



Génération automatique de structures productives et établissement de bilans exergétiques dans Thermoptim

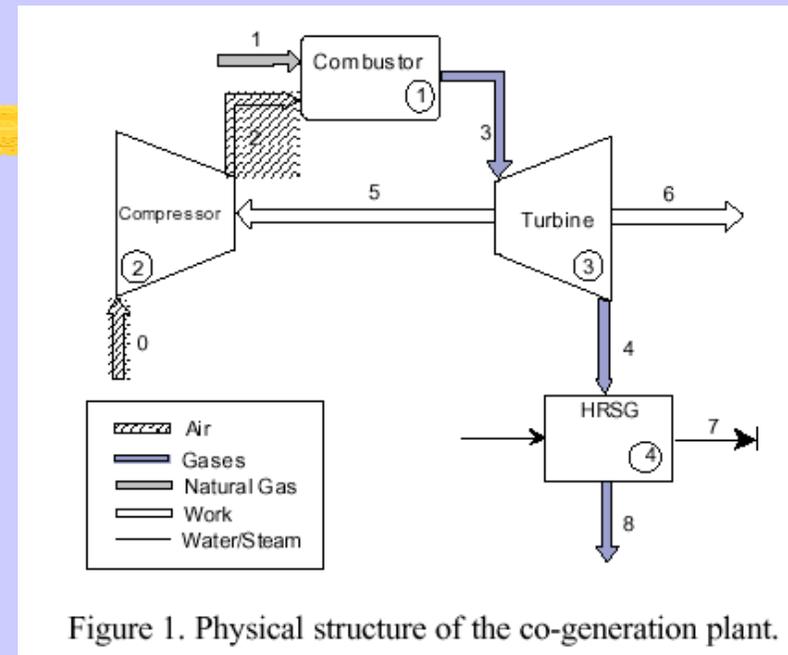
Renaud GICQUEL

Ecole des Mines de Paris

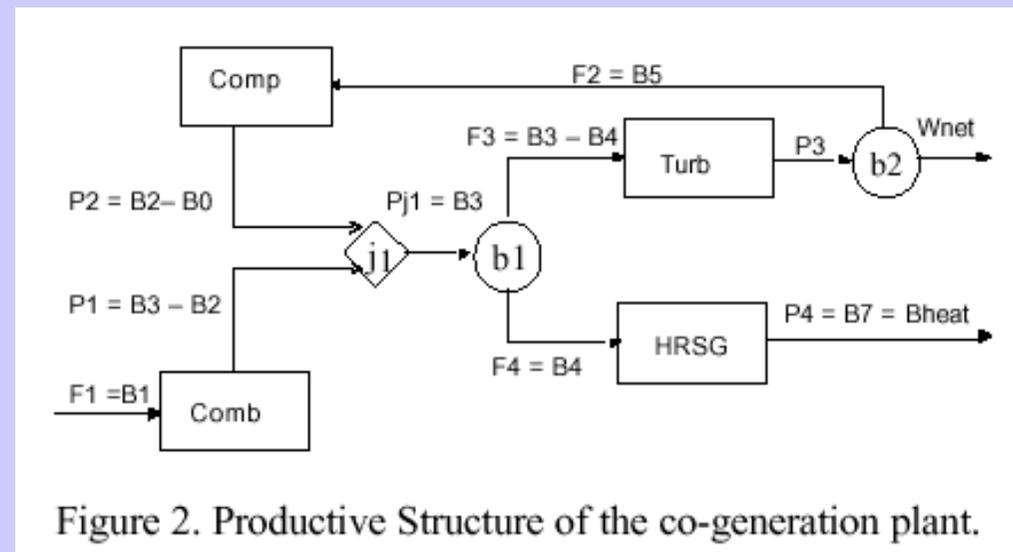
[http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/
analyses-exergetiques/generation-automatique](http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/analyses-exergetiques/generation-automatique)

Structure productive

- graphe permettant de représenter les produits ou consommations d'exergie des unités d'un système énergétique

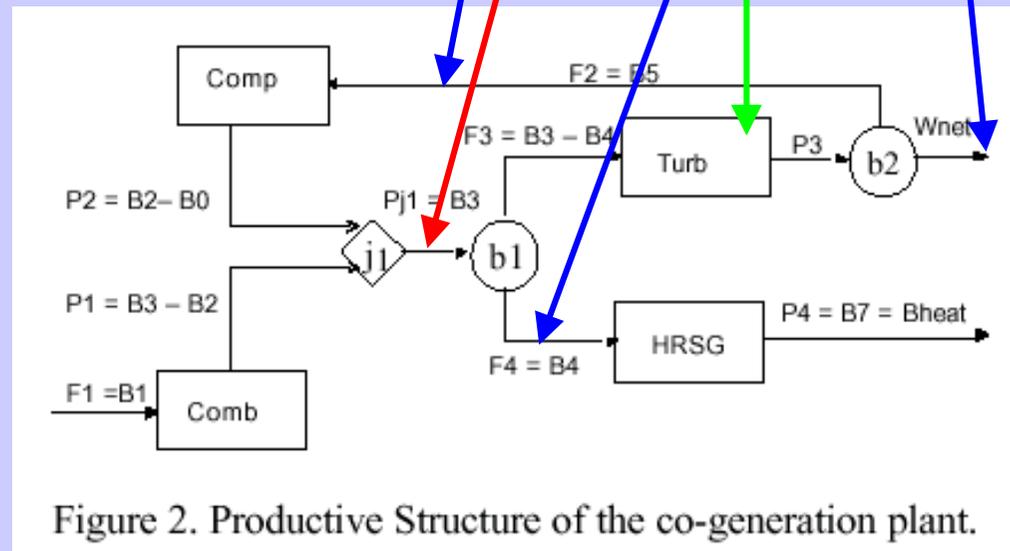
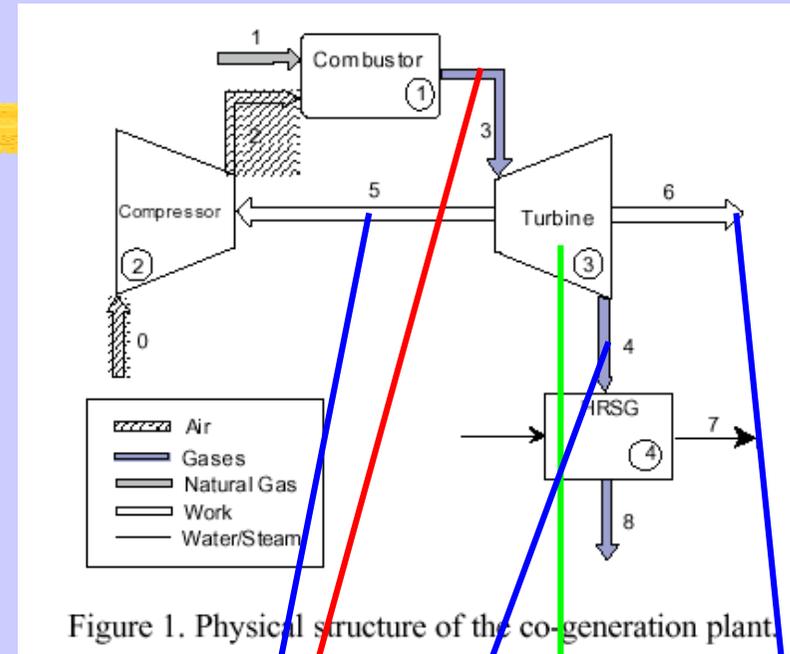


