

EXEMPLE D'APPLICATION PROSIMPLUS

POMPE A CHALEUR HAUTE TEMPERATURE

INTERET DE L'EXEMPLE

Cet exemple présente l'utilisation d'une pompe à chaleur (PAC) haute température (HT) pour des besoins industriels.

DIFFUSION	☒ Libre Internet	☐ Réservée clients	☐ Restreinte	☐ Confidentielle
-----------	--	---	-------------------------------------	---

FICHIER PROSIMPLUS CORRESPONDANT	PSPS_EX_FR-Pompe-A-Chaleur-Haute-Temperature.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. Fives ProSim ne pourra en aucun cas être tenu pour responsable de l'application qui pourra être faite des calculs basés sur cet exemple.

Energy

Fives ProSim

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

Tél. : +33 (0)5 62 88 24 30

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

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

TABLE DES MATIÈRES

1. MODELISATION DU PROCEDE 3

1.1. Présentation du procédé 3

1.2. Schéma de simulation 4

1.3. Constituants..... 5

1.4. Modèle thermodynamique 5

1.5. Conditions opératoires..... 6

1.6. Initialisations 10

2. RESULTATS 11

2.1. Bilans matière et énergie..... 11

2.2. Performance du procédé 14

3. BIBLIOGRAPHIE 15

1. MODELISATION DU PROCEDE

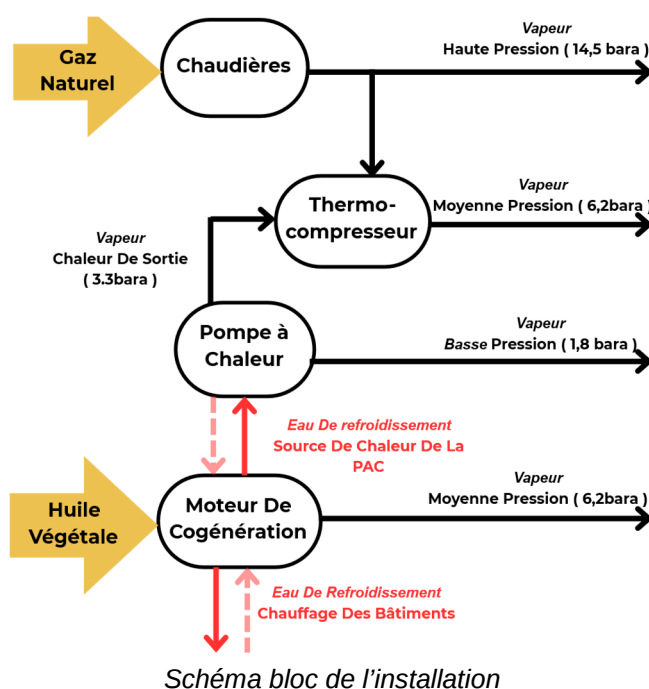
1.1. Présentation du procédé

Cet exemple présente la simulation d'une pompe à chaleur (PAC) haute température (HT) fonctionnant au R1233zd. Les pompes à chaleurs haute température permettent d'atteindre des températures au-delà de 150°C. L'utilisation de ces PAC haute température dans l'industrie est de plus en plus développée, notamment comme solution de réutilisation et de revalorisation de chaleurs fatales [ABR23], [BRU24], [ZUH24].

