

EXEMPLE D'APPLICATION PROSIMPLUS

COGENERATION PAR TURBINES A VAPEUR

INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple traite d'un procédé de cogénération à partir d'un combustible de type gaz naturel (GN). L'objectif de la cogénération est de récupérer la chaleur fatale qui peut être perdue lors de la production d'électricité, cette valorisation permettant d'augmenter l'efficacité énergétique. L'électricité est produite à travers les turbines à vapeur mises en cascade, la chaleur résiduelle de la vapeur sortant des turbines étant ensuite récupérée par des échangeurs de chaleur.

DIFFUSION	<input checked="" type="checkbox"/> Libre Internet	<input type="checkbox"/> Réservé clients ProSim	<input type="checkbox"/> Restreinte	<input type="checkbox"/> Confidentiel
------------------	--	---	-------------------------------------	---------------------------------------

FICHIER PROSIMPLUS CORRESPONDANT [PSPS_EX_FR-Cogeneration-turbines-a-vapeur.pmp3](#)

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. ProSim ne pourra en aucun cas être tenu pour responsable de l'application qui pourra être faite des calculs basés sur cet exemple.

TABLE DES MATIÈRES

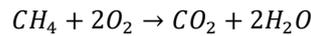
1.	MODELISATION DU PROCEDE	3
1.1.	Présentation du procédé	3
1.2.	Schéma bloc du procédé.....	3
1.3.	Schéma de simulation	4
1.4.	Constituants.....	5
1.5.	Modèles thermodynamiques	5
1.6.	Initialisations	6
1.7.	Conditions opératoires.....	6
1.8.	Bilan électrique	10
1.9.	Analyse économique	11
1.10.	Spécification sur la température de vapeur d'eau en entrée de « T1 »	12
1.11.	Détermination de la quantité de chaleur dans les échangeurs simples.....	14
1.12.	« Trucs et astuces »	15
2.	RESULTATS	18
2.1.	Puissance électrique produite	18
2.2.	Puissance thermique récupérée.....	18
2.3.	Analyse économique	18
3.	BIBLIOGRAPHIE	19

1. MODELISATION DU PROCEDE

1.1. Présentation du procédé

Cet exemple présente la simulation d'un site de cogénération au gaz naturel. La cogénération repose sur la production simultanée d'électricité et d'énergie thermique au sein de la même installation.

La production d'énergie est assurée par une chaudière consommant du gaz naturel. Le gaz naturel ($\approx 90\% CH_4$) est brûlé avec de l'air dans la chaudière. Il se produit alors la réaction principale de combustion :



La vapeur d'eau produite par la chaudière est envoyée vers une cascade de turbines étagées en pression afin de produire l'électricité. La cascade en pression permet d'améliorer le rendement électrique de l'installation. Le schéma procédé de l'installation simulée est présenté au paragraphe 1.3. La cascade en pression est composée de 7 turbines : des turbines à haute pression (HP), à moyenne pression (MP) et à basse pression (BP).

Les courants de sortie des turbines sont encore valorisables d'un point vue thermique. Pour ce faire, la chaleur de la vapeur d'eau en sortie des turbines est récupérée dans des échangeurs de chaleur qui permettent d'alimenter un réseau de chaleur urbain (non présenté dans cet exemple).

La vapeur d'eau condensée (en sortie des échangeurs de récupération) est ensuite réinjectée dans la chaudière.

Le site de cogénération présenté dans cet exemple permet de produire 223 MW d'électricité et de récupérer 23 MW de chaleur à différents niveaux de température. Le rendement global de l'installation est supérieur à 40%.

