

EXEMPLE D'APPLICATION PROSIMPLUS

PRODUCTION ET VALORISATION DE BIOGAZ PRODUIT PAR METHANISATION

INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple présente la simulation d'un procédé de production et de valorisation thermique de biogaz produit par méthanisation.

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

FICHIERS PROSIMPLUS	PSPS_EX_FR-Production-et-valorisation-biogaz--méthanisation-absorption-eau.pmp3
CORRESPONDANT	PSPS_EX_FR-Production-et-valorisation-biogaz--méthanisation-absorption-amines.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.

Energy

Fives ProSim

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

Tél. : +33 (0)5 62 88 24 30

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

www.fivesgroup.com / www.fives-prosim.com

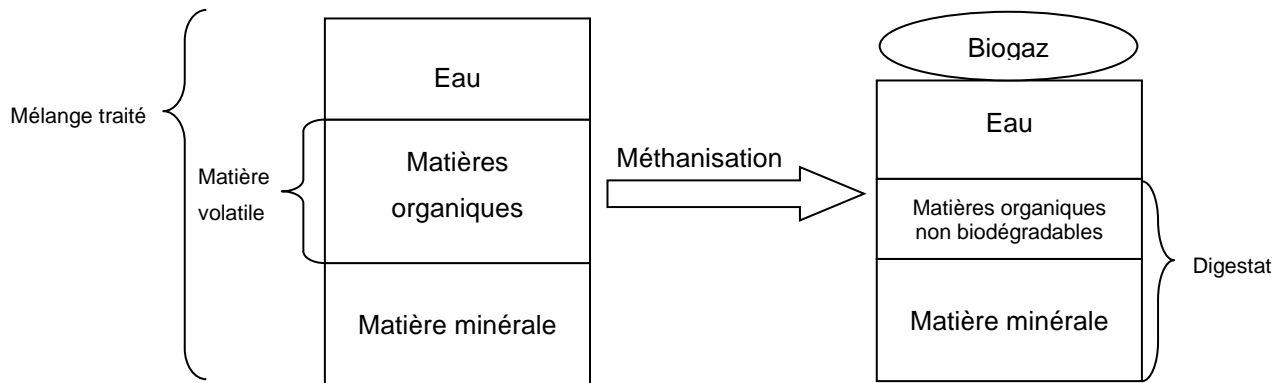
TABLE DES MATIÈRES

1. MODELISATION DU PROCEDE	3
1.1. Présentation du procédé	3
1.2. Schémas de simulation	5
1.3. Constituants	7
1.4. Modèle thermodynamique	8
1.5. Conditions opératoires	9
1.5.1. Section de production du biogaz « Biogaz production »	9
1.5.2. Section de traitement du biogaz « Gaz treatment unit »	10
1.5.3. Section de production de chaleur « Heat production »	16
1.5.4. Récupération de chaleur	17
1.6. Initialisations	18
1.6.1. Cas de l'absorption à l'eau	18
1.6.2. Cas de l'absorption aux amines	18
1.7. « Trucs et astuces »	19
1.7.1. Calcul des PCI	19
1.7.2. Profils de température	23
1.7.3. Taux de récupération	24
2. RESULTATS	27
2.1. Performance du procédé	27
2.2. Propriétés du biogaz produit	27
2.2.1. Cas de l'absorption à l'eau	27
2.2.2. Cas de l'absorption aux amines	28
2.3. Propriétés du digestat	28
2.4. Propriétés de la chaudière	28
3. BIBLIOGRAPHIE	30

1. MODELISATION DU PROCEDE

1.1. Présentation du procédé

La méthanisation est un procédé de production de biogaz à partir de matière organique.



La matière volatile, notée MV, est la partie organique du mélange traité, c'est-à-dire les constituants susceptibles de produire du biogaz. Le mélange traité est composé de l'ensemble des constituants entrants dans le réacteur de méthanisation.

Cette matière organique est décomposée par des micro-organismes dans des digesteurs anaérobies (absence d'oxygène) pour former le biogaz composé principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), ainsi que le digestat (composé de la matière organique et inorganique non dégradables dans les conditions du procédé).

Le biogaz produit par méthanisation peut contenir plusieurs polluants : des composés soufrés, des composés organo-halogénés, des composés organiques volatiles (COV).

Afin d'améliorer la qualité du biogaz, il est généralement purifié de ces substances indésirables. La principale raison de cette purification réside dans la prévention de la corrosion et de l'usure mécanique des équipements dans lesquels le biogaz est utilisé.

Le biogaz produit peut être valorisé de différentes manières : la production de chaleur (combustion du biogaz dans une chaudière), la production d'électricité (chaudière à gaz associée à une turbine à vapeur, moteur à combustion interne, turbine à gaz), la cogénération (production d'électricité et récupération de la chaleur résiduelle), la production de carburant automobile ou encore l'introduction dans les réseaux de gaz naturel.

Le traitement des déchets municipaux par méthanisation a démarré à l'échelle industrielle en 1988 avec la première installation au monde à Amiens, traitant 80 000 t/an de déchets ménagers et utilisant un digesteur mis au point par la société Valorga. Depuis, des améliorations sur la qualité des déchets collectés et/ou triés a permis un développement important de cette technologie en Europe et dans le monde [APE07].

Le procédé Valorga utilise la technique du traitement anaérobie de déchets organiques humides. Le procédé est constitué en amont d'une chaîne de tri des entrants pour éliminer au maximum les indésirables (métaux, ferrailles, verre...), et en aval d'une chaudière pour produire de la vapeur avec le biogaz. Le procédé traite ainsi 110 000 t/an de déchets entrants dans l'usine dont 30 000 t/an sont retirés par le tri. Au final, 80 000 t/an de ces déchets sont traités dans les digesteurs ([ROB21] et [VAL21]).

Cet exemple présente la valorisation du biogaz par production de chaleur via une chaudière biogaz.

Dans ce contexte, le procédé est décomposé en 3 parties :

- ✓ Une partie pour la production du biogaz (réacteur de méthanisation) ;
- ✓ Une partie pour le traitement du biogaz ;
- ✓ Une partie pour la valorisation par production de chaleur.

Cet exemple présente également 2 solutions techniques pour le traitement du biogaz :

- ✓ Traitement par absorption-désorption à l'eau ;
- ✓ Traitement par absorption-désorption avec un mélange monoéthanolamine (MEA) et eau.