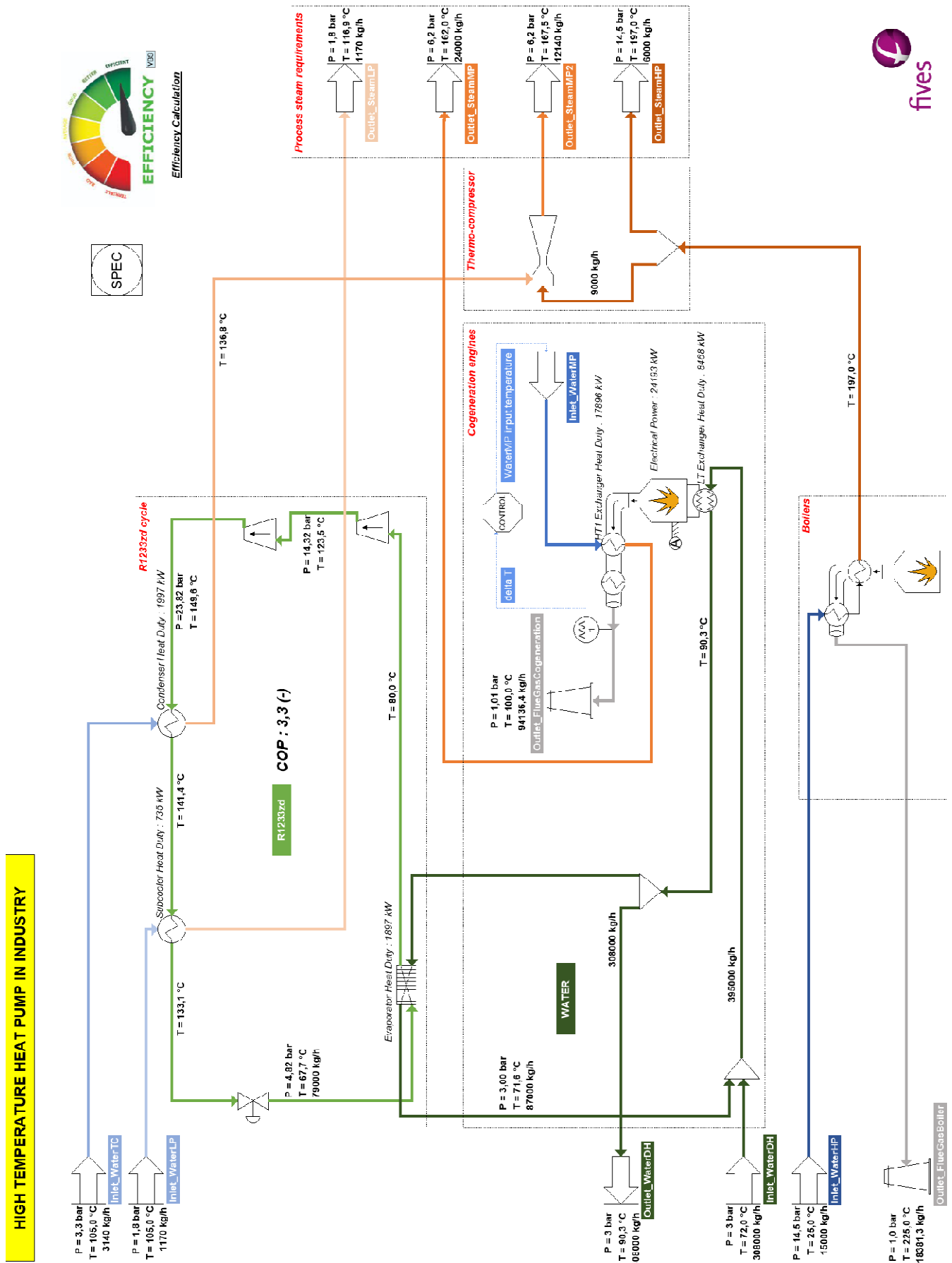
Cet exemple est fondé sur les données du projet européen « PUSH2HEAT » réalisé dans le cadre de l'étude d'une papeterie « *Cartiera di Guarcino* » localisée en Italie. L'usine dispose de différents besoins en vapeur à différents niveaux de pression. Ces vapeurs sont produites par les unités suivantes :

- 3 moteurs de cogénération, alimentés en huile végétale (huile de palme) et graisse animale permettent la production de vapeur saturée à 6.2 bara ainsi que d'électricité. La quasi-totalité de l'électricité produite est auto-consommée (le surplus étant envoyé sur le réseau local d'électricité). Une grande partie de la vapeur nécessaire sur le site est également produite par ces moteurs ;
- 2 chaudières fonctionnant au gaz naturel (GN) permettent de produire une vapeur à haute pression (14.5 bara) ;
- Une pompe à chaleur haute température (PAC HT) permet de produire 1170 kg/h de vapeur basse pression (1.8 bara) et 3140 kg/h de vapeur à 3.3 bara. Cette dernière est envoyée vers un thermo-compresseur où elle est mélangée avec une partie de la vapeur haute pression afin de produire de la vapeur moyenne pression (6.2 bara).