1.2. Schéma bloc du procédé

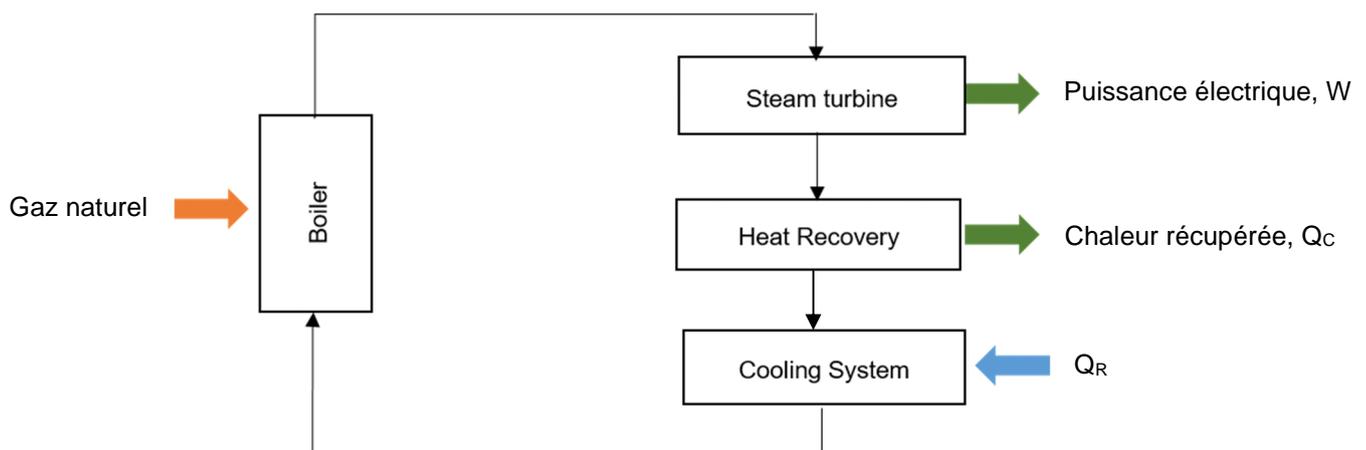


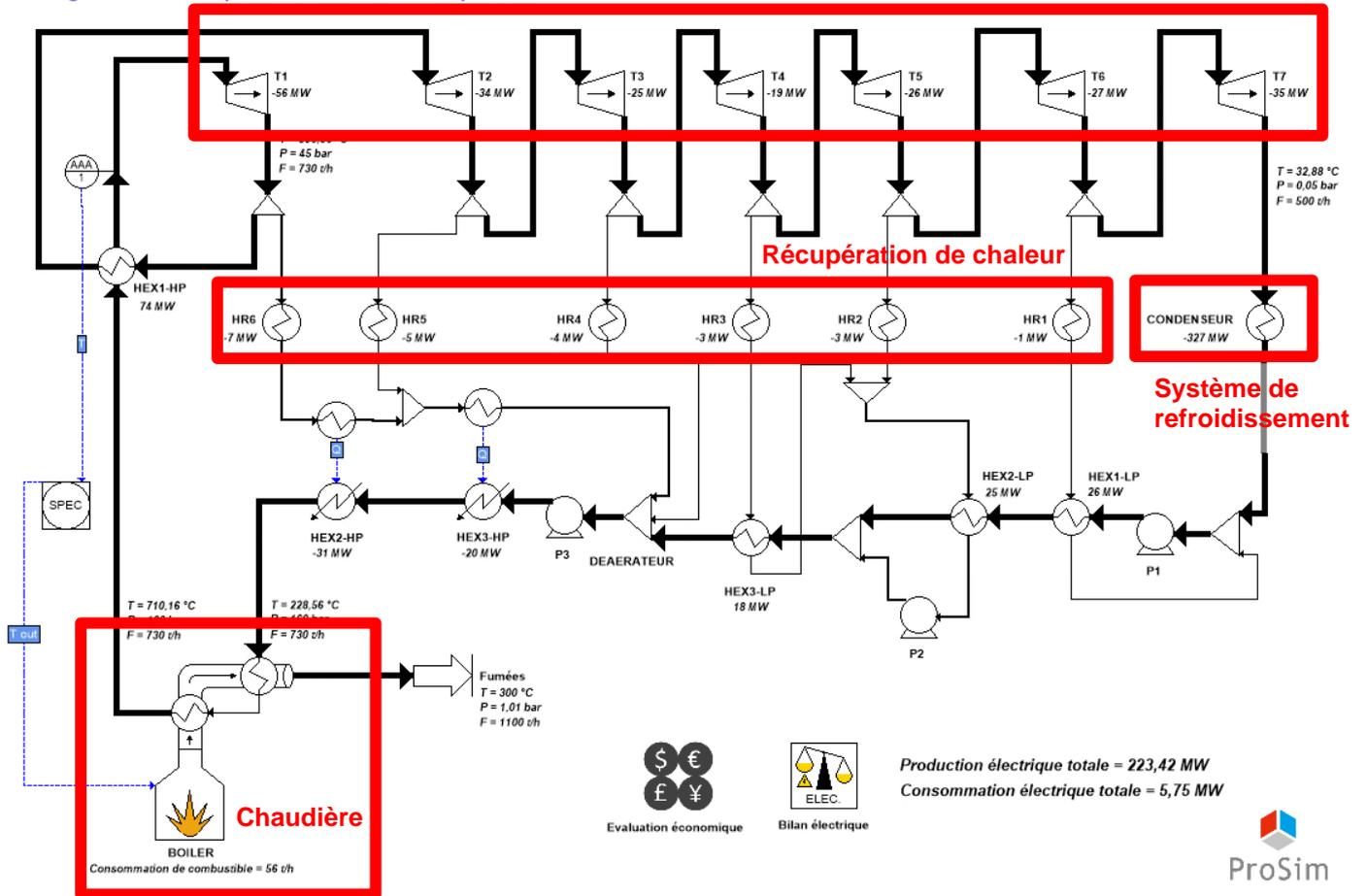
Schéma bloc du site de cogénération au gaz naturel

Le système de refroidissement permet de garantir l'état liquide en entrée de chaudière. La récupération d'énergie sur cet équipement n'est pas présentée dans cet exemple.

1.3. Schéma de simulation

Cogénération par turbines à vapeur

Turbines à vapeur



1.4. Constituants

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

Constituant	Formule chimique	Numéro CAS
Water	H ₂ O	7732-18-5
Hydrogen	H ₂	1333-74-0
Carbon dioxide	CO ₂	124-38-9
Oxygen	O ₂	7782-44-7
Carbon monoxide	CO	630-08-0
Hydrogen sulfide	H ₂ S	7783-06-4
Sulfur dioxide	SO ₂	7446-09-5
Sulfur trioxide	SO ₃	7446-11-9
Nitric oxide	NO	10102-43-9
Nitrogen	N ₂	7727-37-9
Methane	CH ₄	74-82-8

1.5. Modèles thermodynamiques

Deux « calculator » thermodynamiques sont définis pour simuler le procédé de « Power Plant » :

- « Water » : ce calculator ne contient que le constituant eau. Il utilise donc le modèle spécifique eau pure.
- « Fumes » : ce calculator contient la liste des constituants présentée précédemment. Le modèle thermodynamique utilisé est le profil « idéal ».

