12
T3	Colonne à distiller avec condenseur total	18 901.95
	Column shell (PEM)	1 875.64
	Column bottoms (PEM)	541.13
	Column skirt (PEM)	2 595.66
	Column accessories (PEM)	12 260.08
	Column trays (PEM)	1 629.45
X1	Séparateur diphasique liquide-vapeur	53 592.88
	Drum shell (PEM)	25 429.57
	Drum bottoms (PEM)	8 957.01
	Drum accessories (PEM)	19 206.30

Le passage du prix réel non monté au prix réel monté est plus complexe dans le cas de la MPE que dans celui de la MMF. Il prend en compte un facteur de montage mais aussi un facteur de taille. Ce facteur de taille représente une réduction ou une majoration du prix de l'équipement en fonction de la « taille » du lot commandé : par exemple, en commandant un lot de 10 échangeurs, une économie sur le prix réel monté de chaque échangeur est effectuée par rapport à la commande de 10 échangeurs séparément.

Ce facteur de taille est défini pour chaque catégorie d'équipement (au sens de la MPE), il dépend de la somme des prix réels non montés des équipements d'une catégorie.

Le tableau suivant résume les prix réels montés des équipements avec la précision pour chacun d'eux des catégories (au sens de la MPE) auxquelles ils appartiennent :

NOM DU MODULE	EQUIPEMENT SOUS-EQUIPEMENT	PRIX REEL NON MONTE (€)	PRIX REEL MONTE (€)
C1	Compresseur	630 416.25	1 929 868.61
	Centrifugal compressor (driver included) (PEM)	630 416.25	
Condenseur T1	Consignateur de température	36 779.87	132 200.80
	Tube-type exchanger (PEM)	36 779.87	
Condenseur T2	Consignateur de température	14 389.88	51 722.69
	Tube-type exchanger (PEM)	14 389.88	
Condenseur T3	Consignateur de température	11 466.65	41 215.50
	Tube-type exchanger (PEM)	11 466.65	
E1	Consignateur de température	1 415 373.82	3 170 112.36
	Heating furnace (PEM)	1 415 373.82	
E2	Consignateur de température	96 321.15	260 886.56
	Air-cooler (PEM)	96 321.15	
E3	Consignateur de température	4 608.84	16 565.92
	Tube-type exchanger (PEM)	4 608.84	
E4	Consignateur de température	10 669.60	38 350.59
	Tube-type exchanger (PEM)	10 669.60	
P1	Pompe centrifuge	54 491.96	187 651.86
	Centrifugal pump (driver included) (PEM)	54 491.96	
R1	Réacteur simple	269 872.02	605 802.46
	Reactor shell (PEM)	95 891.54	
	Reactor bottoms (PEM)	54 739.71	
	Reactor accessories (PEM)	119 240.77	
Rebouilleur T1	Consignateur de température	46 188.82	166 020.11
	Tube-type exchanger (PEM)	46 188.82	
Rebouilleur T2	Consignateur de température	38 748.62	139 277.21
	Tube-type exchanger (PEM)	38 748.62	
Rebouilleur T3	Consignateur de température	23 585.71	84 775.97
	Tube-type exchanger (PEM)	23 585.71	
T1	Colonne à distiller	35 174.53	140 286.76
	Column shell (PEM)	7 225.39	
	Column bottoms (PEM)	1 874.62	
	Column skirt (PEM)	3 512.66	
	Column accessories (PEM)	19 275.74	
	Column trays (PEM)	3 286.11	
T2	Colonne à distiller avec condenseur total	144 832.86	565 984.77
	Column shell (PEM)	23 598.09	
	Column bottoms (PEM)	1 632.43	
	Column skirt (PEM)	4 189.41	
	Column accessories (PEM)	24 772.82	
	Column packing (PEM)	90 640.12	
T3	Colonne à distiller avec condenseur total	18 901.95	72 061.57
	Column shell (PEM)	1 875.64	
	Column bottoms (PEM)	541.13	
	Column skirt (PEM)	2 595.66	
	Column accessories (PEM)	12 260.08	
	Column trays (PEM)	1 629.45	
X1	Séparateur diphasique liquide-vapeur	53 592.88	182 557.95
	Drum shell (PEM)	25 429.57	
	Drum bottoms (PEM)	8 957.01	
	Drum accessories (PEM)	19 206.30	

Pour calculer le prix total d'une catégorie d'équipements, la somme des prix réels montés des équipements appartenant à la catégorie est effectuée. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Catégorie MPE	Prix de la catégorie (€)
Aéroréfrigérants	315 803
Ballons	182 557
Colonnes et réacteurs	1 384 135
Compresseurs centrifuges et entraînements	1 929 868
Echangeurs tubulaires	615 209
Fours de chauffe	3 170 112
Pompes et entraînements	187 651
<b>Total (Procédé)</b>	<b>7 785 341</b>

### 4.2.3. Comparaison des résultats (MMF et MPE)

Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour les coûts d'investissement initiaux des différentes opérations évaluées communément par la MMF et la MPE (la pompe P1 n'y figure pas) :