Les moteurs de cogénération sont refroidis par une boucle d'eau de refroidissement. Celle-ci entre dans le moteur à environ 70°C et en ressort à 90°C. Cette eau chaude a ensuite deux destinations : une première partie du débit est utilisée pour le chauffage des bâtiments, tandis que la seconde est utilisée comme source de chaleur pour la PAC.



1.2. Schéma de simulation



1.3. Constituants

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

Constituant	Formule chimique	Numéro CAS
Water	H ₂ O	7732-18-5
R1233zd	C ₃ H ₂ ClF ₃	102687-65-0
Carbon monoxide	CO	630-08-0
Oxygen	O ₂	7782-44-7
Nitrogen	N ₂	7727-37-9
Carbon dioxide	CO ₂	124-38-9
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
Hydrogen	H ₂	1333-74-0
Ammonia	NH ₃	7664-41-7
Methane	CH ₄	74-82-8

1.4. Modèle thermodynamique

Trois « calculator » thermodynamiques sont définis pour simuler l'exemple :

- « Water » : ce calculator ne contient que le constituant « Water ». Il est défini avec un profil thermodynamique « Eau pure ». Il est utilisé pour modéliser l'eau de refroidissement et la vapeur.
- « R1233zd » : ce calculator ne contient que le fluide frigorigène R1233zd. Celui-ci est issu directement de la base de données des fluides frigorigères de ProSimPlus.
- « Fumes-Biogaz » : ce calculator contient les constituants suivants : CO, O₂, N₂, CO₂, H₂S, SO₂, SO₃, NO, H₂O, H₂, NH₃, CH₄. Il permet de représenter les compositions des fumées en sortie des combustions. Il est directement issu de la base de données du réacteur de « Combustion ».

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

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

1.5. Conditions opératoires

- ✓ Alimentations du procédé

Nom	Inlet_WaterLP	Inlet_WaterTC	Inlet_WaterMP	Inlet_WaterHP	Inlet_WaterDH
Débits massiques partiels (kg/h)					
Eau	1170	3140	22500	15000	308000
Température (°C)	105	105	7.5	25	72
Pression (bara)	1.8	3.3	6.2	14.5	3

- ✓ Pompe à chaleur
 - o Échangeurs

Nom	Subcooler	Condenser	Evaporator
Type de courant	Contre-courant ou multi passes	Contre-courant ou multi passes	Contre-courant ou multi passes
Type de spécification	Courant froid	Courant froid	Courant froid
Contrainte	Surchauffé au-dessus de sa température de rosée	Surchauffé au-dessus de sa température de rosée	Température de sortie
Température (°C)	0	0	80

- o Compresseurs

Nom	C1	C2
Spécification fournie	Pression fournie par l'utilisateur	Pression fournie par l'utilisateur
Pression de refoulement (bara)	14.32	23.82
Efficacité isentropique	0.8	0.8
Efficacité mécanique	1	1
Efficacité électrique	1	1

- o Vanne de détente

Type de la contrainte	Spécification de la pression
Spécification pour la pression	Pression fournie par l'utilisateur
Pression (bara)	4.82
Pertes de charge (bara)	0

- ✓ Partie cogénération
 - o Moteur de cogénération

Combustion	
Comburant	
Type	Air
Contrainte	% d'O2 massique dans les fumées en sortie de combustion
O2 dans les fumées (%)	2
Pression d'entrée (atm)	1
Température d'entrée du comburant (°C)	80
Combustible (liquide/solide)	
% massique C	45.42
% massique H	6.35
% massique O	47.63
% massique N	0.47
% massique S	0.13
Pression entrée (atm)	1
PCI	Estimé

Les compositions du combustible (huile de palme) sont issues de la littérature [ABI23].