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

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

1.6. Initialisations

La séquence de calcul est automatiquement déterminée par ProSimPlus. Quatre courants coupés sont détectés : « 02 » (sortie du diviseur de courant « Splitter HR6 »), « 30 » (entrée de la pompe « P1 »), « 37 » (sortie du mélangeur « Other mixer 2 ») et « 46 » (sortie de l'échangeur « HEX2-HP »). Les initialisations suivantes sont utilisées dans la simulation :

Courant	02	30	37	46
Débit molaire partiels (t/h)				
Eau	700	550	600	700
Hydrogène	0	0	0	0
Dioxyde de carbone	0	0	0	0
Oxygène	0	0	0	0
Monoxyde de carbone	0	0	0	0
Sulfure d'hydrogène	0	0	0	0
Dioxyde de soufre	0	0	0	0
Trioxysulfure de soufre	0	0	0	0
Monoxyde d'azote	0	0	0	0
Azote	0	0	0	0
Méthane	0	0	0	0
Température (°C)	370	30	50	250
Pression (bar)	45,35	1,1	1,1	160

Remarque : le modèle thermodynamique spécifique à l'eau est utilisé pour tous les courants initialisés.

1.7. Conditions opératoires

✓ Chaudière « BOILER » :

- Paramètres de fonctionnement de l'échangeur interne

Paramètres de fonctionnement	Valeur
Type d'échangeur	Contre-courant pur
Température des fumées en sortie du module fournie (°C)	300

- Paramètres de fonctionnement de la combustion

COMBURANT					
Type	Air	Type de contrainte : « Excès d'air » (%)	20	Pression d'entrée (atm)	1
COMBUSTIBLE					
Type	Gaz	Teneur molaire en méthane (%)	90	Pression d'entrée (atm)	1
		Teneur molaire en éthane (%)	5		
		Teneur molaire en propane (%)	1		
		Teneur molaire en butane (%)	0,2		
		Teneur molaire en CO ₂ (%)	1,6		
		Teneur molaire en azote (%)	2,2		
Pertes thermique		5% de la puissance de combustion			

Le combustible est défini à l'aide du bouton « Description avancée » de l'onglet « Combustible ». La masse molaire, le ratio C/H et le PCI sont automatiquement déterminés par ProSimPlus. Les coefficients stœchiométriques des réactions de la combustion sont obtenus en appuyant sur le bouton « Calcul des coefficients stœchiométriques des réactions conventionnelles ».

Note : Le bouton « Charger les constituants des fumées » permet de charger le calculator des fumées et de définir le calculator des fumées comme le calculator de la chaudière. Un nouveau calculator « Fumes » est ajouté à la liste des calculators.



- Autres paramètres du module « Boiler » :

Paramètres de fonctionnement	Valeur
Contrainte du module	Puissance utile imposée
Température de sortie de l'utilité (°C)	700
Mode de fonctionnement	Fonctionnement à charge nominale

✓ Turbines à vapeur

Nom	Spécification	Pression de décharge (bar)	Rendement mécanique (%)	Rendement électrique (%)	Rendement isentropique (%)
T1	Pression de décharge	45	95	99	75,5
T2	Pression de décharge	20	95	99	70
T3	Pression de décharge	10	95	99	70
T4	Pression de décharge	5,5	95	99	70
T5	Pression de décharge	2	95	99	70
T6	Pression de décharge	0,5	95	99	70
T7	Pression de décharge	0,05	95	99	70

✓ Consignateurs de température

Nom	Température de sortie (°C)
CONDENSEUR	Egale à la température de bulle
HR1	Egale à la température de rosée
HR2	Egale à la température de rosée
HR3	Egale à la température de rosée
HR4	Egale à la température de rosée
HR5	Egale à la température de rosée
HR6	Egale à la température de rosée
HEX2-HP-Bis	220
HEX3-HP-Bis	180

✓ Echangeurs de chaleurs généralisées

Nom	Type de contrainte : "Autre"	Ecart de température (°C)
HEX1-LP	Ecart de température entre CC et CF en sortie	3
HEX2-LP	Ecart de température entre CC et CF en sortie	3
HEX3-LP	Ecart de température entre CC et CF en sortie	3
HEX1-HP	Ecart de température entre CC et CF en sortie	3

✓ Echangeurs simples

Nom	Température de sortie (°C)
HEX2-HP	Calculée
HEX3-HP	Calculée

✓ Pompes centrifuges

Paramètres de fonctionnement	P1	P2	P3
Pression de refoulement (bar)	5	5	160
Efficacité volumétrique	0,65	0,65	0,65
Efficacité mécanique	0,95	0,95	0,95
Efficacité électrique	0,99	0,99	0,99
Contrainte	Etat physique liquide imposé	Etat physique liquide imposé	Etat physique liquide imposé