Module	Nature de l'équipement	Prix réel non monté (€)		Prix réel monté (€)	
		MMF	MPE	MMF	MPE
<b>C1</b>	Compresseur	393 287	630 416	1 144 466	1 929 868
<b>E1</b>	Four de chauffe	768 219	1 415 374	984 717	3 170 122
<b>E2</b>	Echangeur de chaleur	45 346	96 321	107 151	260 886
<b>E3</b>	Echangeur de chaleur	1 109	4 609	3 149	16 565
<b>E4</b>	Echangeur de chaleur	5 503	10 670	15 628	38 350
<b>P1</b>	Pompe centrifuge	-	54 491	-	187 651
<b>R1 + R2</b>	Réacteur	230 000	269 872	1 886 000	605 802
<b>T1*</b>	Colonne à distiller avec condenseur partiel	11 545	118 141	39 139	438 506
<b>T2*</b>	Colonne à distiller avec condenseur total	85 527	197 969	289 937	756 983
<b>T3*</b>	Colonne à distiller avec condenseur total	13 108	53 952	44 438	198 052
<b>X1</b>	Ballon de séparation	719 491	53 592	1 957 017	182 557
<b>Total</b>		<b>2 273 135</b>	<b>2 905 407</b>	<b>6 471 642</b>	<b>7 785 351</b>

\* : dans ce tableau, pour la MPE, le prix de la colonne comprend celui du rebouilleur et du condenseur

\*\* : les investissements relatifs aux pompes centrifuges sont compris dans les prix des équipements pour la méthode MMF

On remarque que pour certaines opérations, les prix calculés peuvent différer sensiblement d'une méthode à l'autre. MMF et MPE sont en effet deux méthodes d'évaluation du coût d'investissement assez différentes, la première est basée principalement sur des paramètres procédés et évalue le prix de l'opération (distillation, réaction...) tandis que la seconde prend en compte des aspects de dimensionnement des équipements.

Au niveau du total des coûts d'investissement initiaux, les résultats sont néanmoins du même ordre de grandeur avec un écart d'environ 22 % pour le prix réel total non monté et 17 % pour le prix réel total monté.

### 4.3. Coût d'investissement secondaire et valeur résiduelle des équipements

Au niveau de chaque module pour lequel un investissement initial a été défini, il est nécessaire de spécifier une durée de vie. Une fois la durée de vie de l'équipement écoulée, ce dernier doit être racheté. Le coût d'investissement secondaire d'un équipement est donc défini comme la somme des coûts de rachat de ce dernier sur l'horizon de temps.

La durée de vie permet aussi de déterminer la valeur résiduelle de l'équipement, c'est-à-dire la somme récupérable à la revente de ce dernier à une année p. Dans le module d'évaluation économique, une décroissance linéaire de la valeur résiduelle d'un équipement en fonction des années est considérée.

Si l'année de rachat d'un équipement a lieu la dernière année de l'horizon de temps, l'équipement n'est pas racheté cette année-là et sa valeur résiduelle est nulle.

Les durées de vie des équipements choisies dans le cadre de cet exemple sont résumées dans le tableau suivant :

Module	Durée de vie (an)
<b>C1</b>	10
<b>Condenseur T1*</b>	15
<b>Condenseur T2*</b>	15
<b>Condenseur T3*</b>	15
<b>E1</b>	10
<b>E2</b>	10
<b>E3</b>	10
<b>E4</b>	10
<b>P1</b>	10
<b>R1 + R2</b>	15
<b>Rebouilleur T1*</b>	15
<b>Rebouilleur T2*</b>	15
<b>Rebouilleur T3*</b>	15
<b>T1</b>	15
<b>T2</b>	15
<b>T3</b>	15
<b>X1</b>	15

\* : défini pour la MPE uniquement

Les tableaux suivants résument pour chaque module, le nombre de changements d'équipement, le coût d'investissement secondaire total et la valeur résiduelle de l'équipement à la fin de l'horizon de temps :

Méthode des Modules Fonctionnels (MMF) :

NOM DU MODULE	CATEGORIE	NOMBRE DE CHANGEMENT D'EQUIPEMENT	INVESTISSEMENT SECONDAIRE TOTAL (€)	VALEUR RESIDUELLE (€)
C1	Centrifugal compressions (MMF)	1	773 160.77	0.00
E1	Heating furnaces (MMF)	1	665 240.05	0.00
E2	Heat exchangers (MMF)	1	72 387.49	0.00
E3	Heat exchangers (MMF)	1	2 127.88	0.00
E4	Heat exchangers (MMF)	1	10 558.28	0.00
R1	Homogeneous fixed bed reactors with external pump system with shell and without quench (MMF)	1	1 047 228.65	573 830.41
T1	Distillations (MMF)	1	21 732.84	11 908.54
T2	Distillations (MMF)	1	160 991.93	88 215.75
T3	Distillations (MMF)	1	24 674.87	13 520.63
X1	Expansion or separation drums (MMF)	1	1 086 662.10	595 438.02

