

**THERMOPTIM®**

**MANUEL**

**DE**

**RÉFÉRENCE**

**TOME II**





**SIMULATEUR**

**METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION ET DE VERIFICATION DES MODELES**

**VERSION JAVA 2.51**

**© R. GICQUEL MAI 2017**

# SOMMAIRE

<b>AVERTISSEMENT .....</b>	<b>5</b>
DOCUMENTATION DE THERMOPTIM .....	5
VERSION DE DEMONSTRATION .....	5
<b>NOTIONS DE BASE.....</b>	<b>5</b>
LES TYPES PRIMITIFS DU NOYAU DE THERMOPTIM .....	6
<i>Propriétés thermodynamiques des corps.....</i>	7
<i>Précision des données .....</i>	7
<i>Références bibliographiques pour les corps.....</i>	8
<i>Etat d'une masse fluide : les points.....</i>	8
<i>Transformations .....</i>	8
<i>Nœuds .....</i>	9
<i>Echangeurs.....</i>	9
<b>ECRAN PRINCIPAL DE PROJET (SIMULATEUR) .....</b>	<b>10</b>
<b>PRINCIPAUX MENUS .....</b>	<b>11</b>
<b>INTERNATIONALISATION DES SAUVEGARDES .....</b>	<b>12</b>
GESTIONNAIRE DES CORPS .....	12
<b>EXPORTATION DES RESULTATS SOUS FORME DE FICHIER TEXTE.....</b>	<b>13</b>
<b>ECRAN DE DEFINITION ET D'EVALUATION DES POINTS.....</b>	<b>13</b>
SYSTEMES OUVERTS.....	14
SYSTEMES FERMES .....	16
<b>EDITEUR DE GAZ COMPOSES .....</b>	<b>16</b>
<b>ECRANS DES TRANSFOS.....</b>	<b>18</b>
ECRAN DES COMPRESSIONS  ET DETENTES  .....	18
ECRAN DE TRANSFO ECHANGE  .....	20
<i>Prise en compte des débits volumiques et molaires.....</i>	20
ECRAN DE TRANSFO LAMINAGE  .....	22

transfo  type

type énergie  ☐ débit imposé





point amont   m Δh

débit  ☐ système fermé ☐ observée  
☒ système ouvert

T (°C)   
P (bar)   
h (kJ/kg)   
titre

point aval

T (°C)   
P (bar)   
h (kJ/kg)   
titre

ECRAN DES COMBUSTIONS 	22
Déclaration du combustible.....	23
Systèmes ouverts et systèmes fermés.....	24
Paramétrage de la combustion.....	25
Options de calcul.....	26
Cas particulier d'un mélange combustible seul.....	26
<b>ECRANS DES NŒUDS.....</b>	<b>27</b>
MELANGEUR 	27
DIVISEUR 	28
SEPARATEUR (OU SECHEUR) 	29
<b>ECRAN DES ECHANGEURS.....</b>	<b>30</b>
DIMENSIONNEMENT DES ECHANGEURS SIMPLES .....	31
LIQUIDE GENERIQUE .....	31
RESOLUTION DES ECHANGEURS EN REGIME NON NOMINAL .....	32
<b>GAZ HUMIDES.....</b>	<b>33</b>
CALCUL DES PROPRIETES HUMIDES D'UN POINT .....	34
Représentation par un gaz humide .....	34
Calcul des caractéristiques humides .....	34
Imposer l'humidité relative.....	35
Représentation par un gaz sec.....	35
ECRANS DES TRANSFOS HUMIDES.....	36
Transfo soufflage.....	37
Transfo refroidissement.....	37
Transfo humidification eau/vapeur ou adiabatique.....	38
Transfo dessiccation.....	39
Transfo chauffage.....	40
MELANGEUR HUMIDE.....	41
<b>DIAGRAMMES INTERACTIFS .....</b>	<b>42</b>
CONNEXIONS ENTRE LE SIMULATEUR ET LES DIAGRAMMES .....	44
AFFICHAGE EN FONCE DE L'ISOVALEUR CENTRALE .....	45
<b>OUTILS DE DIAGNOSTIC.....</b>	<b>46</b>