➤ Diviseurs de courant

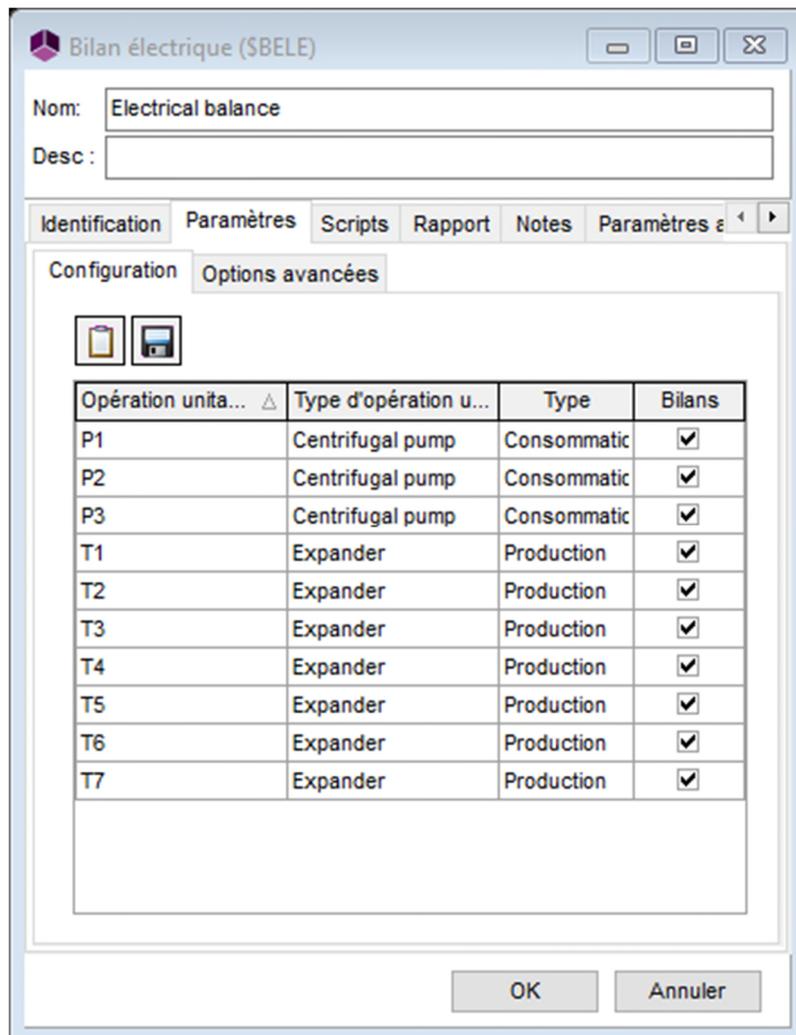
Nom	Courant	Débit massique de courant (t/h)	Pression de sortie (bar)
HR1 splitter	26	40	Egale à la pression d'entrée
HR2 splitter	22	40	Egale à la pression d'entrée
HR3 splitter	18	30	Egale à la pression d'entrée
HR4 splitter	14	30	Egale à la pression d'entrée
HR5 splitter	10	30	Egale à la pression d'entrée
HR6 splitter	3	60	Egale à la pression d'entrée

Remarque : les mélangeurs (« Feed », « Other Mixer 1 », « Other Mixer 2 », « Other Mixer 3 » et « DEAERATOR ») sont définis avec les valeurs par défaut (la pression de sortie est égale à la pression la plus faible des alimentations).

1.8. Bilan électrique

Il est possible de réaliser un bilan électrique simplement dans ProSimPlus en ajoutant un module « Bilan électrique ».

Il suffit d'ajouter le module sur le flowsheet (aucune connexion de courant matière ou d'information n'est nécessaire) et de sélectionner les opérations unitaires productrices et consommatrices d'électricité :