Méthode Pré-Estime (MPE) :

NOM DU MODULE	CATEGORIE	NOMBRE DE CHANGEMENT D'EQUIPEMENT	INVESTISSEMENT SECONDAIRE TOTAL (€)	VALEUR RESIDUELLE (€)
C1	Centrifugal compressors and drivings (MPE)	1	1 303 750.09	0.00
Condenseur T1	Tubular heat exchangers (MPE)	1	73 406.41	40 223.15
Condenseur T2	Tubular heat exchangers (MPE)	1	28 719.78	15 737.04
Condenseur T3	Tubular heat exchangers (MPE)	1	22 885.50	12 540.14
E1	Heating furnaces (MPE)	1	2 141 614.32	0.00
E2	Air-coolers (MPE)	1	176 245.61	0.00
E3	Tubular heat exchangers (MPE)	1	11 191.34	0.00
E4	Tubular heat exchangers (MPE)	1	25 908.28	0.00
P1	Pumps and drivings (MPE)	1	126 770.87	0.00
R1	Columns and reactors (MPE)	1	336 380.60	184 320.22
Rebouilleur T1	Tubular heat exchangers (MPE)	1	92 185.07	50 512.94
Rebouilleur T2	Tubular heat exchangers (MPE)	1	77 335.69	42 376.20
Rebouilleur T3	Tubular heat exchangers (MPE)	1	47 073.09	25 793.76
T1	Columns and reactors (MPE)	1	77 896.26	42 683.36
T2	Columns and reactors (MPE)	1	314 271.25	172 205.37
T3	Columns and reactors (MPE)	1	40 013.23	21 925.31
X1	Drums (MPE)	1	101 367.95	55 544.71

4.4. Coût de maintenance

Le coût de maintenance annuel associé à chaque équipement (en €/an) peut soit être défini comme une constante, soit être calculé comme un pourcentage de son coût d'investissement (prix réel non monté ou monté) ou bien être calculé par une formule saisie par l'utilisateur.

Dans le cadre de cet exemple, le coût de maintenance annuel de tous les équipements correspond à 5 % de leur prix réel monté.

Le coût annuel de la maintenance de chaque équipement est résumé dans les tableaux suivants.

Méthode des Modules Fonctionnels (MMF) :

NOM DU MODULE	COUT DE MAINTENANCE (€/AN)
C1	57 223.34
E1	49 235.89
E2	5 357.56
E3	157.49
E4	781.44
R1	94 299.98
T1	1 956.98
T2	14 496.87
T3	2 221.90
X1	97 850.85
<b>TOTAL</b>	<b>323 582.30</b>

Méthode Pré-Estime (MPE) :

NOM DU MODULE	COUT DE MAINTENANCE (€/AN)
C1	96 493.43
Condenseur T1	6 610.04
Condenseur T2	2 586.13
Condenseur T3	2 060.77
E1	158 505.62
E2	13 044.33
E3	828.30
E4	1 917.53
P1	9 382.59
R1	30 290.12
Rebouilleur T1	8 301.01
Rebouilleur T2	6 963.86
Rebouilleur T3	4 238.80
T1	7 014.34
T2	28 299.24
T3	3 603.08
X1	9 127.90
<b>TOTAL</b>	<b>389 267.08</b>



#### 4.5. Gains et coûts d'exploitation

Les gains et coûts d'exploitation regroupent les points suivants :

- Gains et coûts des alimentations et sorties du procédé
- Coûts des utilités définies au sein des modules
- Gains de production et coûts de consommation d'électricité

Ce qui suit inventorie les données saisies pour le calcul des gains et coûts d'exploitation dans le cadre de cet exemple.

Gains et coûts des alimentations et sorties du procédé :

Module	Type de consommation / production	Prix (€/t)
Alimentation hydrogène	Matière première	34
Alimentation toluène	Matière première	291
Purge	Produit	308
Sortie benzène	Produit	383
Sortie biphényle	Produit	250
Sortie gaz légers	Produit	308
UF-1	Utilité	0
UF-3	Utilité	0
UF-5	Utilité	0
UC-1	Utilité	20
UC-3	Utilité	15
UC-5	Utilité	25

Coûts des utilités définies au sein des modules :

Module	Poste de dépense d'utilité	Description de l'utilité	Prix (€/MWh)
E1	Quantité de chaleur	Gaz naturel	20
E2	Quantité de chaleur	Air (20°C)	0
E3	Quantité de chaleur	Eau de refroidissement (15°C)	0
E4	Quantité de chaleur	Eau de refroidissement (15°C)	0
R1	Quantité de chaleur	Eau de refroidissement (15°C)	0
R2	Quantité de chaleur	Eau de refroidissement (15°C)	0
X1	Quantité de chaleur	Gaz naturel	20

Remarques :

- Les coûts de l'eau de refroidissement et de l'air (utilisé au sein de l'aéroréfrigérant E2) sont négligés
- La source d'énergie primaire choisie pour alimenter le four E1 et pour chauffer les fluides caloporteurs au niveau du ballon X1 est le gaz naturel (les déperditions de chaleur et pertes dues aux rendements des appareils sont négligées)
- La consommation en utilité du réacteur est la somme des consommations calculées dans les modules R1 et R2.
- La colonne « Description de l'utilité » ne figure pas dans le module d'évaluation économique, elle est présente dans ce rapport pour préciser les hypothèses de l'exemple.