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 » du module permet de charger le calculator des fumées et de définir ce calculator comme celui de la chaudière. Un nouveau calculator « Fumes-Biogaz » est alors ajouté à la liste des calculators.

Echangeur BT	
Température du fluide en entrée du moteur (sortie BT) (°C)	72
Température du fluide en sortie du moteur (entrée BT) (°C)	92
Fluide de refroidissement	Eau

Echangeur HT1	
Type d'échangeur	Contre-courant pur
Mode de calcul	Modèle en pincement
Pincement (K)	70

Contrainte	
Type de contrainte	Puissance HT imposée
Contrainte sur la température de sortie de l'utilité HT1	Température de sortie de l'utilité
Température de sortie (°C)	162

Calcul des rendements	
Rendement BE (basse enthalpie) (%)	10
Rendement BT (%)	14
Rendement électrique (%)	40

o Diviseur de courant

Spécification fournie	Débit massique
Courant calculé automatiquement	C20 (Outlet_WaterDH)
Débit massique C19 (HeatSource evaporator) (kg/h)	87000

✓ Chaudières

Combustion	
Comburant	
Type	Air
Contrainte	% d'O2 massique dans les fumées en sortie de combustion
O2 dans les fumées (%)	2
Pression d'entrée (atm)	1
Combustible (gaz) / description avancée	
Type	Molaire/Volumique
Teneur en méthane (%)	84.6
Teneur en éthylène (%)	0
Teneur en éthane (%)	6.4
Teneur en propylène (%)	0
Teneur en propane (%)	5.3
Teneur en butane (%)	1.4
Teneur en CO2 (%)	1.3
Teneur en CO (%)	0
Teneur en H2 (%)	0
Teneur en N2 (%)	1
Teneur en H2S (%)	0
Pression d'entrée (atm)	1

Les compositions du combustible (gaz naturel) sont issues de la littérature [FAR16].

Echangeur interne	
Configuration	
Type d'échangeur	Contre-courant pur
Mode de calcul	Modèle en pincement
Pincement (K)	200

Contrainte	
Contrainte	Puissance utile imposée
Contrainte pour l'utilité	Température de sortie de l'utilité
Température (°C)	197

- ✓ Partie Thermo-compresseur
 - o Thermo-compresseur

Facteur Pb/Pe	0.9
Rendement isentropique de la tuyère primaire	0.9
Rendement isentropique de la zone de détente du fluide secondaire	1
Mode de calcul	Zone de mélange à section constante
Rendement isentropique du diffuseur	0.9

- o Diviseur de courant

Spécification fournie	Débit massique
Courant calculé automatiquement	C5 (Outlet_SteamHP)
Débit massique C9 (entrée thermo-compresseur) (kg/h)	9000

1.6. Initialisations

La séquence de calcul est automatiquement déterminée par ProSimPlus. Deux courant coupés sont détectés : le courant « C27 » (entrée de l'évaporateur) du cycle de la PAC et le courant « C19 » (entrée de l'évaporateur) du cycle de refroidissement des moteurs. Les initialisations suivantes sont utilisées :

Courant	C27	C19
Débit massiques partiels (kg/h)		
R1233zd	79000	0
Eau	0	87000
Température (°C)	67.7	92
Pression (bara)	-	3
Taux de vaporisation	0.585	-

2. RESULTATS

2.1. Bilans matière et énergie

Le module Windows Script « Efficiency Calculation » est utilisé pour calculer des données caractéristiques de performances du procédé.