1.2. Schémas de simulation

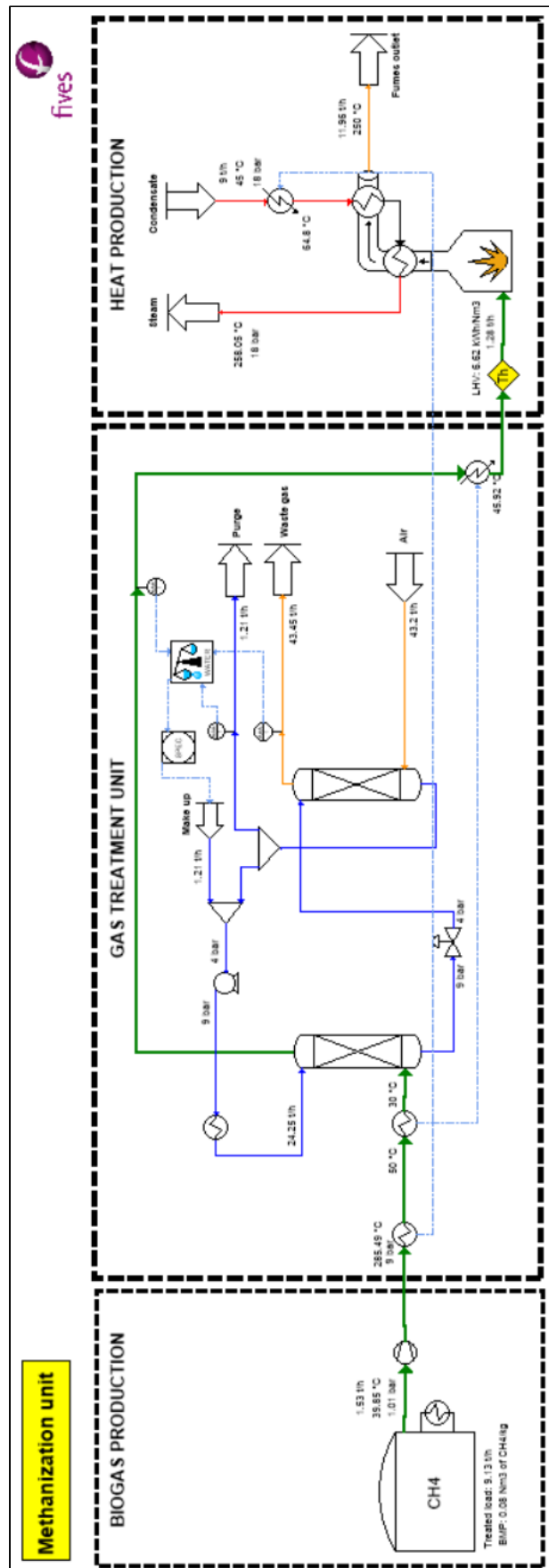


Schéma de simulation avec traitement à l'eau du biogaz

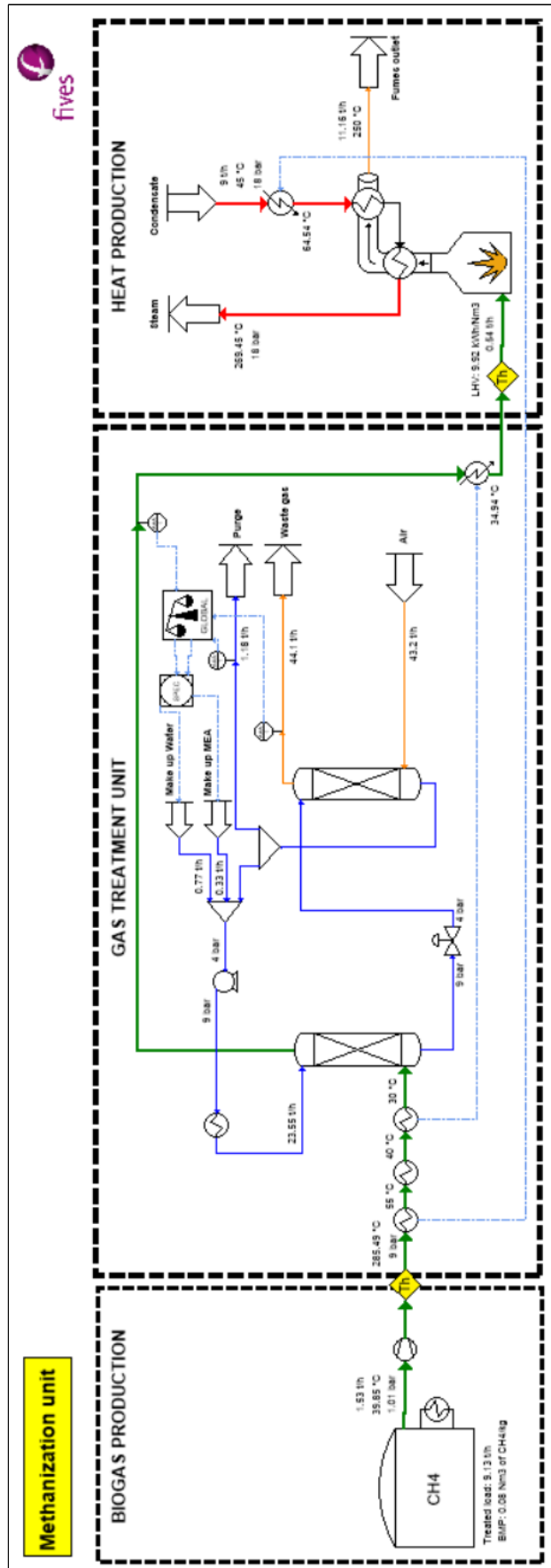


Schéma de simulation avec traitement aux amines du biogaz

1.3. Constituants

Les constituants pris en compte dans la simulation ainsi que leurs formules chimiques et leurs numéros CAS¹ sont présentés dans le tableau ci-après. Les propriétés de corps purs sont extraites de la base de données standard des logiciels ProSim [WIL21].

Constituant	Formule chimique	Numéro CAS ⁽¹⁾
Water	H ₂ O	7732-18-5
Oxygen	O ₂	7782-44-7
Hydrogen	H ₂	1333-74-0
Nitrogen	N ₂	7727-37-9
Carbon dioxide	CO ₂	124-38-9
Methane	CH ₄	74-82-8
Ammonia	NH ₃	7664-41-7
Hydrogen sulfide	H ₂ S	7783-06-4
Sulphur dioxide	SO ₂	7446-09-5
Nitric oxide	NO	10102-43-9
Nitrogen dioxide	NO ₂	10102-44-0
Carbon monoxide	CO	630-08-0
Sulphur trioxide	SO ₃	7446-11-9
Monoethanolamine	C ₂ H ₇ NO	141-43-5

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

1.4. Modèle thermodynamique

Quatre « calculator » thermodynamiques sont définis pour simuler cet exemple :