Gains de production et coûts de consommation d'électricité :

Module	Electricité	Prix (€/MWh)
C1	Consommation	40
P1	Consommation	40

Résultats obtenus :

Gains d'exploitation :

NOM DU MODULE	GAIN D'EXPLOITATION (€/AN)			
	PRODUIT	ENTRANT REMUNERATEUR	ELECTRICITE PRODUITE	TOTAL
Purge	6 288 026.33	0.00	0.00	6 288 026.33
Sortie benzène	31 499 065.32	0.00	0.00	31 499 065.32
Sortie biphényle	1 043 463.85	0.00	0.00	1 043 463.85
Sortie gaz légers	386 545.79	0.00	0.00	386 545.79
TOTAL	39 217 101.29	0.00	0.00	39 217 101.29

Coûts d'exploitation :

NOM DU MODULE	COUT D'EXPLOITATION (€/AN)				
	MATIERE PREMIERE	UTILITE	ELECTRICITE CONSOMMEE	DECHET (RETRAITEMENT)	TOTAL
Alimentation hydr...	161 613.14	0.00	0.00	0.00	161 613.14
Alimentation toluène	30 070 261.98	0.00	0.00	0.00	30 070 261.98
C1	0.00	0.00	126 684.42	0.00	126 684.42
E1	0.00	4 475 278.78	0.00	0.00	4 475 278.78
P1	0.00	0.00	2 643.05	0.00	2 643.05
UC-1	0.00	367 210.23	0.00	0.00	367 210.23
UC-3	0.00	373 397.93	0.00	0.00	373 397.93
UC-5	0.00	206 633.40	0.00	0.00	206 633.40
X1	0.00	2 931.89	0.00	0.00	2 931.89
TOTAL	30 231 875.12	5 425 452.22	129 327.46	0.00	35 786 654.81

Le **solde d'exploitation**, différence entre les gains et coûts d'exploitation, vaut **3.4 M€/an**.

## 4.6. Echéancier

Le module d'évaluation économique fournit un échéancier sur l'horizon de temps spécifié par l'utilisateur en tenant compte de la notion d'actualisation. L'ensemble des grandeurs calculées au sein de l'échéancier est défini dans l'aide en ligne de ProSimPlus. On y retrouve notamment l'amortissement, le bénéfice actualisé et la valeur actualisée nette.

Les pages suivantes présentent les échéanciers obtenus pour cet exemple avec la MMF et la MPE.

## Echéancier (MMF)

ANNEE	COUT D'INVESTISSEMENT (€)	COUT DE MAINTENANCE (€)	GAIN D'EXPLOITATION (€)	COUT D'EXPLOITATION (€)	AMORTISSEMENT (€)	COUT OPERATOIRE (€)	BENEFICE NET (€)
0	7 471 646.05	0	0	0	0	0	0
1	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
2	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
3	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
4	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
5	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
6	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
7	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
8	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
9	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
10	2 255 114.36	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
11	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
12	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
13	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
14	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
15	4 216 531.69	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
16	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
17	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
18	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
19	0	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74
20	-3 811 021.13	323 582.30	39 217 100.96	35 786 654.51	506 613.55	36 293 268.05	1 754 299.74