- B_i : flux d'exergie
- F_i : ressources exer.
- P_i : produits exergetiques
- j_i : jonctions
- b_i : embranchements



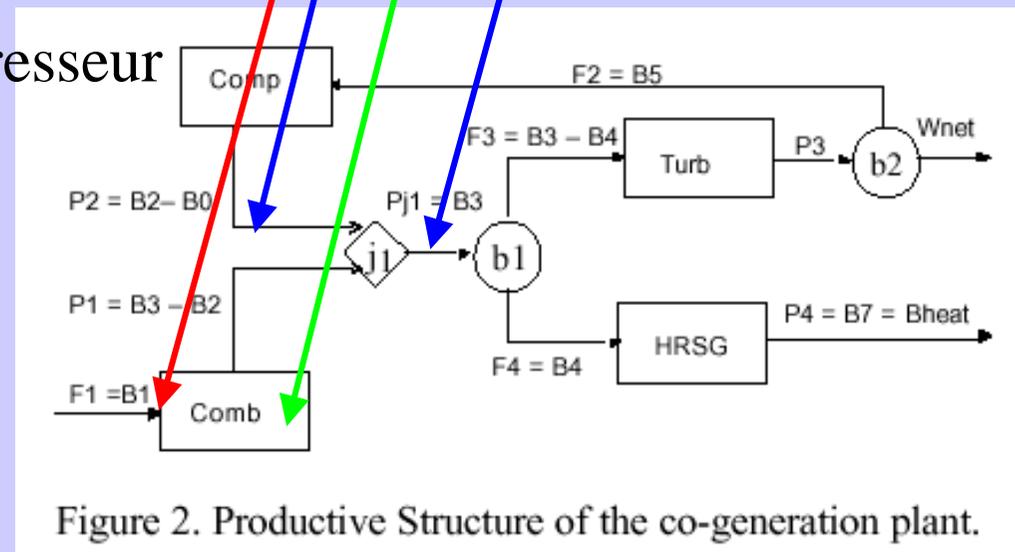
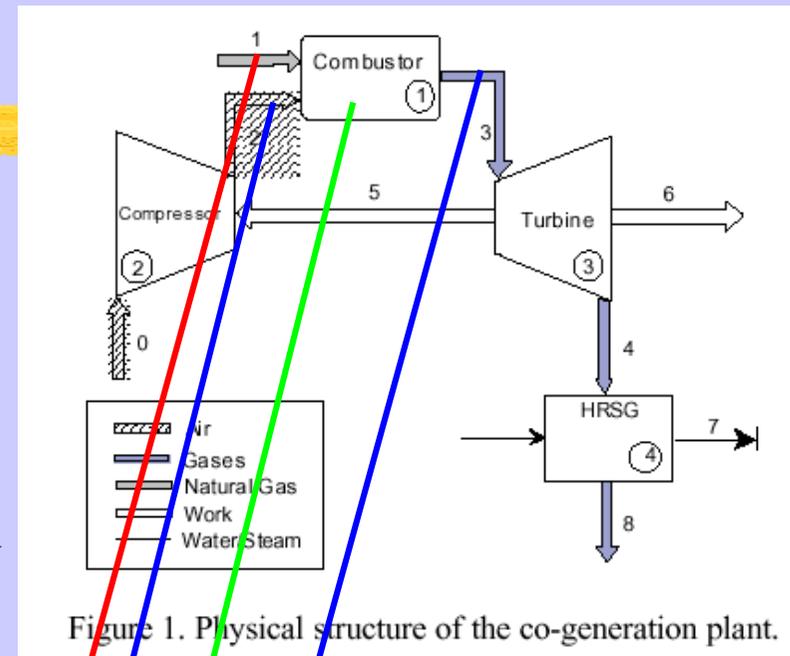
Représentation de la turbine

- B_3 exergie disponible en 3 \Rightarrow
 - F_3 ressource turbine
 - F_4 ressource HRSG (= B_4 exergie disponible en 4)
- P_3 produit turbine \Rightarrow
 - F_3 ressource compresseur
 - W_{net} travail net



Représentation de la chambre de combustion

- F_1 ressource ch. combustion = exergie combustible
- B_3 exergie disponible en 3 \Rightarrow
 - P_1 produit chambre combustion
 - P_2 produit compresseur
 - B_0 exergie entrée compresseur (= 0 car à T_0 et P_0)



Catégories de flux représentés

➤ ressources F_i (3 types)

➤ exergie-chaleur ou exergie chimique

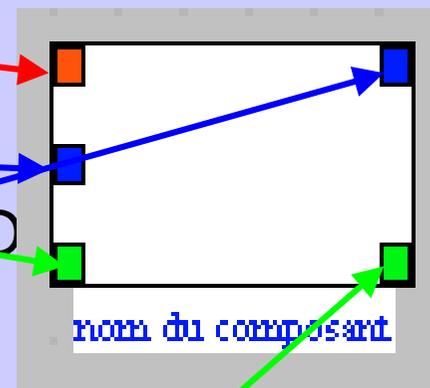
➤ travail

➤ transfert d'exergie des fluides traversant l'UPD

➤ produits P_i (2 types)