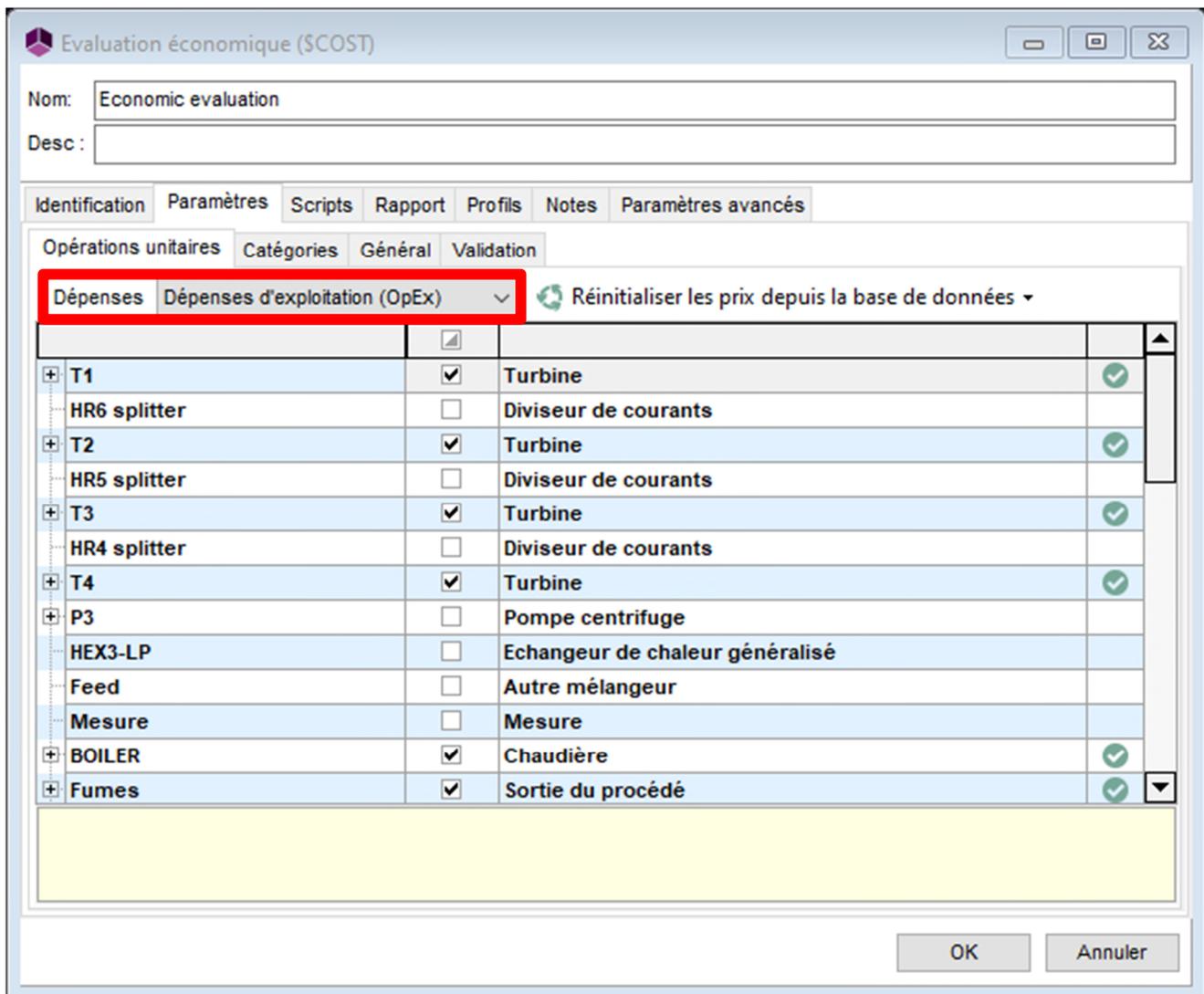


1.9. Analyse économique

Il est possible de réaliser une analyse économique simplement dans ProSimPlus en ajoutant un module « Analyse économique ».

Il faut premièrement ajouter le module sur le flowsheet (aucune connexion de courant matière ou d'information n'est nécessaire).

Pour cet exemple, seule une analyse des coûts et gains d'exploitation (OpEx) est réalisée.

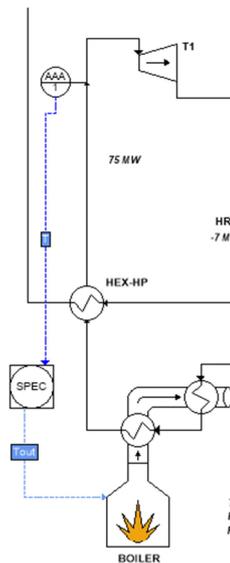


Les opérations unitaires concernées sont :

- Les turbines (T1 à T7) pour lesquelles le prix de l'électricité produite est fixé à 35 €/MWh ;
- Les échangeurs de chaleur pour le réseau urbain (HR1 à HR6) dont le gain est fixé à 60 €/MWh ;
- La chaudière dont le prix du gaz naturel est fixé à 450 €/t (≈ 33 €/MWh).

1.10. Spécification sur la température de vapeur d'eau en entrée de « T1 »

La température de la vapeur d'eau est fixée à 570°C en sortie d'échangeur « HEX1-HP ». Pour ce faire, il est nécessaire d'insérer un module de « Gestion des contraintes et des recyclages (SPEC) » comme illustré ci-dessous :



Le module « Mesure » permet de définir la valeur de consigne de la température de l'utilité en sortie et est configuré ainsi :

Paramètre de fonctionnement	Valeur
Température (°C)	570

Le courant d'information sortant du module mesure et entrant dans le module SPEC véhicule l'écart entre la température mesurée et la consigne du courant de sortie de l'échangeur « HEX1-HP ».

Le paramétrage du courant d'information est le suivant :

The screenshot shows a dialog box titled "Courant information (SISTR1)". It has a close button in the top right corner. Below the title bar, there are two text input fields: "Nom:" with the value "T" and "Desc:". Below these are three tabs: "Identification", "Paramètres", and "Notes". The "Paramètres" tab is active. It contains two sections:

- Nature de l'information à émettre:** A radio button labeled "Ecart entre la valeur mesurée et la consigne" is selected. Below it, a text box explains: "Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module 'Mesure'". There are two input fields for "Début:" and "Fin:", both containing the value "0".
- Nature de l'information à récupérer:** A radio button labeled "Automatique" is selected. Below it, a text box explains: "Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module 'Spec'". There are two input fields for "Début:" and "Fin:", both containing the value "0".

At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Annuler".

Afin d'atteindre la température de consigne en sortie de la chaudière, le module SPEC doit être relié à une variable d'action par un courant d'information. Le courant d'information est connecté depuis le module SPEC vers le module de chaudière. Le paramétrage du courant d'information pour la variable d'action est le suivant :

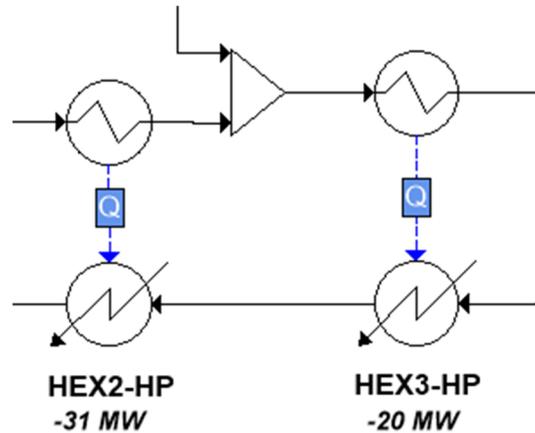
The screenshot shows a dialog box titled "Courant information (SISTR2)". It has a close button in the top right corner. Below the title bar, there are two text input fields: "Nom:" with the value "T out" and "Desc:". Below these are three tabs: "Identification", "Paramètres", and "Notes". The "Paramètres" tab is active. It contains two sections:

- Nature de l'information à émettre:** A radio button labeled "Automatique" is selected. Below it, a text box explains: "Le segment d'information à émettre sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module 'Spec'". There are two input fields for "Début:" and "Fin:", both containing the value "0".
- Nature de l'information à récupérer:** A radio button labeled "Valeur de la température de sortie de l'utilité fournie" is selected. Below it, a text box explains: "Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module 'BOILER'". There are two input fields for "Début:" and "Fin:", both containing the value "0".

At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Annuler".