ANNEE	REVENUS (€)	VALEUR RESIDUELLE (€)	COEFFICIENT D'ACTUALISATION	REVENUS ACTUALISES (€)	BENEFICES ACTUALISES (€)	VALEUR RESIDUELLE ACTUALISEE (€)	VALEUR ACTUALISEE NETTE (€)
0	-7 471 646.05	6 471 646.05	1.000	-7 471 646.05	-7 471 646.05	6 471 646.05	0
1	1 937 330.99	5 965 032.51	0.962	1 862 818.26	-5 608 827.80	5 735 608.18	1 088 318.84
2	1 937 330.99	5 458 418.96	0.925	1 791 171.40	-3 817 656.39	5 046 615.16	2 153 514.98
3	1 937 330.99	4 951 805.41	0.889	1 722 280.19	-2 095 376.20	4 402 136.98	3 195 757.13
4	1 937 330.99	4 445 191.86	0.855	1 656 038.65	-439 337.55	3 799 768.63	4 215 235.27
5	1 937 330.99	3 938 578.31	0.822	1 592 344.85	1 153 007.30	3 237 224.27	5 212 158.68
6	1 937 330.99	3 431 964.76	0.790	1 531 100.82	2 684 108.12	2 712 331.60	6 186 754.25
7	1 937 330.99	2 925 351.21	0.760	1 472 212.33	4 156 320.45	2 223 026.50	7 139 264.76
8	1 937 330.99	2 418 737.66	0.731	1 415 588.78	5 571 909.23	1 767 347.92	8 069 947.35
9	1 937 330.99	1 912 124.11	0.703	1 361 143.05	6 933 052.28	1 343 433.04	8 979 072.06
10	-317 783.37	3 660 624.93	0.676	-214 683.06	6 718 369.22	2 472 987.04	9 866 920.43
11	1 937 330.99	3 154 011.38	0.650	1 258 453.27	7 976 822.49	2 048 785.65	10 675 189.07
12	1 937 330.99	2 647 397.83	0.625	1 210 051.22	9 186 873.71	1 653 556.87	11 465 027.63
13	1 937 330.99	2 140 784.28	0.601	1 163 510.79	10 350 384.50	1 285 699.56	12 236 658.15
14	1 937 330.99	1 634 170.73	0.577	1 118 760.37	11 469 144.87	943 692.88	12 990 312.83
15	-2 279 200.70	5 344 088.87	0.555	-1 265 559.25	10 203 585.62	2 967 382.85	13 726 232.98
16	1 937 330.99	4 837 475.32	0.534	1 034 356.85	11 237 942.48	2 582 767.63	14 354 618.28
17	1 937 330.99	4 330 861.78	0.513	994 573.90	12 232 516.38	2 223 348.57	14 969 238.19
18	1 937 330.99	3 824 248.23	0.494	956 321.06	13 188 837.43	1 887 756.47	15 570 222.02
19	1 937 330.99	3 317 634.68	0.475	919 539.48	14 108 376.91	1 574 690.17	16 157 709.50
20	5 748 352.12	2 811 021.13	0.456	2 623 472.87	16 731 849.78	1 282 913.35	16 731 849.78

Echéancier (MPE)

ANNEE	COUT D'INVESTISSEMENT (€)	COUT DE MAINTENANCE (€)	GAIN D'EXPLOITATION (€)	COUT D'EXPLOITATION (€)	AMORTISSEMENT (€)	COUT OPERATOIRE (€)	BENEFICE NET (€)
0	8 662 866.70	0	0	0	0	0	0
1	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
2	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
3	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
4	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
5	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
6	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
7	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
8	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
9	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
10	5 603 262.52	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
11	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
12	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
13	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
14	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
15	2 059 604.18	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
16	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
17	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
18	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
19	0	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97
20	-2 373 069.46	383 143.33	39 217 101.29	35 786 654.81	697 633.20	36 484 288.00	1 639 687.97

ANNEE	REVENUS (€)	VALEUR RESIDUELLE (€)	COEFFICIENT D'ACTUALISATION	REVENUS ACTUALISES (€)	BENEFICES ACTUALISES (€)	VALEUR RESIDUELLE ACTUALISEE (€)	VALEUR ACTUALISEE NETTE (€)
0	-8 662 866.70	7 662 866.70	1.000	-8 662 866.70	-8 662 866.70	7 662 866.70	0
1	1 954 177.83	6 965 233.50	0.962	1 879 017.15	-6 783 849.55	6 697 339.91	875 028.81
2	1 954 177.83	6 267 600.31	0.925	1 806 747.26	-4 977 102.30	5 794 748.80	1 742 202.72
3	1 954 177.83	5 569 967.11	0.889	1 737 256.98	-3 239 845.32	4 951 680.48	2 600 831.51
4	1 954 177.83	4 872 333.91	0.855	1 670 439.40	-1 569 405.92	4 164 891.45	3 450 289.72
5	1 954 177.83	4 174 700.71	0.822	1 606 191.73	36 785.81	3 431 299.68	4 290 012.60
6	1 954 177.83	3 477 067.52	0.790	1 544 415.13	1 581 200.94	2 747 976.97	5 119 492.43
7	1 954 177.83	2 779 434.32	0.760	1 485 014.54	3 066 215.48	2 112 141.65	5 938 274.94
8	1 954 177.83	2 081 801.12	0.731	1 427 898.60	4 494 114.08	1 521 151.69	6 745 955.97
9	1 954 177.83	1 384 167.92	0.703	1 372 979.42	5 867 093.50	972 498.02	7 542 178.26
10	-3 649 084.68	6 289 797.24	0.676	-2 465 190.86	3 401 902.64	4 249 161.65	8 326 628.46
11	1 954 177.83	5 592 164.05	0.650	1 269 396.66	4 671 299.30	3 632 563.13	8 953 443.36
12	1 954 177.83	4 894 530.85	0.625	1 220 573.71	5 891 873.00	3 057 109.53	9 573 579.58
13	1 954 177.83	4 196 897.65	0.601	1 173 628.57	7 065 501.57	2 520 547.97	10 186 623.63
14	1 954 177.83	3 499 264.46	0.577	1 128 489.01	8 193 990.58	2 020 738.03	10 792 203.69
15	-105 426.35	4 861 235.44	0.555	-58 539.51	8 135 451.06	2 699 271.48	11 389 987.05
16	1 954 177.83	4 163 602.24	0.534	1 043 351.52	9 178 802.59	2 222 981.28	11 935 692.04
17	1 954 177.83	3 465 969.05	0.513	1 003 222.62	10 182 025.20	1 779 335.78	12 474 734.23
18	1 954 177.83	2 768 335.85	0.494	964 637.13	11 146 662.33	1 366 528.42	13 006 818.88
19	1 954 177.83	2 070 702.65	0.475	927 535.70	12 074 198.04	982 843.33	13 531 683.79
20	4 327 247.29	1 373 069.46	0.456	1 974 899.17	14 049 097.21	626 650.98	14 049 097.21