➤ travail

➤ variation d'exergie des fluides traversant l'UPD

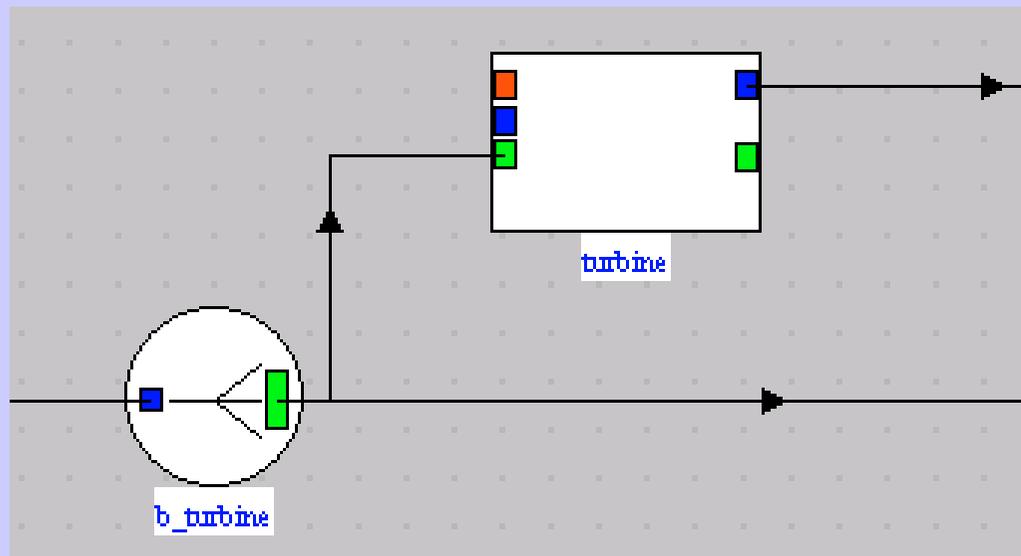


Unités productives et dissipatives

- 2 principaux types, dénommés selon leur contribution à la variation d'exergie du fluide :
 - **réducteurs** (turbines, laminages, échangeurs externes si $Q < 0$ et $T_k > T_0$, échangeurs externes si $Q > 0$ et $T_k < T_0$)
 - **extenseurs** (chambres de combustion, compresseurs, échangeurs externes si $Q > 0$ et $T_k > T_0$...)
- à chaque UPD est associée un écran de paramétrage du bilan exergétique

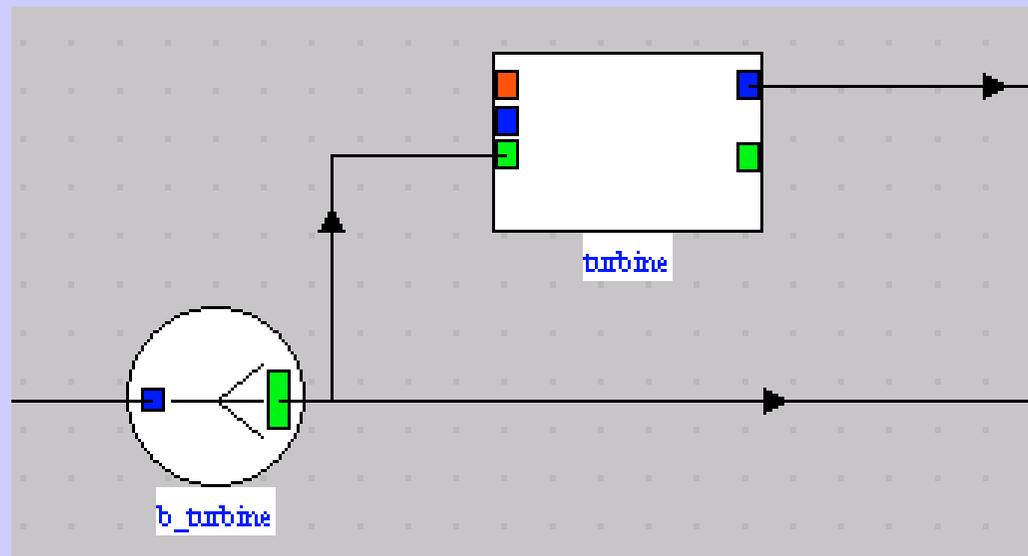
Composant « réducteur d'exergie »

- diminution exergie du fluide qui le traverse
- unité productive embranchement d'entrée et 2 liens :
 - un aboutissant au port vert de l'unité productive (flux exergétique d'entrée)
 - un correspondant au flux exergétique de sortie



Réducteur d'exergie : turbine

- exergie totale disponible en amont de la turbine :
 - partie convertie sous forme mécanique dans turbine
 - partie disponible en sortie de turbine
- pseudo-diviseur ou embranchement "b_turbine" modélise cette répartition



Réducteur d'exergie : turbine

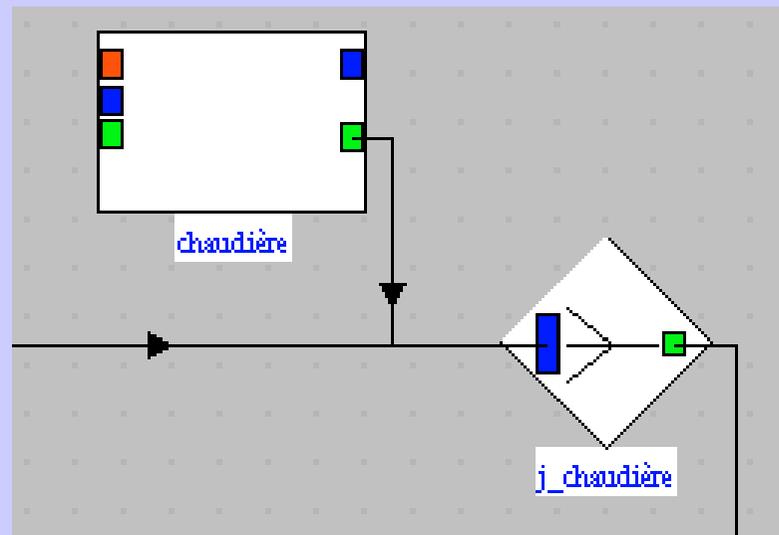
- écran donnant les valeurs des éléments du bilan exergétique :
ressource = variation d'exergie du fluide qui le traverse (ΔX_{h^+}), produit = puissance mécanique (τ^+), rendement exergétique et valeur des irréversibilités

The screenshot shows a software window titled "Component exergy balance" with a "turbine" label. The window contains several input fields and buttons. The "Resource" section includes τ^+ (0), ΔX_{h^+} (1 556,221), and x_{q^+} (0). The "Product" section includes τ (1 326,01) and ΔX_h (0). The "Exergy efficiency" is 0,852071 and "Irreversibilities" is 230,211. There are "display", "Calculate", and "Quit" buttons.