Windows Script (\$XTMO)		
Name: Efficiency Calculation		
Desc:		
Identification	Scripts	Report Streams Notes
PAR size: 20		
Index	Par	Info
1	0	COP (-)
2	0	Evaporator Heat Duty
3	0	Condenser Heat Duty
4	0	Subcooler Heat Duty
5	0	Compressors Power
6	0	Heat Sink Subcooler Temperature
7	0	Heat Sink Subcooler Mass Flowrate
8	0	Heat Sink Condenser Temperature
9	0	Heat Sink Condenser Mass Flowrate
10	0	HT1 Heat Duty
11	0	LT Heat Duty
12	0	Electricity Produced
13	0	Boiler Heat Duty

Le script suivant est utilisé afin de présenter les différentes puissances des appareils, de calculer le coefficient de performance (COP) et de rappeler les données de la PAC. Les résultats sont imprimés dans l'onglet « Rapport » du module « Efficiency Calculation » :

```
'-----'
' CALL OF PREDEFINED SCRIPT
'-----'

ExecuteGlobal CreateObject("Scripting.FileSystemObject").OpenTextFile(Project.ApplicationPath &
"Scripts\IncludeScript.vbs", 1).ReadAll()
IncludeScript "StreamProperties.vbs"
IncludeScript "UnitConversion.vbs"
IncludeScript "FormatDouble.vbs"

Function OnCalculation()

'-----'
' CALCULATION OF COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF HEAT PUMP
'-----'

Evaporator_HeatDuty = Project.Modules("Evaporator").HeatDuty
Condenser_HeatDuty = Project.Modules("Condenser").HeatDuty
Subcooler_HeatDuty = Project.Modules("Subcooler").HeatDuty
Compressors_Power = Project.Modules("C1").TotalUsefulPower + Project.Modules("C2").TotalUsefulPower

Heatsink_Subcooler_Temperature = Project.Modules("Subcooler").OutputStream(2).Temperature
Heatsink_Subcooler_MassFlowrate = Project.Modules("Subcooler").OutputStream(2).MassFlowrate

Heatsink_Condenser_Temperature = Project.Modules("Condenser").OutputStream(2).Temperature
Heatsink_Condenser_MassFlowrate = Project.Modules("Condenser").OutputStream(2).MassFlowrate

COP = (Condenser_HeatDuty + Subcooler_HeatDuty) / Compressors_Power

Module.parameter(1) = COP
Module.parameter(2) = ProSimToReport("Power", Evaporator_HeatDuty)
Module.parameter(3) = ProSimToReport("Power", Condenser_HeatDuty)
Module.parameter(4) = ProSimToReport("Power", Subcooler_HeatDuty)
Module.parameter(5) = ProSimToReport("Power", Compressors_Power)

Module.parameter(6) = ProSimToReport("Temperature", Heatsink_Subcooler_Temperature)
Module.parameter(7) = ProSimToReport("Mass flow rate", Heatsink_Subcooler_MassFlowrate)

Module.parameter(8) = ProSimToReport("Temperature", Heatsink_Condenser_Temperature)
Module.parameter(9) = ProSimToReport("Mass flow rate", Heatsink_Condenser_MassFlowrate)

'-----'
' CALCULATION COGENERATION ENGINES PERFORMANCES
'-----'

HT1_ExchangerHeatDuty = abs(Project.Modules("CogenerationEngines").HT1ExchangerHeatDuty)
LT_ExchangerHeatDuty = abs(Project.Modules("CogenerationEngines").LTExchangerHeatDuty)
ElectricalPower = abs(Project.Modules("CogenerationEngines").ElectricalPowerProduced)

Module.parameter(10) = ProSimToReport("Power", HT1_ExchangerHeatDuty)
Module.parameter(11) = ProSimToReport("Power", LT_ExchangerHeatDuty)
Module.parameter(12) = ProSimToReport("Power", ElectricalPower)

'-----'
' CALCULATION COGENERATION ENGINES PERFORMANCES
'-----'

Boiler_ExchangerHeatDuty = abs(Project.Modules("Boilers").InternalExchangerHeatDuty)

Module.parameter(13) = ProSimToReport("Power", Boiler_ExchangerHeatDuty)
OnCalculation = true

End Function
```

```

Sub OnPrintResults()
'-----
' PRINT RESULTS
'-----
Module.PrintReport "Heat Pump Performance" & VbLf

Module.PrintReport "Power consumption and heat duty" & VbLf

Module.PrintReport "    Evaporator heat duty      = " & FormatNumber(Module.parameter(2), 0) &
ReportUnit("Power")
Module.PrintReport "    Condenser heat duty       = " & FormatNumber(Module.parameter(3), 0) &
ReportUnit("Power")
Module.PrintReport "    Subcooler heat duty      = " & FormatNumber(Module.parameter(4), 0) &
ReportUnit("Power")
Module.PrintReport "    Compressors power       = " & FormatNumber(Module.parameter(5), 0) &
ReportUnit("Power")

Module.PrintReport "    COP                               = " & FormatNumber(Module.parameter(1),1) & " (-)"
& VbLf

Module.PrintReport "Heat sink paramaters " & VbLf

Module.PrintReport "    Steam temperature"
Module.PrintReport "    Sublcooler Outlet      = " & FormatNumber(Module.parameter(6), 0) &
ReportUnit("Temperature")
Module.PrintReport "    Condenser Outlet       = " & FormatNumber(Module.parameter(8), 0) &
ReportUnit("Temperature") & VbLf

Module.PrintReport "    Steam mass flowrate"
Module.PrintReport "    Sublcooler Outlet      = " & FormatNumber(Module.parameter(7), 0) &
ReportUnit("Mass flow rate")
Module.PrintReport "    Condenser Outlet       = " & FormatNumber(Module.parameter(9), 0) &
ReportUnit("Mass flow rate") & VbLf

Module.PrintReport "Cogeneration Engines Performance" & VbLf

Module.PrintReport "    HT1 Exchanger heat duty = " & FormatNumber(Module.parameter(10), 0) &
ReportUnit("Power")
Module.PrintReport "    LT Exchanger heat duty = " & FormatNumber(Module.parameter(11), 0) &
ReportUnit("Power")
Module.PrintReport "    Electrical power generated = " & FormatNumber(Module.parameter(12), 0) &
ReportUnit("Power") & VbLf

Module.PrintReport "Boilers Performance" & VbLf

Module.PrintReport "    Boiler power          = " & FormatNumber(Module.parameter(13), 0) &
ReportUnit("Power")
End Sub