- « Process » : ce calculator contient tous les constituants définis précédemment, exceptés l'hydrogène, le trioxyde de soufre et la monoéthanolamine. Il est utilisé pour la section de production du biogaz et celle de son traitement (cas du traitement du biogaz à l'eau uniquement). Le profil thermodynamique retenu est « PSRK ».
- « Fumes » : ce calculator contient tous les constituants définis précédemment, exceptés le dioxyde d'azote et la monoéthanolamine. Il est spécifiquement utilisé pour modéliser la section de production de chaleur à partir du biogaz. Le modèle thermodynamique retenu est le profil « Idéal ».
- « Utility » : ce calculator est utilisé pour les courants d'eau pure (vapeur et condensats) circulant dans la chaudière. Le modèle thermodynamique est le modèle spécifique « eau pure ».
- « Amine treatment » : Ce calculator contient tous les constituants définis précédemment, exceptés l'hydrogène et le trioxyde de soufre. Il est utilisé pour la section de traitement du biogaz dans le cas où ce dernier est effectué avec une solution aqueuse de MEA. Le profil thermodynamique utilisé pour ce calculator est « Amines et gaz acides »

1.5. Conditions opératoires

1.5.1. Section de production du biogaz « Biogaz production »

- ✓ Réacteur de méthanisation « Methanization reactor »

Compositions massiques sur sec (%)	
Carbone	44,5
Hydrogène	5
Oxygène	10
Azote	0,4
Soufre	0,1
Eau	45
Manganèse	40
Débit massique (kg/h)	9129,6
Pression en entrée (atm)	1

Débit d'ordures traitées = 80 000 t/an = 9,13 t/h (en fonctionnement 365 j/an, 24 h/jour).

- ✓ Compresseur généralisé « Compressor »

Type de compresseur	<i>Isentropique</i>
Pression de refoulement (bar)	9
Efficacité isentropique	0,7
Efficacité mécanique	0,8
Efficacité électrique	0,9

1.5.2. Section de traitement du biogaz « Gaz treatment unit »

1.5.2.1. Cas du traitement à l'eau

✓ Alimentations

Nom :	Make up	Air
Fractions :	massiques	molaires
Water	1	0
Oxygen	0	0,21
Nitrogen	0	0,79
Carbon dioxide	0	0
Methane	0	0
Ammonia	0	0
Hydrogen sulfide	0	0
Nitric oxide	0	0
Nitrogen dioxide	0	0
Débit massique (kg/h)	10	43200
Température (°C)	25	25
Pression (bar)	4	1,01325

Le débit du courant d'alimentation « Make up » est initialisé à 10 kg/h. Ce débit est une variable d'action du module de spécification décrit dans les paragraphes suivants.

✓ Consignateurs de température

Nom	Température de sortie (°C)
HEX 1	50
HEX 2	30
HEX 3	7

✓ Diviseur de courants « Splitter »

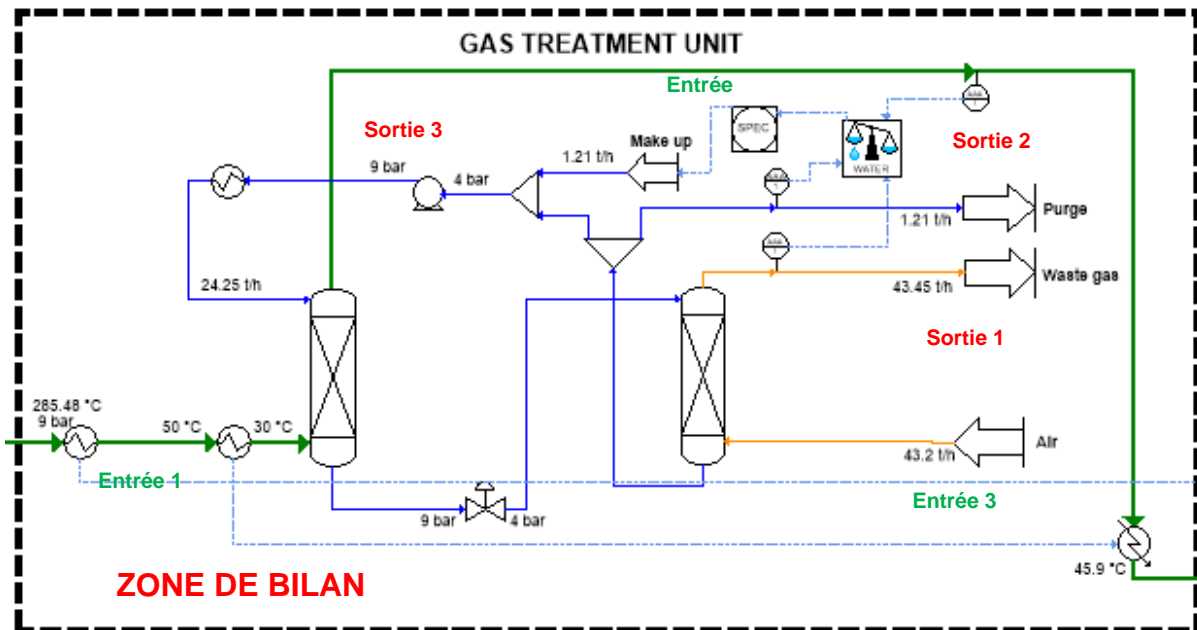
Spécification fournie	<i>Taux de partage</i>
Taux de partage	0,95
Courant calculé automatiquement	<i>Courant entrant dans le mélangeur</i>

✓ Pompe centrifuge « Pump »

Spécification fournie	<i>Pression</i>
Pression de refoulement (bar)	9
Efficacité volumétrique	0,65
Efficacité mécanique	0,9
Efficacité électrique	0,98

✓ Bilan d'eau « Water balance »

Entrées		Sorties	
De	Vers	De	Vers
HEX 1	HEX 2	Water flowrate 2	Waste gas
Make up	Mixer	Water flowrate 3	Purge
Air	Stripper	Absorber	Water flowrate



✓ Colonnes

Nom	<i>Absorber</i>	<i>Stripper</i>
Nombre d'étages théoriques	10	10
Pression (bar)	9	4
Efficacité des plateaux	1	1

- ✓ Vanne de détente « Valve »

Type de contrainte	<i>Spécification de la pression</i>
Spécification pour la pression (bar)	4

- ✓ Echangeur simple « HEX2-bis »

Quantité de chaleur (kcal/h)	Transmise (courant d'information) depuis HEX2
-------------------------------------	---

- ✓ Gestion des contraintes et des recyclages (SPEC). Le module Gestion des contraintes et des recyclages est nécessaire pour ajuster l'appoint. Le paramétrage de ce module est le suivant :

La valeur du facteur de relaxation initial a été modifiée de 1 à 0,1 pour assurer la convergence du fichier de simulation.

Ce module de gestion des contraintes et des recyclages (SPEC) récupère l'écart entre les entrées et les sorties en eau calculé grâce au module de « Bilan eau » et ajuste le débit d'eau de l'alimentation « Make up » afin de déterminer la valeur de l'appoint en eau.