Category	Parameter	Value
Resource	τ^+	0
Resource	ΔX_{h^+}	1 556,221
Resource	x_{q^+}	0
Product	τ	1 326,01
Product	ΔX_h	0
Exergy efficiency		0,852071
Irreversibilities		230,211

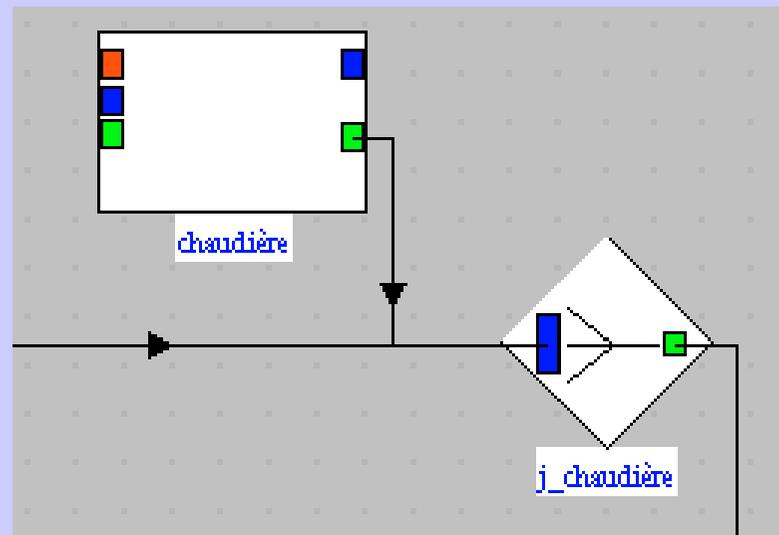
Composant « extenseur d'exergie »

- augmentation exergie du fluide qui le traverse
- unité productive avec jonction en sortie et 2 liens :
 - un issu du port vert de l'unité productive (flux exergétique de sortie)
 - un correspondant au flux exergétique d'entrée



Extenseur d'exergie : chaudière

- exergie totale disponible en sortie de la chaudière :
 - flux exergétique en entrée du composant
 - variation d'exergie communiquée au fluide dans la chaudière (exergie-chaaleur)
- pseudo-mélangeur ou jonction "j_chaudière" modélise cette sommation



Extenseur d'exergie : chaudière

- écran donnant les valeurs des éléments du bilan exergétique :
ressource = exergie-chaleur, produit = variation d'exergie du fluide qui le traverse (ΔX_h), température de la source externe (1300 °C), rendement exergétique et valeur des irréversibilités

Component exergy balance

display chaudière

Resource

τ^+ 0

ΔX_{h^+} 0

x_{q^+} 2 743,324

Valuable exergy

Internal exchange

External source

Product

τ 0

Source T (°C) 1 300

ΔX_h 1 572,985

Exergy efficiency 0,573387

Irreversibilities 1 170,339

Calculate

Automatisation de la création de la structure productive

- la structure productive peut être partiellement établie si l'on connaît le schéma physique (p. ex. schéma Thermoptim) et le paramétrage thermodynamique (p. ex. projet Thermoptim)
- on finit de renseigner la structure productive en paramétrant les écrans des bilans exergétiques
- bien distinguer les vrais mélangeurs des pseudos-mélangeurs des composants extenseurs d'exergie

Création de la structure productive

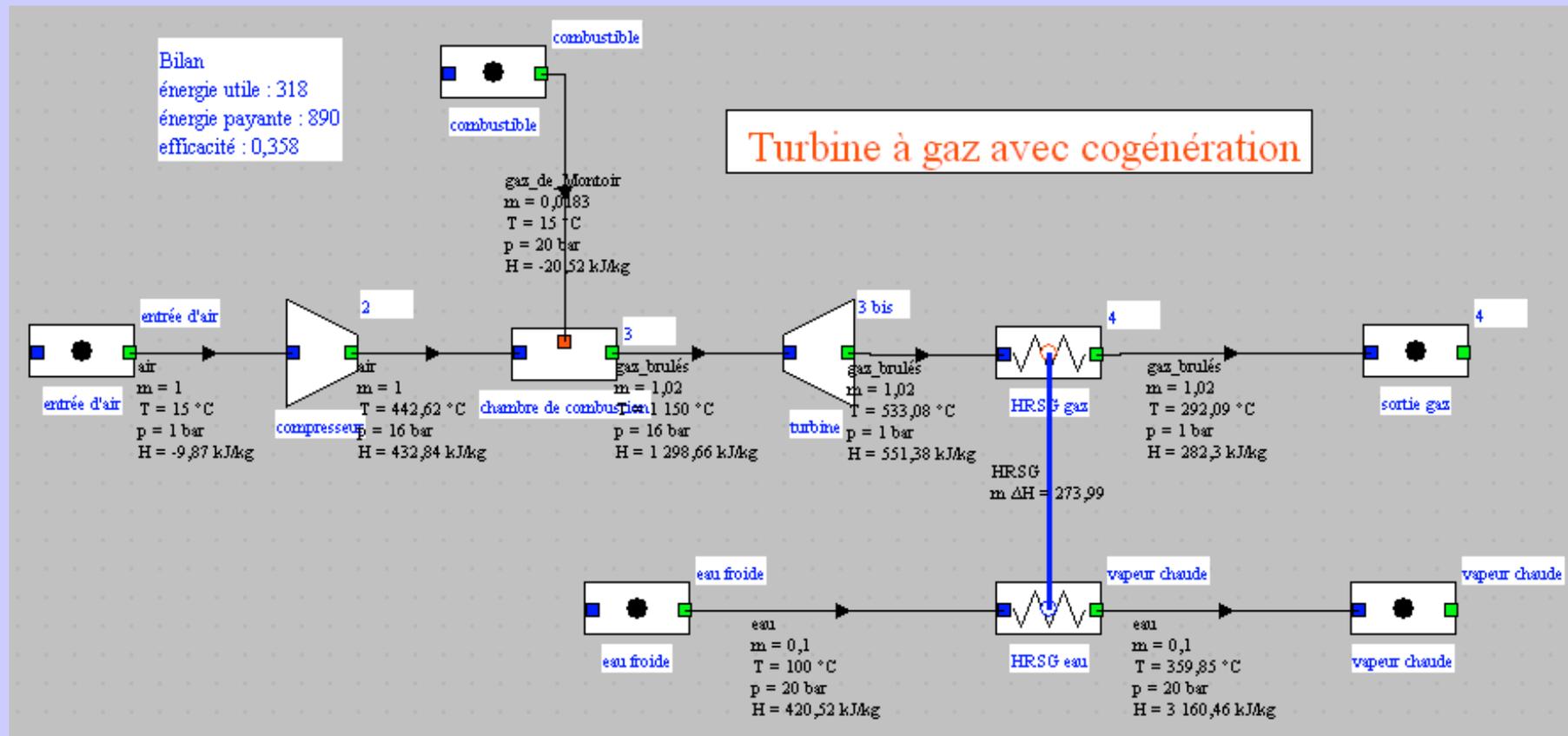
- première étape : création d'une structure productive avec des pseudos-nœuds en excédent
- deuxième étape : élimination des pseudos-nœuds excédentaires
- troisième étape : connexions puissances mécaniques et paramétrage des échanges de chaleur (températures des sources externes...)
- le bilan exergétique s'en déduit automatiquement