1.11. Détermination de la quantité de chaleur dans les échangeurs simples

La chaleur encore disponible en sortie des échangeurs de récupération peut être récupérée afin de préchauffer l'eau de la chaudière. Les condensats sont refroidis dans les échangeurs « HEX2-HP-Bis » et « HEX3-HP-Bis ». Ces consigneurs sont couplés à des échangeurs simples par des courants d'information :



Pour ce faire, les courants d'information sortant des consigneurs de température « Cooler/Heater 1 » et « Cooler/Heater 2 » envoient les quantités de chaleur aux échangeurs simples « HEX2-HP » et « HEX3-HP ». Le paramétrage de ces deux courants d'information est le suivant :

Courant information (SISTR10)

Nom: Q

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 "Cooler/Heater 1"

Début: 0 Fin: 0

Nature de l'information à récupérer:

Quantité de chaleur

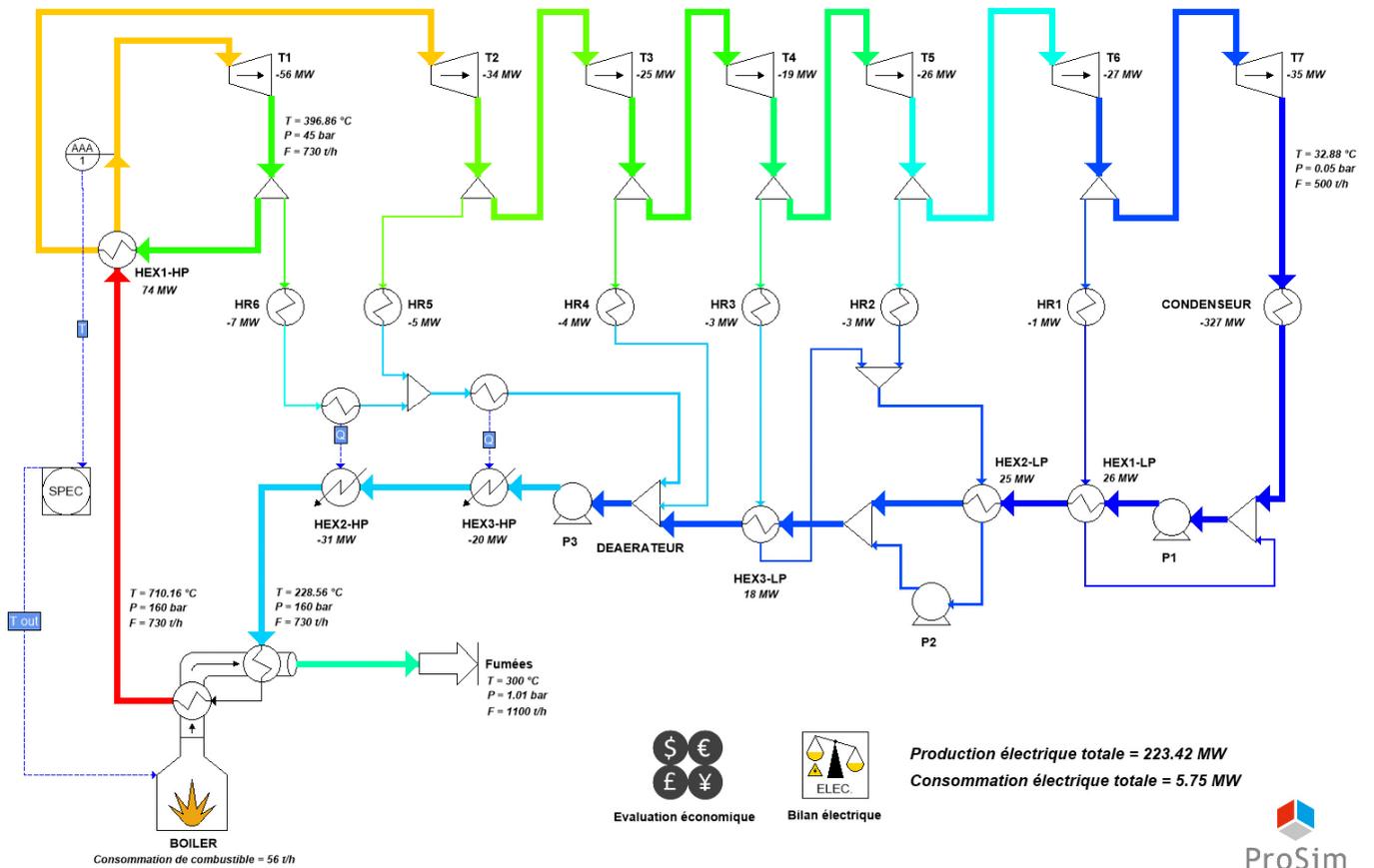
Le segment d'information à recevoir sera déterminé automatiquement en fonction des paramètres du module "HEX3-HP"

Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

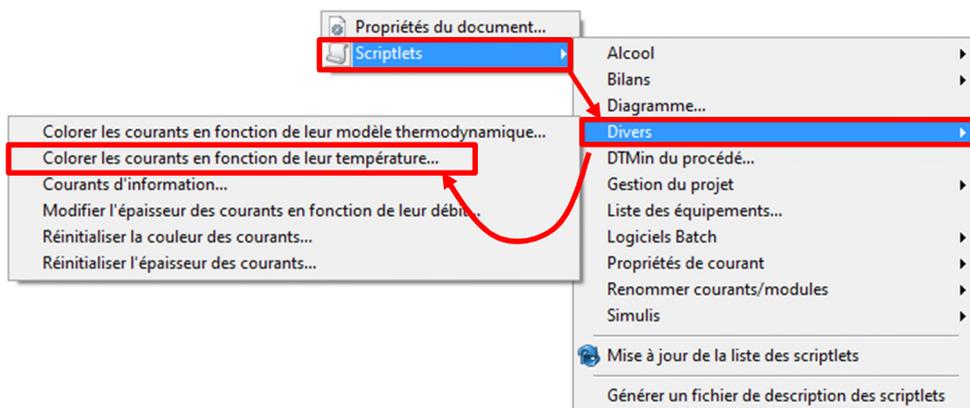
1.12. « Trucs et astuces »