1.5.2.2. Cas du traitement aux amines

Il est à noter qu'un exemple plus détaillé concernant le traitement de gaz contenant du CO₂ avec des solutions aqueuses d'alkanolamines est disponible dans la librairie d'exemples de ProSimPlus. Il s'agit de l'exemple « PSPS_E19_FR_Procédés-capture-co2-avec-amine.pmp3 ».

- ✓ Calculator Switch

Modèle thermodynamique	« Amine treatment »
-------------------------------	---------------------

- ✓ Alimentations

Nom :	Make up Water	Make up MEA	Air
Fractions :	massiques	massiques	molaires
Water	1	0	0
Oxygen	0	0	0,21
Nitrogen	0	0	0,79
Carbon dioxide	0	0	0
Methane	0	0	0
Ammonia	0	0	0
Hydrogen sulfide	0	0	0
Nitric oxide	0	0	0
Nitrogen dioxide	0	0	0
Monoethanolamine	0	1	0
Débit massique (kg/h)	725	320	43200
Température (°C)	25	25	25
Pression (bar)	4	4	1,01325

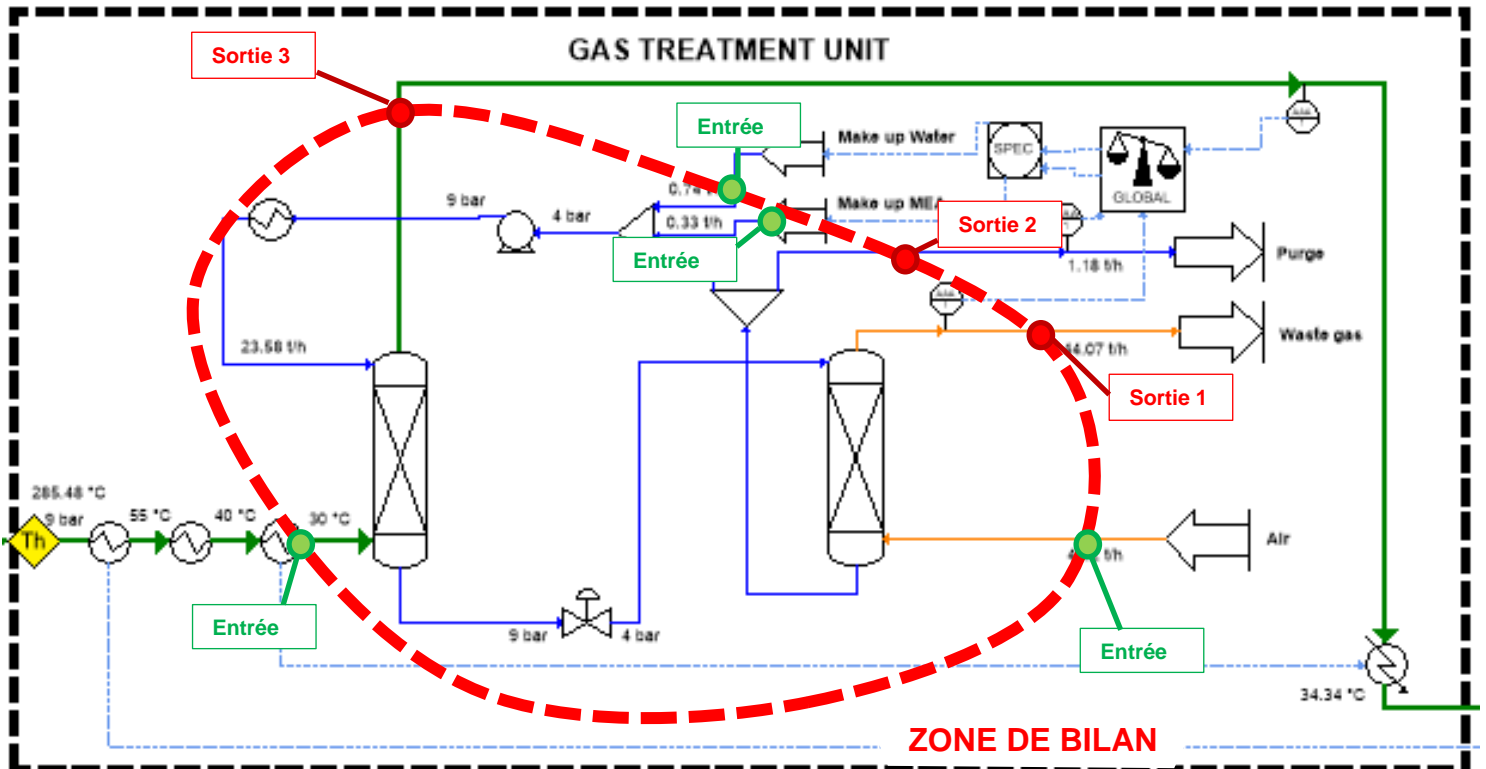
Le débit des courants d'alimentation « Make up Water » et « Make up MEA » sont respectivement initialisés à 725 kg/h et 320 kg/h. Ces débits sont des variables d'action du module de spécification décrit dans les paragraphes suivants.

✓ Consignateurs de température

Nom	Température de sortie (°C)
HEX 1	55
HEX 2	30
HEX 3	7
HEX 4	40

✓ Bilan généralisé « Generalized balance »

Entrée		Sortie	
De	Vers	De	Vers
HEX 2	Absorber	Water flowrate 2	Waste gas
Make up MEA	Mixer	Water flowrate 3	Purge
Air	Stripper	Absorber	Water flowrate
Make up water	Mixer		



- ✓ Echangeur simple « HEX2-bis »

Quantité de chaleur (kcal/h)	Transmise (courant d'information) depuis HEX2
-------------------------------------	---

Les modules « splitter », « Pump », « Absorbers », « Valve » et « Constraints and Recycles » sont configurés de façon identique au cas du traitement du biogaz à l'eau. Ce module de gestion des contraintes et des recyclages (SPEC) récupère les écarts entre les entrées et les sorties en eau et en MEA calculés grâce au module de « Bilan généralisé » et ajuste les débits des alimentations « Make up water » et « Make up MEA » afin de déterminer la valeur de l'appoint en eau et en monoéthanolamine (MEA).

1.5.3. Section de production de chaleur « Heat production »

✓ Alimentation

Nom :	Condensate
Fractions molaires :	
Water	1
Oxygen	0
Nitrogen	0
Carbon dioxide	0
Methane	0
Ammonia	0
Hydrogen sulfide	0
Nitric oxide	0
Nitrogen dioxide	0
Débit massique (kg/h)	9000
Température (°C)	45
Pression (bar)	18

✓ Calculator Switch

Modèle thermodynamique	« Fumes »
-------------------------------	-----------

✓ Chaudière « Boiler »

Type d'échangeur	<i>Contre – courant pur</i>
Température de sortie des fumées (°C)	250
Type de comburant	<i>Air</i>
% d'O₂ massique dans les fumées en sortie de combustion	3
Pression d'entrée du comburant (atm)	1

✓ Echangeur simple « HEX1-bis »

Quantité de chaleur (kcal/h)	Transmise (courant d'information) depuis HEX1
-------------------------------------	---

Remarque : tous les mélangeurs sont définis avec les valeurs par défaut (la pression de sortie est la plus faible des alimentations).