<b>MOTEUR DE RECALCUL AUTOMATIQUE .....</b>	<b>48</b>
CONCEPTS DE BASE ET PRINCIPES .....	49
ELEMENTS DU MOTEUR DE RECALCUL.....	49
<i>Contrôle du débit.....</i>	<i>49</i>
<i>Navigateurs de liens .....</i>	<i>50</i>
<i>Recalcul de sélections multiples .....</i>	<i>51</i>
<i>Contrôle des pressions .....</i>	<i>52</i>
<i>Echangeurs de chaleur.....</i>	<i>53</i>
OUTILS DE RECALCUL AUTOMATIQUE .....	53
<i>Utilisation du moteur de recalcul automatique .....</i>	<i>54</i>
<b>ANALYSES DE SENSIBILITE .....</b>	<b>56</b>
<b>METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION ET DE VERIFICATION DES MODELES.....</b>	<b>57</b>
REFLECHIR AVANT DE COMMENCER LA SAISIE DU MODELE.....	57
CONSTRUIRE LE MODELE EN PLUSIEURS ETAPES, ET EFFECTUER LES CALCULS PAS A PAS .....	58
REINITIALISER THERMOPTIM APRES AVOIR CONSTRUIT UN MODELE UN PEU COMPLEXE.....	58
COMMENT RENOMMER DES ELEMENTS D'UN PROJET EXISTANT .....	58
TESTER LE MODELE TRES SOIGNEUSEMENT AVANT DE L'EXPLOITER .....	58
RECHERCHE DES ANOMALIES DE MODELISATION .....	59
GESTIONNAIRE DE CORPS .....	60
DIAGRAMMES INTERACTIFS .....	60
OUTILS DE DIAGNOSTIC.....	60
Point avec pré requis multiples .....	61
Analyse des pressions .....	62
TESTER LE RECALCUL AUTOMATIQUE .....	62
CONTROLLER LE DEBIT .....	63

© R. GICQUEL 1997 - 2014. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans autorisation est illicite, et constitue une contrefaçon sanctionnée par le Code de la propriété intellectuelle.

Avertissement : les informations contenues dans ce document peuvent faire l'objet de modifications sans préavis, et n'ont en aucune manière un caractère contractuel.

## Avertissement

### Documentation de Thermoptim

La documentation du progiciel THERMOPTIM se présente sous trois formes complémentaires :

- une documentation succincte appelée "Référence rapide", accessible à partir du menu Aide du progiciel, sous forme d'une fenêtre à onglets présentant les principales notions utilisées
- une documentation imprimable, essentiellement sous format pdf
- de nombreuses ressources numériques mises en ligne dans le portail Thermoptim-UNIT ([www.thermoptim.org](http://www.thermoptim.org)), dont des modules de formation sonorisés

Des détails sur cette documentation sont donnés dans le premier tome du manuel de référence.

Le présent document en constitue le deuxième tome. Après une introduction rapide des notions de base qui sont utilisées dans le progiciel, sont présentés d'abord les écrans de chacun des types primitifs, puis les différents outils de l'environnement de modélisation.

### Version de démonstration

Une version de démonstration de Thermoptim Java 1.5 est diffusée gratuitement, pour permettre de visualiser des projets existants et leurs schémas, ainsi que d'en construire de petite taille afin de se familiariser avec les outils. Elle ne donne bien sûr pas accès à toutes les fonctionnalités présentées dans le manuel de référence. Bien qu'elle autorise le chargement d'un projet d'une taille dépassant les limites ci-dessous, le nombre des points ou des transformations que l'on peut y créer est limité à 10, et celui des nœuds à 5. Les diagrammes ne peuvent être utilisés que pour visualiser de manière passive des cycles construits dans le simulateur, car leur interactivité et l'accès à leur éditeur de cycle sont supprimés. Les outils de diagnostic, de suivi du recalcul automatique (ainsi que les pressions imposées), d'analyse de sensibilité et d'optimisation ne sont pas accessibles, et seuls certains corps sont disponibles. De plus, elle ne permet de sauvegarder ni les projets, ni les schémas, ni les fichiers de sortie de résultats.