Particularités 3ème étape

- établir tous les couplages mécaniques (généralement un mélangeur en sortie des organes de détente, suivi d'un diviseur pour les compressions et la puissance nette)
- bien distinguer les rôles des différents composants qui échangent de la chaleur :
 - entrées ou sorties de fluide
 - échanges de chaleur internes
 - sources d'énergie externes (exergies-chaleur)

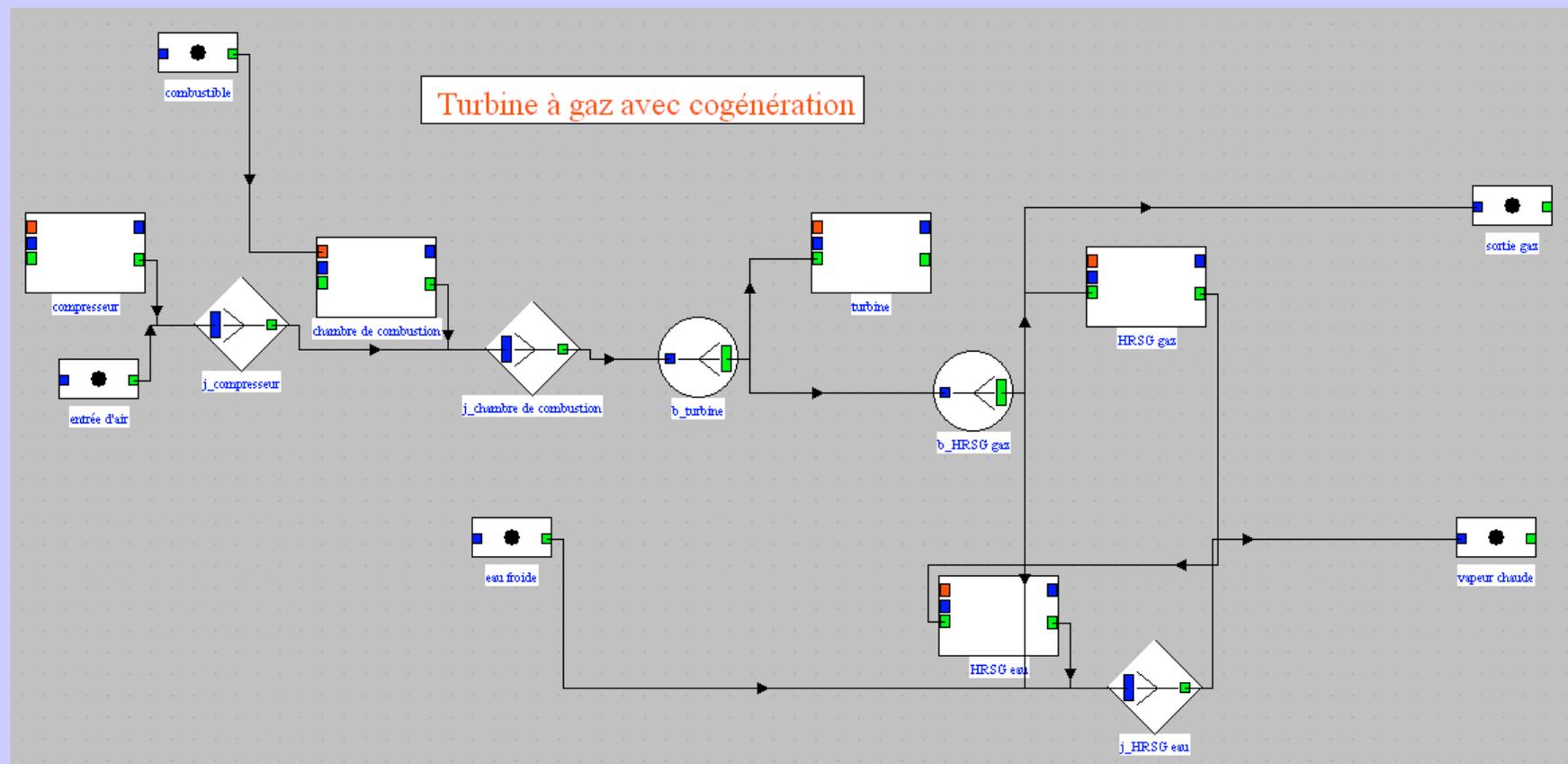
Exemple : turbine à gaz utilisée en cogénération