Cogénération par turbines à vapeur

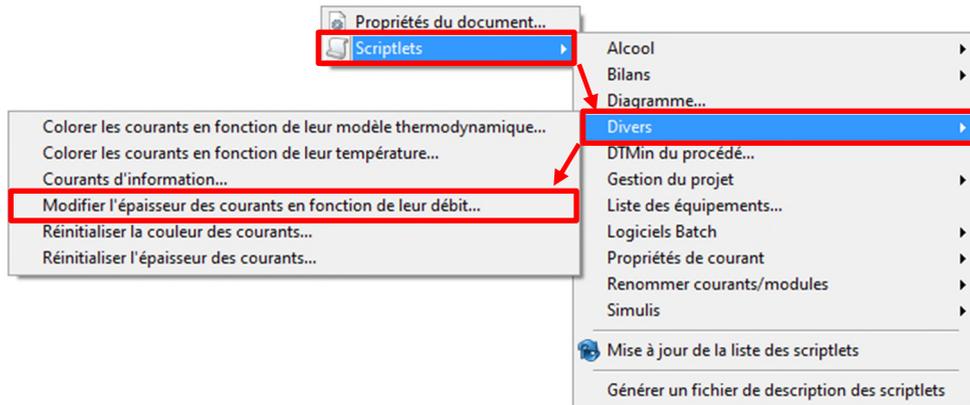


- Pour mieux repérer les niveaux de températures dans le procédé, les courants matières sont colorés en fonction de la température avec la fonction « Scriptlets ». Les couleurs varient de la couleur rouge qui représente le courant le plus chaud à la couleur bleue qui représente le courant le plus froid du procédé.

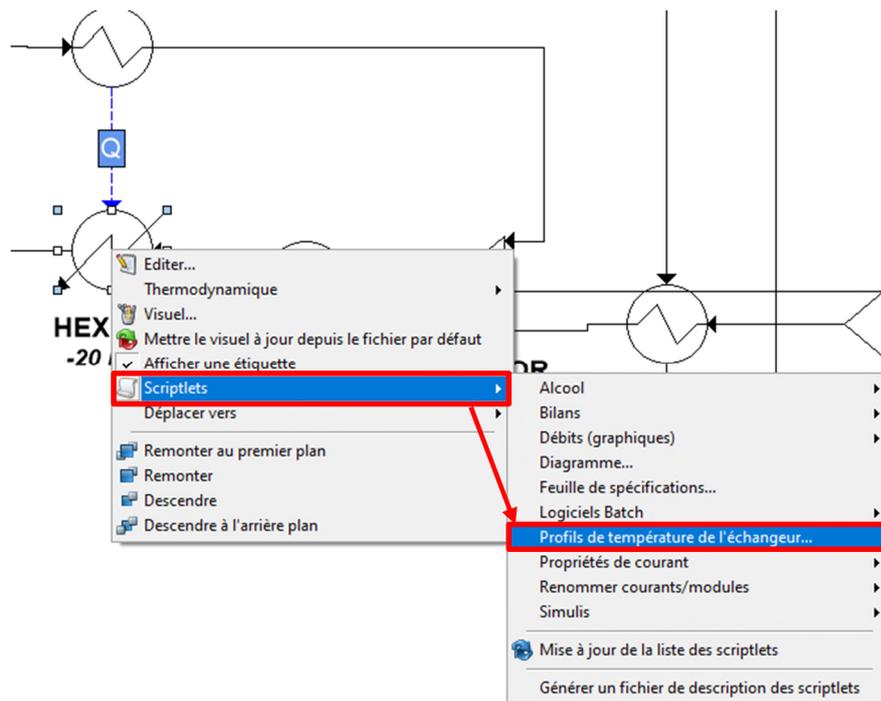
Pour utiliser ce scriptlet, il faut faire un clic droit sur l'arrière-plan du flowsheet (partie vide du flowsheet) :



Les épaisseurs des courants peuvent être également modifiées en fonction de leur débit. L'épaisseur du courant devient proportionnelle au débit (massique ou molaire selon le choix de l'utilisateur) du courant.