1.5.4. Récupération de chaleur

Les deux consigneurs de température de la partie « Gas treatment unit » sont reliés à des échangeurs simples par des courants d'information. Ces courants permettent de récupérer la chaleur calculée au niveau des consigneurs de température afin de chauffer le biogaz à l'entrée de la chaudière et de chauffer le retour des condensats. Les courants d'information sont configurés comme suit :

Courant information (SISTR5)

Nom: Heat duty HEX1

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 "HEX1"

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 "HEX1-bis"

Début: 0 Fin: 0

OK Annuler

1.6. Initialisations

1.6.1. Cas de l'absorption à l'eau

La séquence de calcul est automatiquement déterminée par ProSimPlus. Un courant coupé est détecté : le courant « 16 » (sortie de la pompe en entrée de l'absorbeur). L'initialisation suivante est utilisée :

Courant	16
Débit massique (kg/h)	
Water	25 500

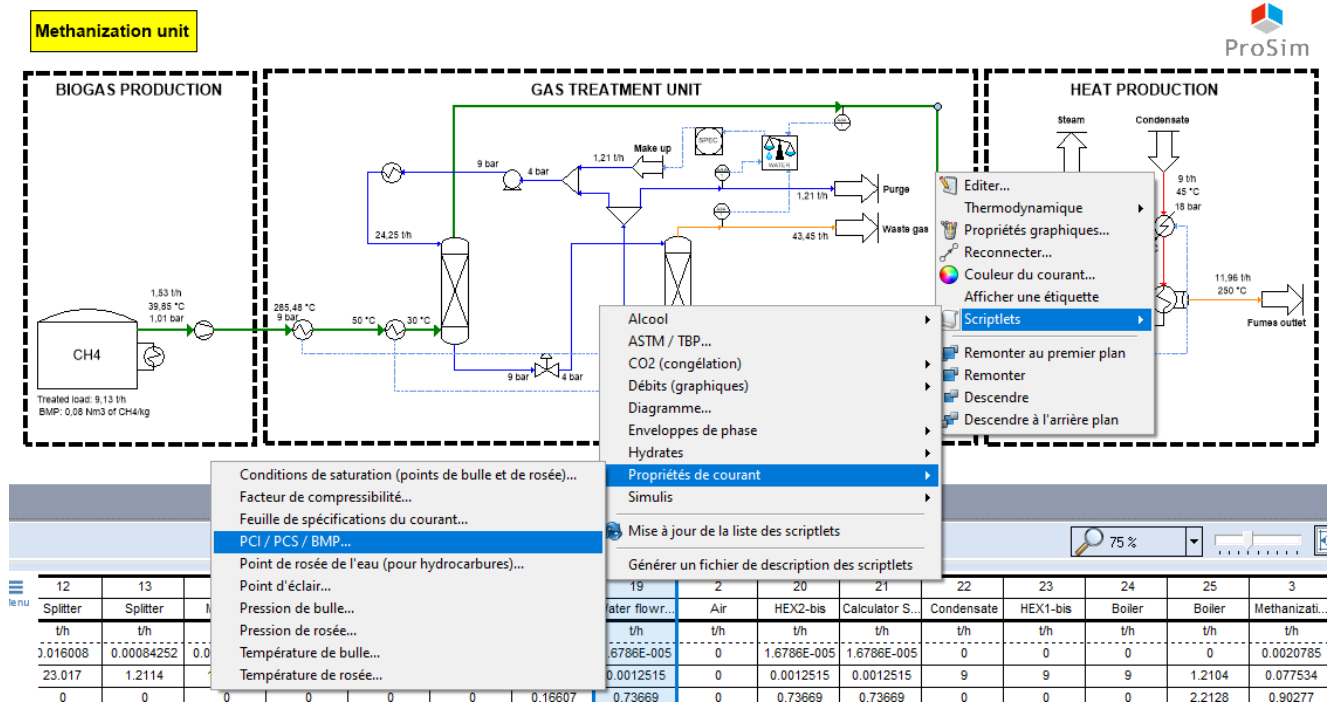
1.6.2. Cas de l'absorption aux amines

La séquence de calcul est automatiquement déterminée par ProSimPlus. Un courant coupé est détecté : le courant « 19 » (sortie de la pompe en entrée de l'absorbeur). L'initialisation suivante est utilisée :

Courant	19
Débit molaire (kmol/h)	
Water	819,09
Oxygen	$1,76 \cdot 10^{-2}$
Nitrogen	$3,05 \cdot 10^{-2}$
Carbon dioxide	50,24
Methane	0
Ammonia	1,93
Hydrogen sulfide	$4,75 \cdot 10^{-5}$
Nitric oxide	0
Nitrogen dioxide	0
Monoéthanolamine	108,21

1.7. « Trucs et astuces »

1.7.1. Calcul des PCI



L'utilisation du scriptlet « PCI / PCS / BMP » permet de comparer la valeur des Pouvoirs Calorifiques Inférieurs (PCI, quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'un combustible) du biogaz à la sortie du digesteur et du biogaz après traitement.

Pouvoirs calorifiques du biogaz avant épuration :

Pouvoirs calorifiques et Pouvoir méthanogène			
Propriété	Notation	Unité	4
Pouvoir Calorifique Inférieur	PCI	kWh/Nm3	5,73051
		Btu/scf	524,224
		cal/g	4256,86
Pouvoir Calorifique Supérieur	PCS	kWh/Nm3	6,39767
		Btu/scf	585,256
		cal/g	4752,46
Pouvoir méthanogène	BMP	Nm3 de CH4/mol	0
		Nm3 de CH4/kg	0
O2 nécessaire à la combustion totale		mol d'O2/mol	1,15380
H2O nécessaire à la méthanisation		mol de H2O/mol	0

Pouvoirs calorifiques du biogaz après épuration dans le cas du traitement à l'eau :