➤ Synoptique Thermoptim



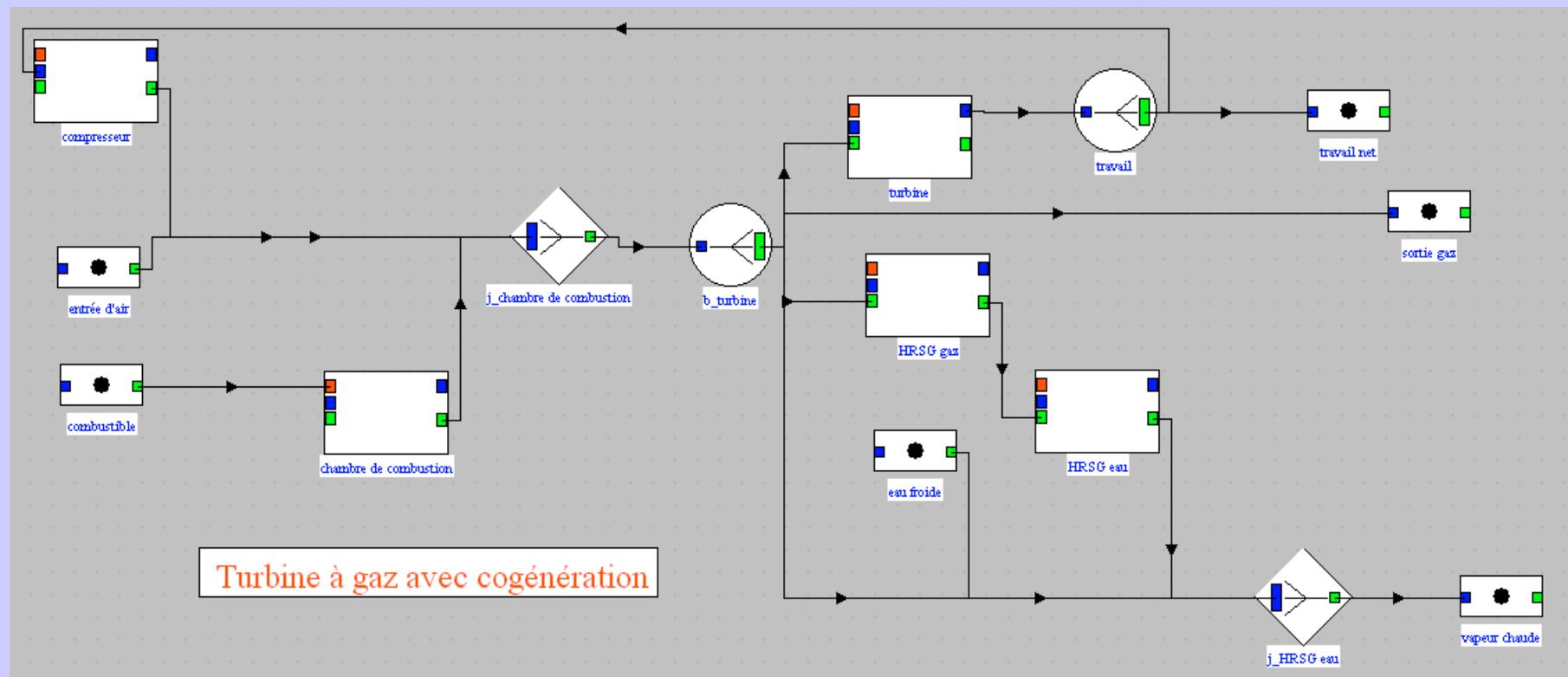
Exemple : turbine à gaz utilisée en cogénération

- Structure productive générée avant ajout des couplages mécaniques (1ère étape)



Exemple : turbine à gaz utilisée en cogénération

- Structure productive générée après ajout des couplages mécaniques et paramétrage du bilan exergétique (3ème étape)



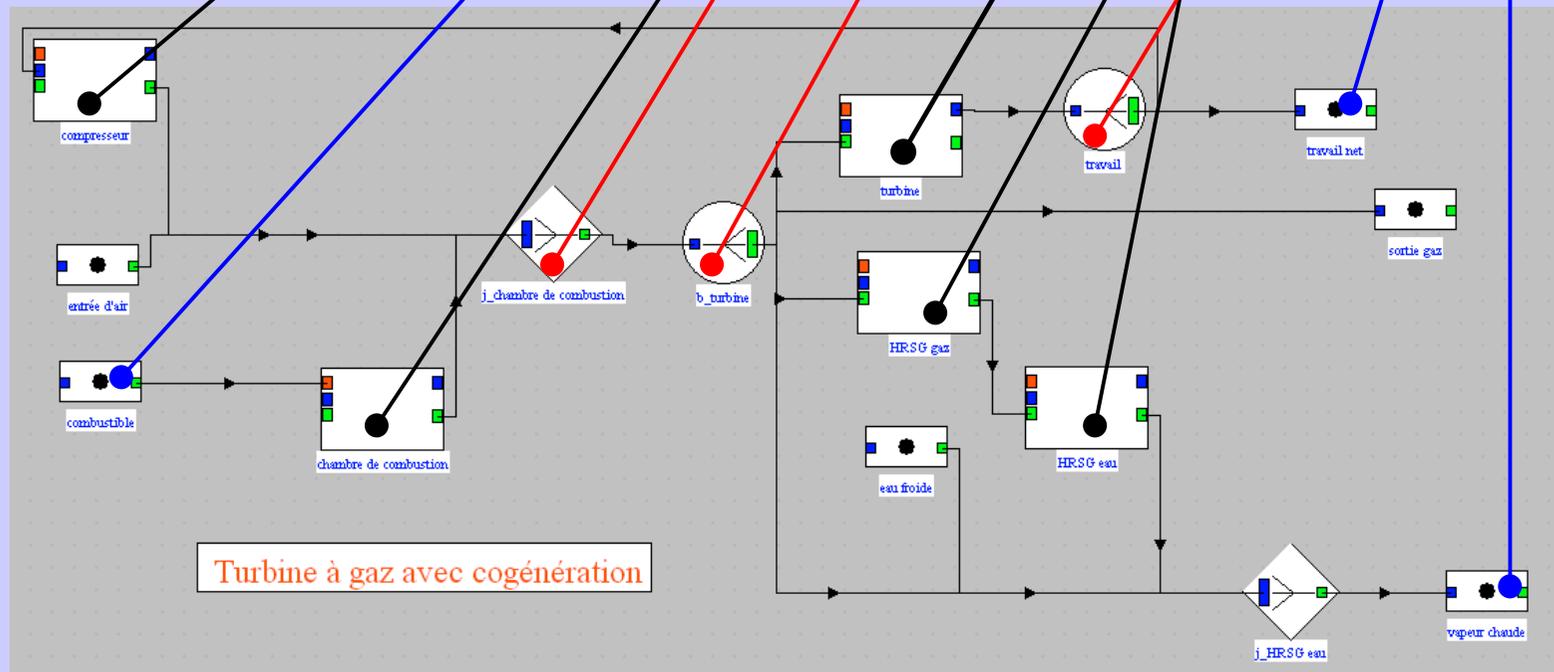
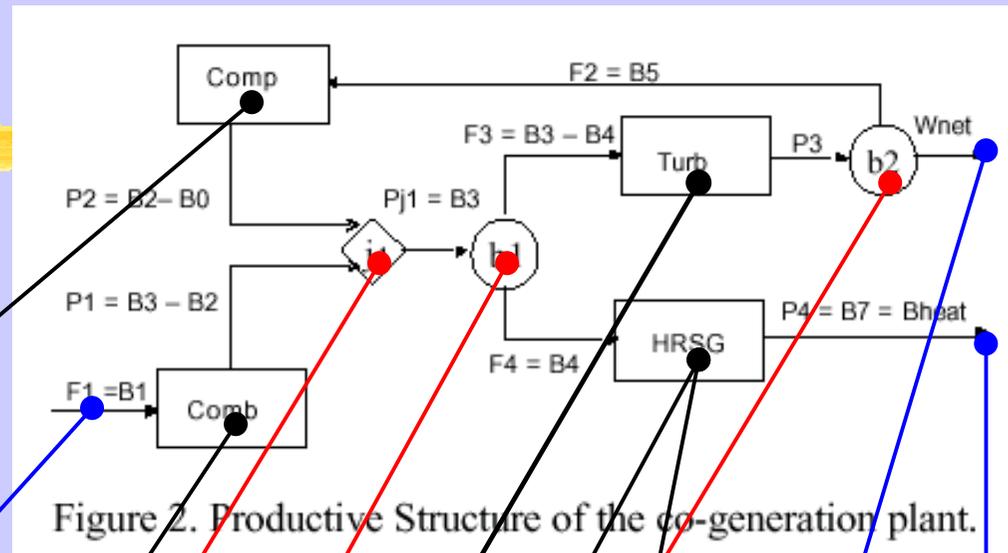
Exemple : turbine à gaz utilisée en cogénération