## 4.7. Profils fournis par le module d'évaluation économique

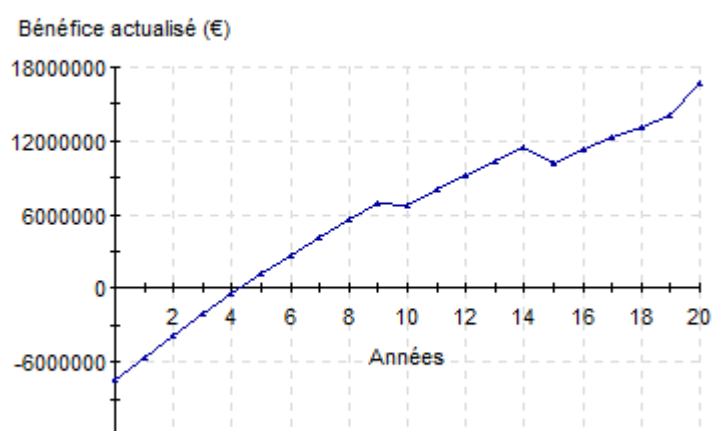
Le module d'évaluation économique fournit les profils suivants :

- Evolution du bénéfice actualisé en fonction du temps
- Evolution de la valeur actualisée nette en fonction du temps
- Evolution de la valeur résiduelle actualisée en fonction du temps
- Evolution du bénéfice actualisé en fonction du taux d'actualisation

Ce qui suit présente les profils obtenus dans le cadre de cet exemple pour la MMF et la MPE.

Profils obtenus avec la MMF :

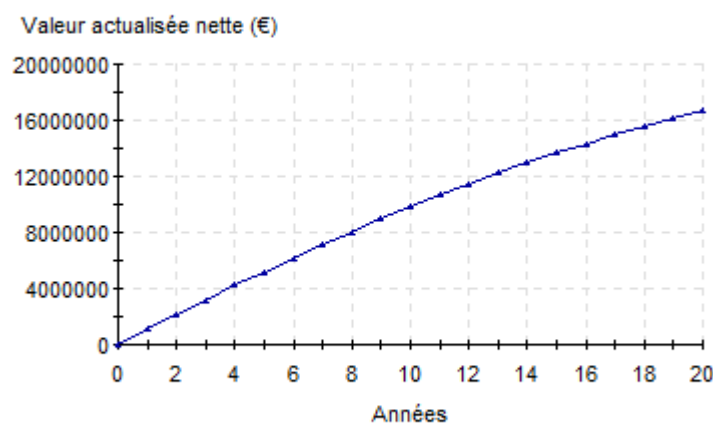
### Bénéfice actualisé



Evolution du bénéfice actualisé en fonction du temps

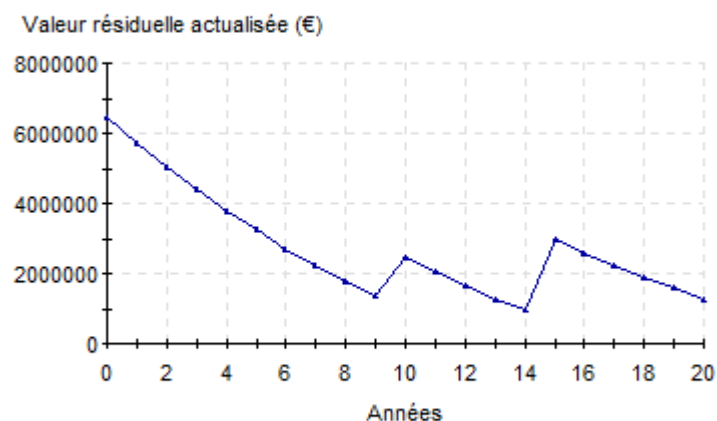
Sur cette courbe, on peut remarquer que le temps de récupération (temps au bout duquel le bénéfice actualisé devient positif) est d'environ 4,5 ans.