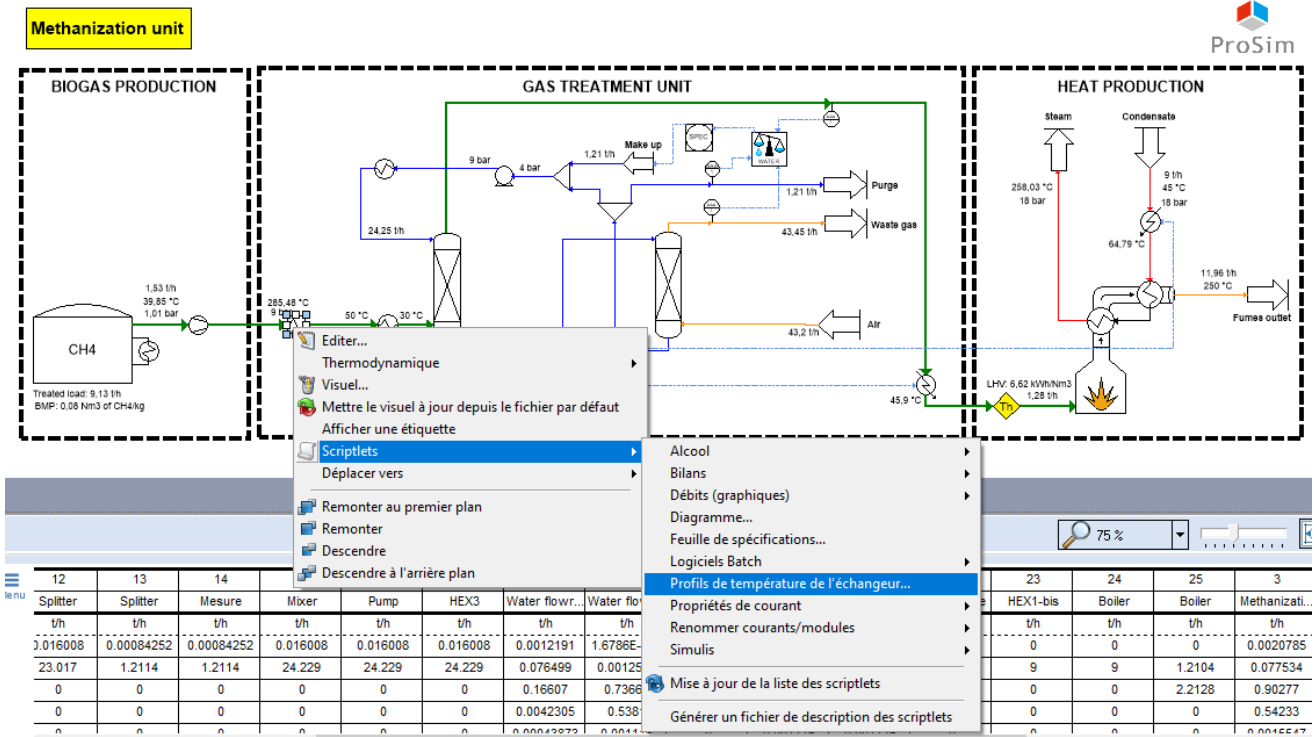
Pouvoirs calorifiques et Pouvoir méthanogène			
Propriété	Notation	Unité	20
Pouvoir Calorifique Inférieur	PCI	kWh/Nm3	6,61666
		Btu/scf	605,289
		cal/g	5032,71
Pouvoir Calorifique Supérieur	PCS	kWh/Nm3	7,34061
		Btu/scf	671,515
		cal/g	5583,36
Pouvoir méthanogène	BMP	Nm3 de CH4/mol	0
		Nm3 de CH4/kg	0
O2 nécessaire à la combustion totale		mol d'O2/mol	1,32996
H2O nécessaire à la méthanisation		mol de H2O/mol	0

Pouvoirs calorifiques du biogaz après épuration dans le cas du traitement aux amines :

Pouvoirs calorifiques et Pouvoir méthanogène			
Propriété	Notation	Unité	23
Pouvoir Calorifique Inférieur	PCI	kWh/Nm3	9,91870
		Btu/scf	907,358
		cal/g	11905,2
Pouvoir Calorifique Supérieur	PCS	kWh/Nm3	11,0037
		Btu/scf	1006,61
		cal/g	13207,5
Pouvoir méthanogène	BMP	Nm3 de CH4/mol	0
		Nm3 de CH4/kg	0
O2 nécessaire à la combustion totale		mol d'O2/mol	1,99382
H2O nécessaire à la méthanisation		mol de H2O/mol	0

Le pouvoir calorifique du biogaz est meilleur après épuration car la composition en méthane est plus importante (le traitement a permis d'éliminer les composés indésirables et également une partie du dioxyde de carbone). Il est encore meilleur dans le cas de l'absorption aux amines ; ce traitement est bien plus efficace (la réaction mise en œuvre dans la colonne d'absorption est très sélective par rapport au dioxyde de carbone).

1.7.2. Profils de température



Ce second scriptlet permet d'obtenir le profil de température des échangeurs. La simulation d'une association « consignateur de température – échangeur simple » (modules liés par un courant d'information transférant la quantité de chaleur échangée) est équivalente à la simulation d'un échangeur généralisé. De ce fait, il est possible de comparer les évolutions des températures de la source chaude et de la source froide.

Il faut tout d'abord choisir le type d'échangeur. Ici, il s'agit d'un échangeur fonctionnant à contre-courant :

Choix

Veuillez sélectionner le type d'échange pour le couplage entre les modules suivants :