- Bilan exergétique complet généré automatiquement

Calculer		Exporter		T0 = 15.0 °C		
composant	Resource	Product	exergy efficiency	irreversibilities	% total	settings
combustible	897,041	0	0	0	0	
compresseur	442,71	402,238	0,908581	40,472	0,08259	
turbine	796,411	760,94	0,955462	35,471	0,07239	
chambre de com...	0	612,98	0,683336	276,56	0,5644	
eau froide	4,593	0	0	0	0	
vapeur chaude	0	114,658	0	0	0	
HRSG gaz	157,839	0	0	(157,839)	(0,3221)	HRSG
HRSG eau	0	110,065	0	(-110,065)	(-0,2246)	HRSG
sortie gaz	0	89,751	0	89,751	0,1832	loss
total	2 298,594	2 090,632	0,4565	490,028	1	

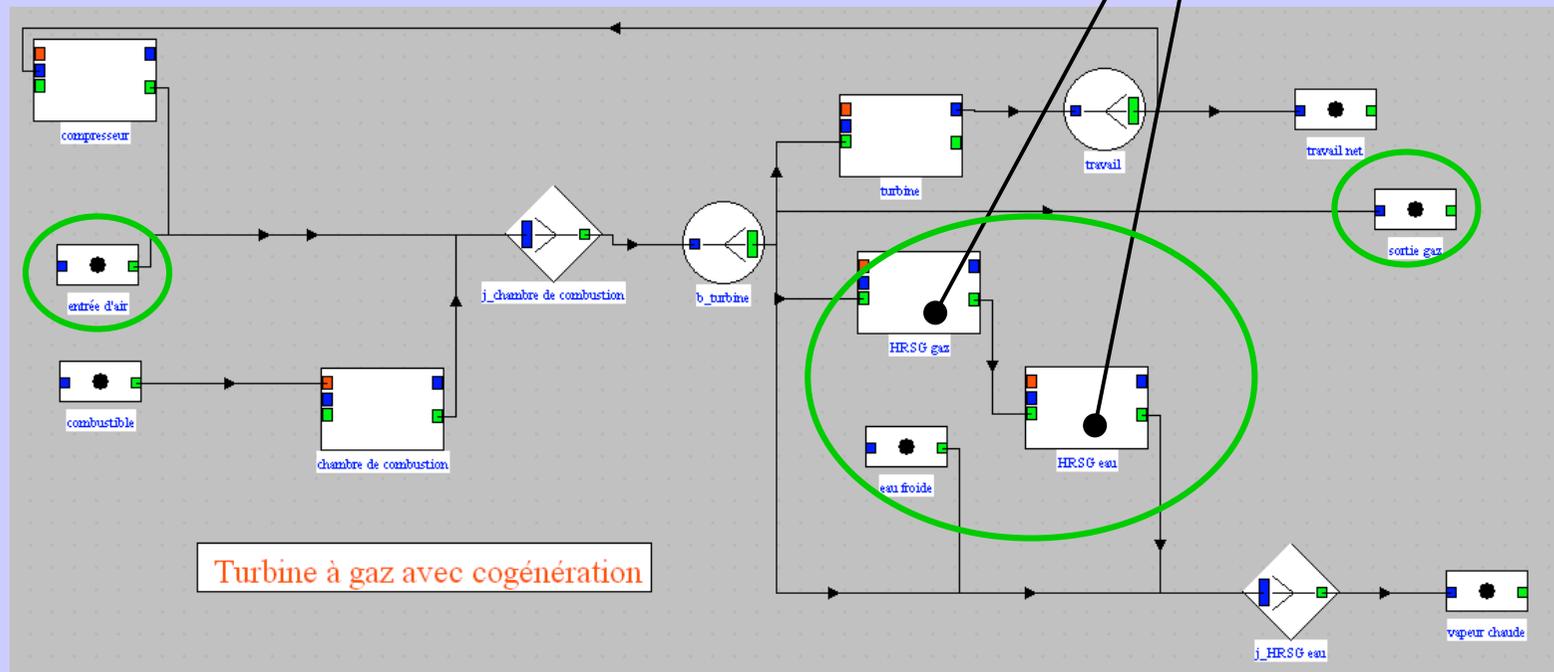
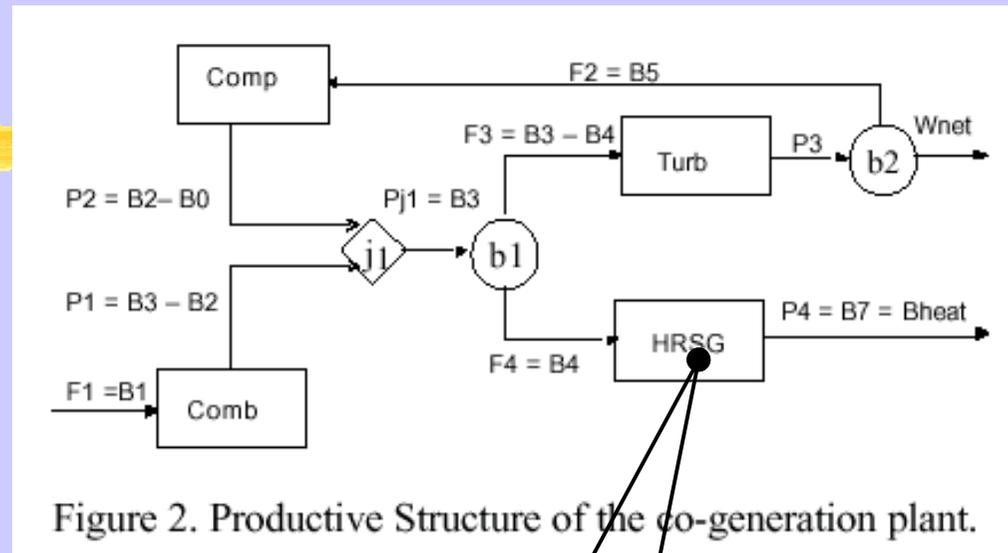
Turbine à gaz avec cogénération