```

2.2. Performance du procédé

Résultats de simulation	Notation	Pompe à Chaleur
Puissance Evaporateur (kW)	A	1894
Puissance « Subcooler » (kW)	B	735
Puissance Condenseur (kW)	C	1997
Puissance Compresseurs (kW)	D	838
COP (-)	$E (= \frac{B+C}{D})$	3.3
Température Condenseur atteinte (°C)	F	136.8
Température « Subcooler » atteinte (°C)	G	117
Débit Massique Condenseur (kg/h)	H	3140
Débit Massique « Subcooler » (kg/h)	I	1170

Les données de simulation obtenues sont cohérentes avec les valeurs du projet européen « PUSH2HEAT » : Les puissances de la PAC et le COP obtenu par simulation sont du même ordre de grandeur que dans les rapports publiés.

3. Bibliographie

- [ABI23] Abioye, K. J., Harun, N. Y., Umar, H. A., & Kolawole, A. H. (2023). Study of physicochemical properties of palm oil decanter cake for potential Syngas generation. *Chemical Engineering Transactions*, 99, 709–714. <https://www.researchgate.net/publication/374867940>
- [ABR23] Abrami, G., Toppi, T., POLIMI, BONO, & ENERTIME. (2023). *Demonstration site at CDG - system design* (By POLIMI).
- [BRU24] Bruyère, B., CETIAT, & ALLICE. (2024). *Etat de l'art des PAC THT – Volet 2* (p. 66). <https://www.alliance-allice.com/fr/travaux-collectifs> consultée le 25/06/2025.
- [FAR16] Faramawy, S., Zaki, T., & A.A.-E. Sakr. (2016). Natural gas origin, composition, and processing: A review. In *Journal of Natural Gas Science and Engineering* (Vol. 34, pp. 34–54). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>
- [ZUH24] Zühlsdorf, B., Nekså, P., & Elmegaard, B. (2024). 4th High-temperature Heat Pump Symposium: Book of Presentations. DTU Mechanical Engineering.