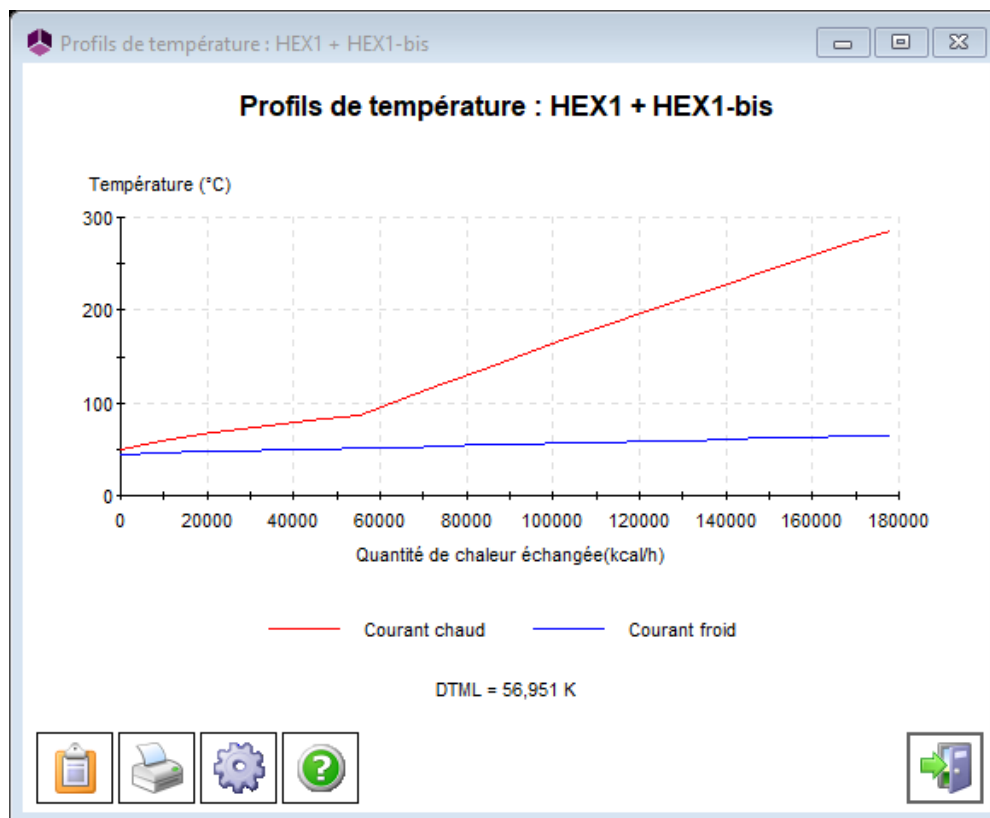
- HEX1
- HEX1-bis

Type d'échange

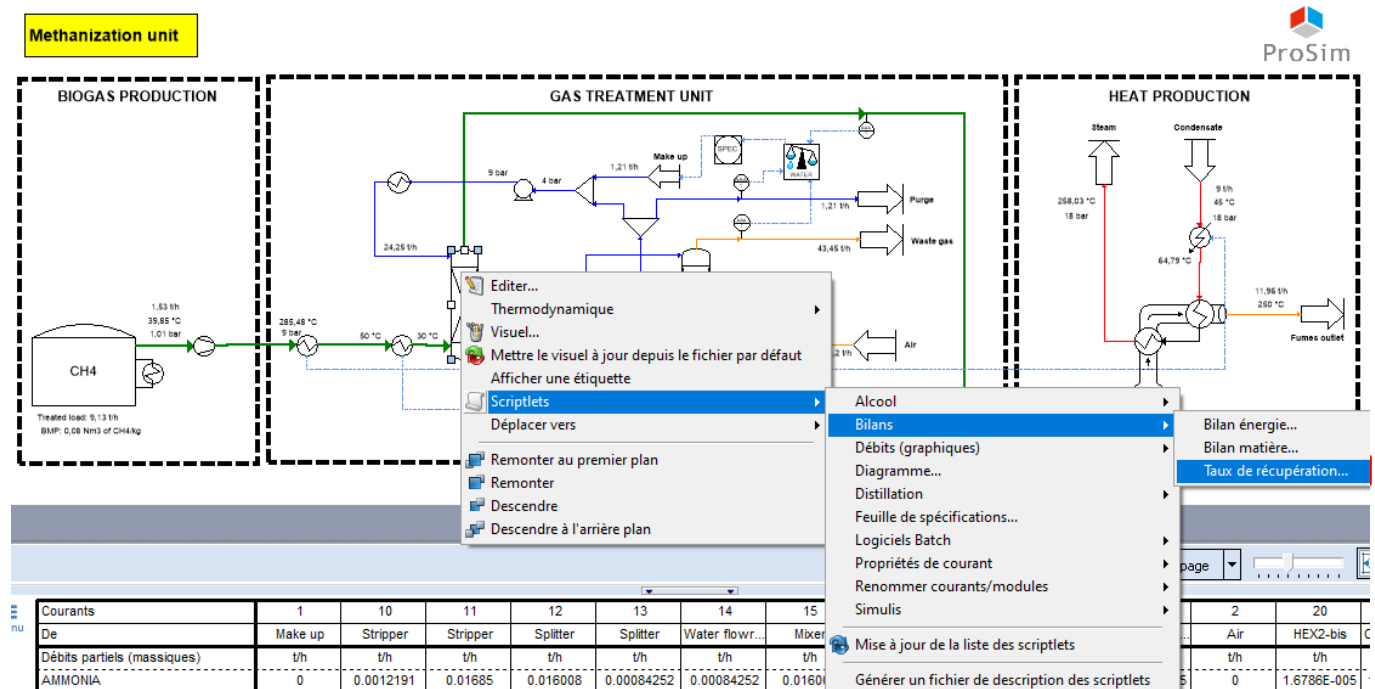
Contre-courant

Co-Courant

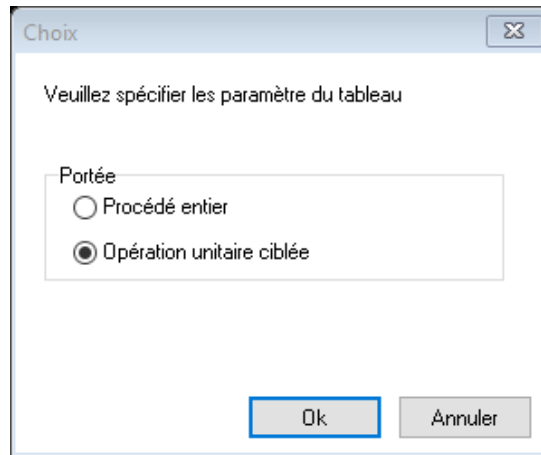
Le profil de température suivant est obtenu :



1.7.3. Taux de récupération



Ce dernier scriptlet permet de calculer les taux de récupération des colonnes d'absorption.



Il est possible de calculer les taux de récupération sur le procédé global ou bien sur une opération unitaire ciblée. Les taux de récupération sont obtenus pour chaque courant et chaque constituant, comme présenté dans la copie d'écran ci-dessous. Ici, il s'agit des taux de récupération pour le module « Absorber » dans le cas du traitement à l'eau, puis dans le cas du traitement aux amines.

Courants	7	8
AMMONIA	0,09%	99,91%
WATER		99,99%
CARBON DIOXIDE	81,60%	18,40%
METHANE	99,22%	0,78%
HYDROGEN SULFIDE	71,78%	28,22%
SULFUR DIOXIDE		
NITRIC OXIDE		
OXYGEN	100,00%	
NITROGEN	100,00%	
NITROGEN DIOXIDE		
CARBON MONOXIDE		
SULFUR TRIOXIDE		
HYDROGEN		

Taux de récupération

Courants	10	11
AMMONIA	0,05%	99,95%
WATER		99,99%
CARBON DIOXIDE		100,00%
METHANE	99,37%	0,63%
HYDROGEN SULFIDE		100,00%
SULFUR DIOXIDE		
NITRIC OXIDE		
OXYGEN	100,00%	
NITROGEN	100,00%	
NITROGEN DIOXIDE		
CARBON MONOXIDE		
SULFUR TRIOXIDE		
HYDROGEN		
MONOETHANOLAMINE		100,00%

Clipboard icon, Save icon, Export icon

2. RESULTATS

2.1. Performance du procédé

Résultats de simulation	
Rendement en CH_4 (Nm^3 de CH_4 / t de MV entrante)	251
Rendement de biogaz (Nm^3 de biogaz / t de mélange traité entrant)	144
Taux de conversion global	0,29
Taux d'abattage de la DCO	0,29