- comparaison avec structure productive éditée à la main



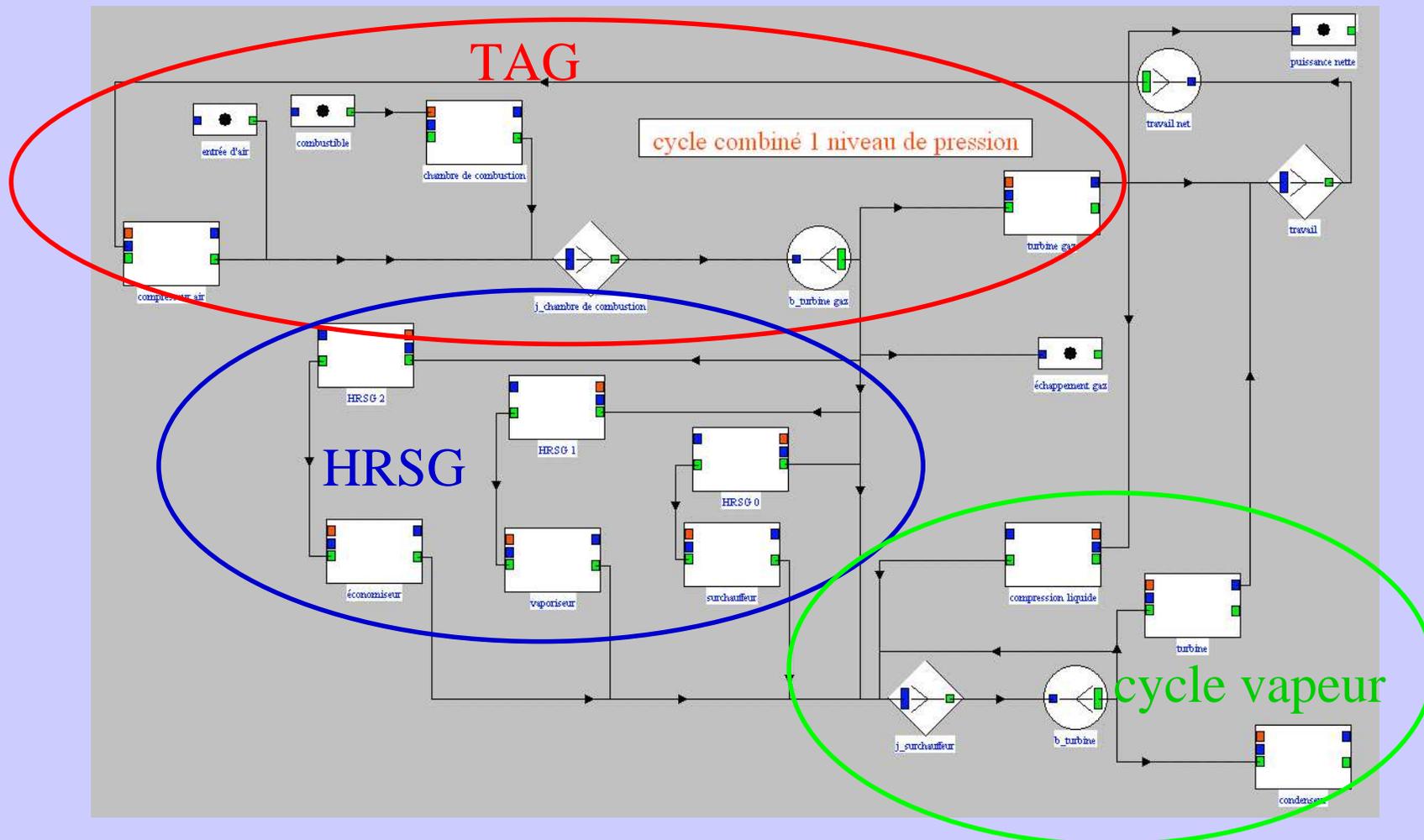
Turbine à gaz avec cogénération

- différences avec structure productive éditée à la main



Exemple d'un cycle combiné à un niveau de pression

➤ Structure productive



Exemple d'un cycle combiné à un niveau de pression

➤ Bilan exergetique complet

Calculer		Exporter		T0 = 15.0 °C		
composant	Resource	Product	exergy efficiency	irreversibilities	% total	settings
combustible	6 408,375	0	0	0	0	
compresseur air	3 320,351	3 016,784	0,908574	303,567	0,08697	
turbine gaz	5 411,424	5 170,866	0,955546	240,558	0,06892	
chambre de com...	0	4 355,37	0,679637	2 000,261	0,5731	
compression liq...	11,989	11,997	1	0	0	
turbine	1 446,794	1 235,45	0,853923	211,344	0,06055	
économiseur	0	468,756	0	(-468,756)	(-0,1343)	économiseur hx
HRSG 2	671,71	0	0	(671,71)	(0,1924)	économiseur hx
échappement gaz	0	238,698	0	238,698	0,06839	loss
HRSG 0	495,78	0	0	(495,78)	(0,142)	surchauffeur hx
surchauffeur	0	395,405	0	(-395,405)	(-0,1133)	surchauffeur hx
condenseur	0	-63,615	0	63,615	0,01823	Tk = 15,00 °C
vaporiseur	0	634,25	0	(-634,25)	(-0,1817)	vaporiseur hx
HRSG 1	763,22	0	0	(763,22)	(0,2187)	vaporiseur hx
total	18 529,643	15 463,961	0,4553	3 490,342	1	

Conclusions

- possibilité de générer automatiquement des structures productives (p. ex. à partir fichiers Thermoptim)
- seuls paramétrages manquants : couplages mécaniques, rôle des composants échangeant de la chaleur, températures des sources de chaleur externes
- génération des bilans exergétiques simplifiée et sécurisée, notamment pour les grands systèmes
- possibilité de construire le modèle thermoéconomique à partir de la structure productive (pas encore fait)