### Valeur actualisée nette



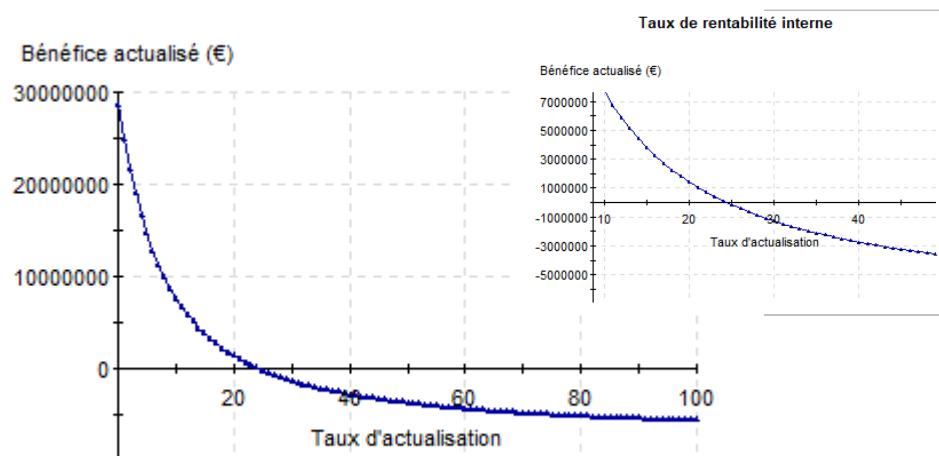
Evolution de la valeur actualisée nette en fonction du temps

### Valeur résiduelle actualisée



Evolution de la valeur résiduelle actualisée en fonction du temps

### Taux de rentabilité interne

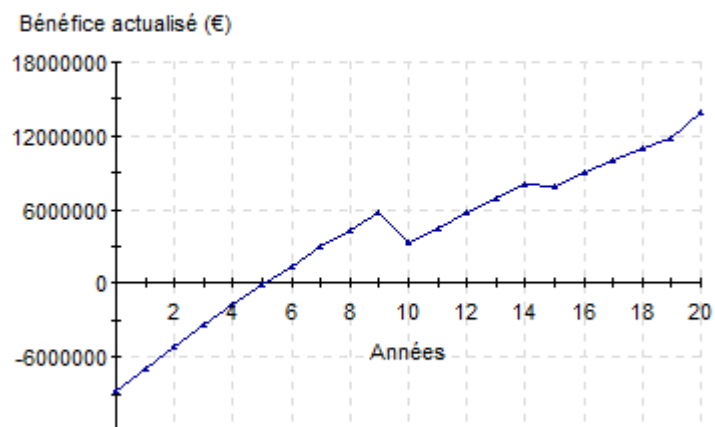


Evolution du bénéfice actualisé en fonction du taux d'actualisation

Sur cette dernière courbe, on peut remarquer que le taux de rentabilité interne (taux d'actualisation pour lequel le bénéfice actualisé est nul à la fin de l'horizon de temps) est d'environ 25 %.

Profils obtenus avec la MPE :

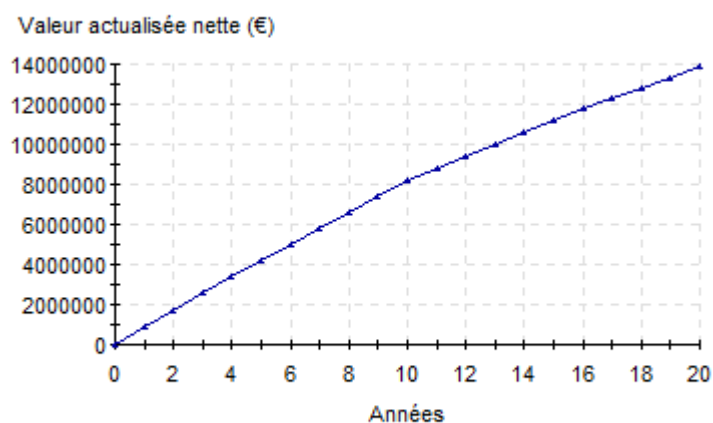
### Bénéfice actualisé



Evolution du bénéfice actualisé en fonction du temps

Sur cette courbe, on peut remarquer que le temps de récupération est d'approximativement 5 ans.