2.2. Propriétés du biogaz produit

2.2.1. Cas de l'absorption à l'eau

	Avant épuration	Après épuration
Fractions massiques :		
Ammonia	$1.36 * 10^{-3}$	$1,3 * 10^{-5}$
Water	0.05	$9.8 * 10^{-4}$
Carbon dioxide	0.59	0.58
Methane	0.35	0.42
Hydrogen sulfide	$1.02 * 10^{-3}$	$8.7 * 10^{-4}$
PCI du biogaz (kWh/Nm^3)	5.73	6.62

2.2.2. Cas de l'absorption aux amines

	Avant épuration	Après épuration
Fractions massiques :		
Ammonia	$1.36 * 10^{-3}$	$3,0 * 10^{-5}$
Water	0.05	$1.45 * 10^{-3}$
Carbon dioxide	0.59	$1.22 * 10^{-4}$
Methane	0.35	0.996
Hydrogen sulfide	$1.02 * 10^{-3}$	0
PCI du biogaz (kWh/Nm^3)	5.73	9.92

2.3. Propriétés du digestat

Le débit de digestat est de 7,6 t/h contenant 45 % d'humidité (massique). Ce digestat est pressé par la suite pour obtenir :

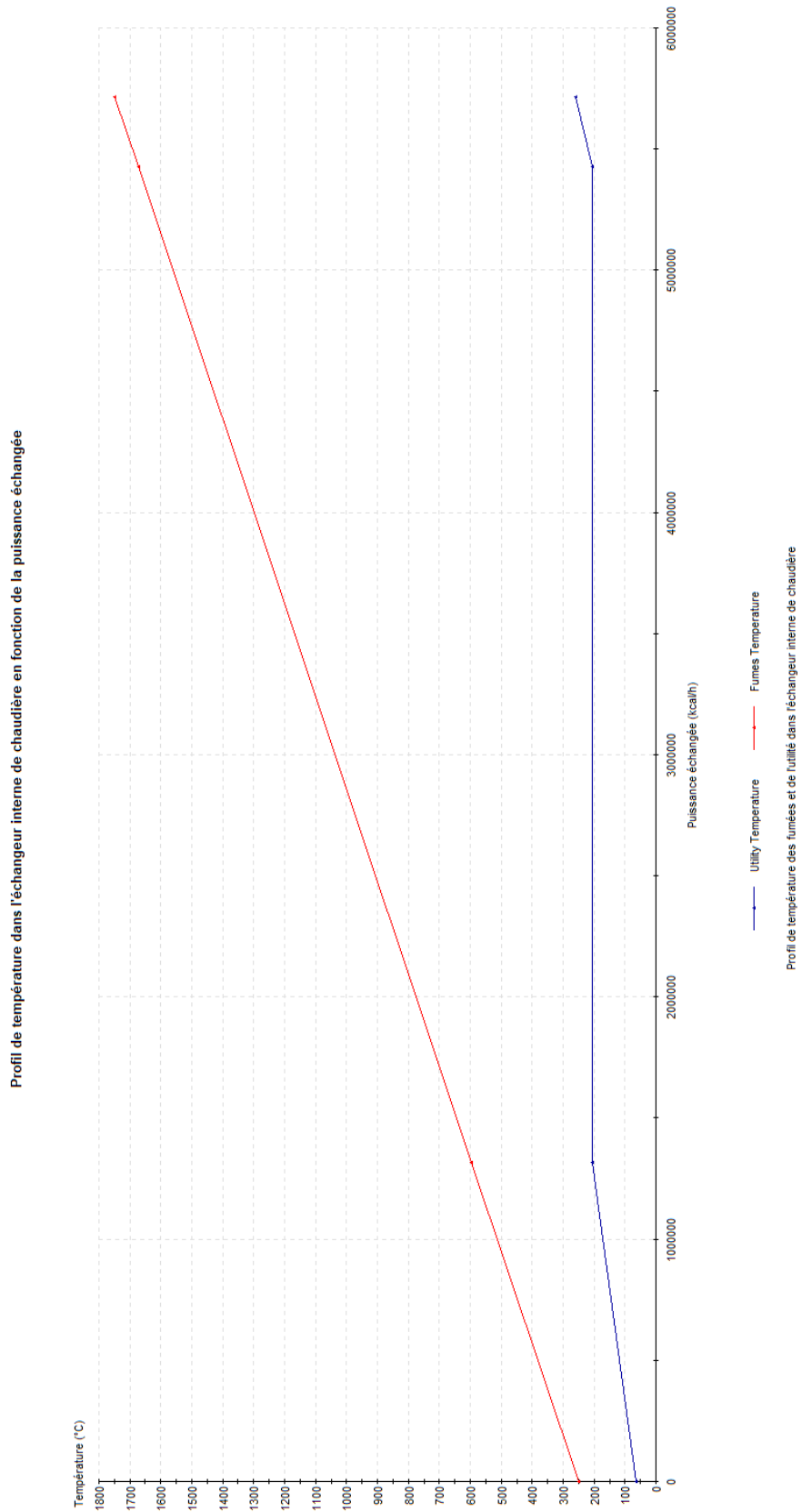
- Un débit de jus de 2,8 t/h soit 24 500 t/an.
- Un débit d'affinât de 4,8 t/h (0,5 t/h d'eau et 4,3 t/h de matière non dégradée) soit 42 000 t/an.

Pour ce cas d'étude, le flux de digestat sortant du méthaniseur n'a pas été simulé. Les informations ci-dessus sont disponibles au niveau du rapport du module « Methanization reactor ».

2.4. Propriétés de la chaudière

Débit de vapeur produite (t/h)	9
Température de sortie de la vapeur (°C)	258 (absorption à l'eau) / 269°C (absorption aux amines)
Température de sortie (°C)	250
Pression de sortie des vapeurs (bar)	18
Puissance utile totale (MW)	6,64

Profil de température dans l'échangeur interne de chaudière en fonction de la puissance échangée :



3. BIBLIOGRAPHIE

- [APE07] Méthanisation et production de biogaz, Etat de l'art. Apesa, Version 1, 2007.
- [ROB21] Les procédés biologiques. Robert AFIF et Daniel Houlle.
LES PROCEDES BIOLOGIQUES - 2 - DECHETS DES MENAGES (typepad.fr)
[page consultée le 22/06/21].
- [VAL21] Le procédé de méthanisation Valorga. Société Valorga International.
<http://www.valorgainternational.fr> [page consultée le 22/06/21].
- [WIL21] Wilding, W. V.; Knotts, T. A., Giles, N. F., Rowley, R. L. DIPPR Data Compilation of Pure Chemical Properties; Design Institute for Physical Properties, AIChE: New York, NY (2021).