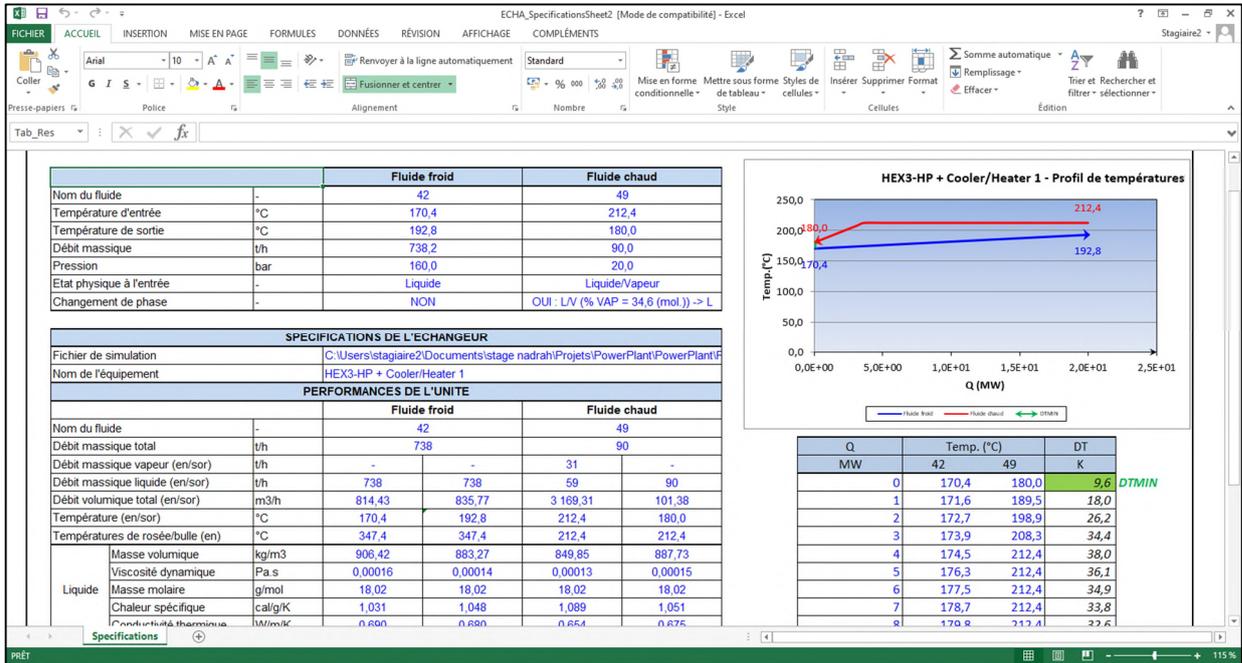


- Le profil de température de l'échangeur peut être visualisé avec la fonction « Scriptlets ». Pour utiliser ce scriptlet, il faut faire un clic droit sur le module de l'échangeur :

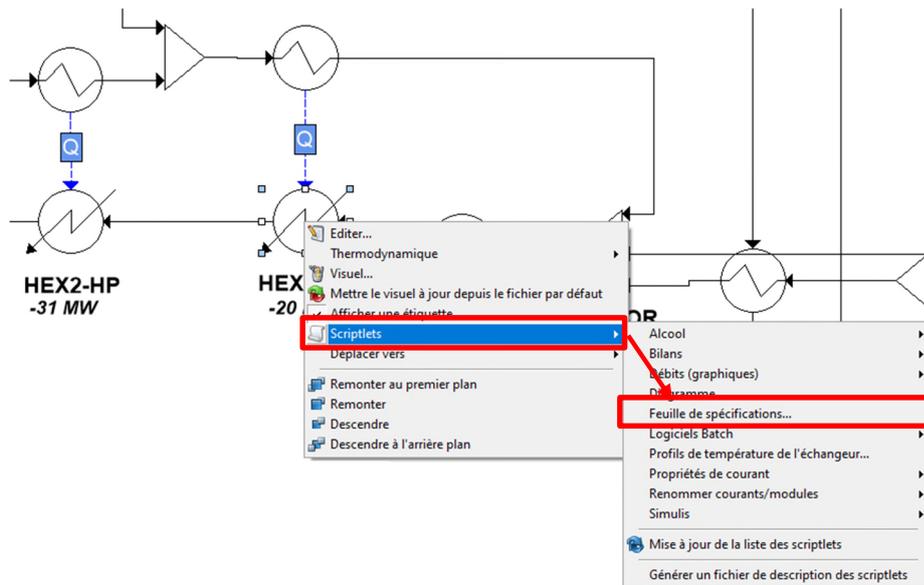


Remarque : il est bien entendu évident que le profil de température est inaccessible pour un consignateur de température qui n'est pas couplé avec un autre échangeur via un courant d'information.

- Avec les « Scriptlets », il est également possible de générer une feuille de spécifications d'un échangeur de chaleur. Il s'agit d'un fichier Microsoft™ Excel donnant les bilans matière et enthalpique des courants matière entrant et sortant de l'échangeur ainsi que son profil de température comme montré dans la figure suivante :



Pour ce faire, il faut cliquer sur « Feuille de spécifications » (après un clic droit sur l'échangeur) comme montré ci-dessous :



2. RESULTATS

2.1. Puissance électrique produite

Les principaux résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Résultats de simulation	Notation	Valeur
T1 (MW)	A	56
T2 (MW)	B	35
T3 (MW)	C	25
T4 (MW)	D	19
T5 (MW)	E	26
T6 (MW)	F	27
T7 (MW)	G	35
Puissance électrique W (MW)	H (= A+B+C+D+E+F+G)	223
Débit de gaz naturel (t/h)	I	56
Puissance utile de la chaudière (MW)	J	582
Rendement (%)	K (= (H/J)x100)	38,3

2.2. Puissance thermique récupérée

Résultats de simulation	Notation	Valeur
HR1 (MW)	L	1
HR2 (MW)	M	3
HR3 (MW)	N	3
HR4 (MW)	O	4
HR5 (MW)	P	5
HR6 (MW)	Q	7
Chaleur récupérée Q_R (MW)	R (= L+M+N+O+P+Q)	23

2.3. Analyse économique

Les gains d'exploitations sont de 62 M€/an d'électricité et 9 M€/an de chaleur pour le réseau urbain. Les dépenses sont de 200 M€/an.

3. BIBLIOGRAPHIE

- [WIL19] Wilding, W. V.; Knotts, T. A.; Giles, N. F.; Rowley, R. L. DIPPR Data Compilation of Pure Chemical Properties; Design Institute for Physical Properties, AIChE: New York, NY (2019)