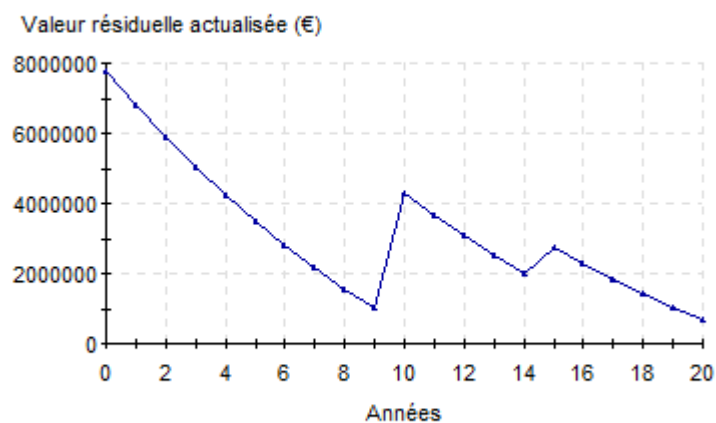
### Valeur actualisée nette



Evolution de la valeur actualisée nette en fonction du temps

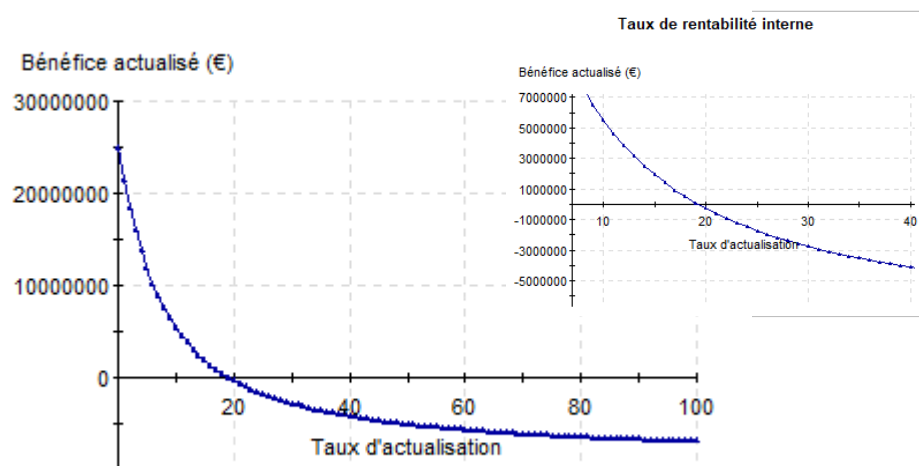


### Valeur résiduelle actualisée



Evolution de la valeur résiduelle actualisée en fonction du temps

### Taux de rentabilité interne



Evolution du bénéfice actualisé en fonction du taux d'actualisation

Sur cette courbe, on peut remarquer que le taux de rentabilité interne est d'environ 20 %.

#### 4.8. Résumés des résultats obtenus lors de l'évaluation économique

Le module d'évaluation économique fournit un bilan économique global sur le procédé qui résume les différents résultats présentés précédemment.

Les résultats obtenus en utilisant la MMF sont :

Coût d'investissement initial	=	7 471 646.08	(€)
Coût d'investissement secondaire total	=	3 864 764.85	(€)
Valeur résiduelle à la fin de l'horizon de temps	=	1 282 913.35	(€)
Coût de maintenance	=	323 582.30	(€/AN) ▼
Solde d'exploitation	=	3 430 446.48	(€/AN) ▼
Gain d'exploitation	=	39 217 101.29	(€/AN) ▼
Produits	=	39 217 101.29	(€/AN) ▼
Entrants rémunérateurs	=	0.00	(€/AN) ▼
Electricité produite	=	0.00	(€/AN) ▼
Coût d'exploitation	=	35 786 654.81	(€/AN) ▼
Matières premières	=	30 231 875.12	(€/AN) ▼
Utilités	=	5 425 452.22	(€/AN) ▼
Electricité consommée	=	129 327.46	(€/AN) ▼
Déchets (retraitement)	=	0.00	(€/AN) ▼
Temps de récupération	=	4.28	(AN)
Taux de rentabilité interne	=	24.41	(%)

Les résultats obtenus en utilisant la MPE sont :

Coût d'investissement initial	=	8 785 341.68	(€)
Coût d'investissement secondaire total	=	4 997 015.35	(€)
Valeur résiduelle à la fin de l'horizon de temps	=	663 862.21	(€)
Coût de maintenance	=	389 267.08	(€/AN) ▼
Solde d'exploitation	=	3 430 446.48	(€/AN) ▼
Gain d'exploitation	=	39 217 101.29	(€/AN) ▼
Produits	=	39 217 101.29	(€/AN) ▼
Entrants rémunérateurs	=	0.00	(€/AN) ▼
Electricité produite	=	0.00	(€/AN) ▼
Coût d'exploitation	=	35 786 654.81	(€/AN) ▼
Matières premières	=	30 231 875.12	(€/AN) ▼
Utilités	=	5 425 452.22	(€/AN) ▼
Electricité consommée	=	129 327.46	(€/AN) ▼
Déchets (retraitement)	=	0.00	(€/AN) ▼
Temps de récupération	=	5.07	(AN)
Taux de rentabilité interne	=	19.26	(%)

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [CHA01] A. CHAUVEL, G. FOURNIER, C. RAIMBAULT  
« Manuel d'évaluation économique des procédés – Nouvelle édition revue et augmentée »  
Editions TECHNIP (2001)
- [DOU88] J.M. DOUGLAS  
"Conceptual design of chemical processes"  
McGraw-Hill Book Company (1988)
- [SEI04] W.D. SEIDER, J.D. SEADER, D.R. LEWIN  
"Product and process design principles – Synthesis, Analysis and Evaluation"  
2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc. pp. 136-142 (2004)
- [SOA72] G. SOAVE  
"Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state"  
Chem. Eng. Sci., 27, 6, 1197-1203 (1972)