## Notions de base

Lorsqu'on analyse les technologies énergétiques les plus répandues, on s'aperçoit que le nombre d'éléments dont elles sont composées est relativement limité, et que dans la plupart des cas chaque composant, pour une phase de fonctionnement donnée, échange de l'énergie selon un mode privilégié, soit sous forme purement thermique (transfert de chaleur), soit en convertissant de l'énergie mécanique en énergie de pression ou réciproquement.

En conséquence, les fonctions que sont amenés à remplir les différents composants peuvent être regroupées dans des catégories relativement peu nombreuses, calculables indépendamment les unes des autres, qui forment une **base de types primitifs** suffisante pour permettre de représenter un grand nombre de technologies énergétiques. Le cas des échangeurs de chaleur constitue l'exception qui confirme la règle, les calculs du refroidissement d'un fluide et de l'échauffement de l'autre devant être effectués de manière couplée.

Ces composants reliés entre eux constituent des systèmes auxquels il est fécond d'appliquer les techniques de modélisation systémique, qui permettent de montrer que l'étude d'un système thermodynamique peut être décomposée en quatre étapes fondamentales :

- 1) l'analyse de la structure (ou de l'architecture) de la technologie considérée, qui met en évidence ses principaux éléments fonctionnels et leurs connexions. Cette tâche, qui peut s'avérer plus délicate qu'il ne paraît car certains composants assurent quelquefois des fonctions différentes selon les phases de marche, est facilitée si l'on dispose d'une base de types primitifs bien choisie. La structure du système ainsi mise en évidence constitue un invariant à peu près indépendant de la finesse retenue pour la modélisation des composants.

- 2) pour chaque élément, l'identification du ou des fluides thermodynamiques qui entrent en jeu : par exemple, le fluide comprimé dans une turbine à gaz est de l'air, qui brûle avec un combustible dans la chambre de combustion, pour former des gaz brûlés, eux-mêmes détendus dans la turbine. Dans ce cas il faut donc considérer trois fluides thermodynamiques : dans le compresseur, l'air, qui peut éventuellement être humide, dans la chambre de combustion, l'air, le combustible, et les gaz brûlés, et dans la turbine les gaz brûlés.
- 3) pour chaque élément, la détermination précise des transformations qu'y subissent les différents fluides identifiés, et le calcul de leurs évolutions. Le niveau de finesse de la modélisation dépend de la précision recherchée et des données dont on dispose.
- 4) l'établissement du bilan global du système considéré par assemblage des différents modèles des éléments fonctionnels, compte tenu des connexions internes. Lorsque les précédentes étapes ont été menées avec soin, cette dernière ne présente généralement pas de difficulté particulière. Tout au plus faut-il veiller à bien définir les types d'énergie qui entrent en jeu, pour être certain de les comptabiliser correctement, notamment lorsque l'on souhaite calculer un rendement de cycle, ce qui est souvent le cas.

Une fois ces étapes franchies, on dispose de tous les éléments pour pouvoir passer à la phase d'optimisation du système, réalisable d'une part en faisant des études de sensibilité autour des paramètres de dimensionnement clés, et d'autre part en ayant recours à des outils spécialisés.

THERMOPTIM a été conçu pour faciliter le calcul de cycles thermodynamiques complexes, mais il ne peut se substituer à l'utilisateur pour effectuer l'analyse détaillée du système considéré, ce qui correspond aux trois premières étapes ci-dessus. Avant de commencer à entrer son projet dans le progiciel, l'utilisateur doit avoir effectué ce travail, faute de quoi il risque de commettre des erreurs de représentation.

Une fois cette analyse réalisée, chacun des composants peut être facilement décrit grâce aux points, transformations et échangeurs présentés ci-dessous, qui sont regroupés sous forme d'un projet faisant éventuellement appel à des nœuds.

## Les types primitifs du noyau de THERMOPTIM

Pour déterminer les performances des technologies énergétiques, il suffit donc de se doter d'un outil permettant de décrire, d'assembler et de calculer ces différents éléments sous une forme aussi pratique que possible. THERMOPTIM permet de le faire, soit en utilisant l'éditeur de schémas qui permet de faire une description qualitative du système étudié, puis de le transférer dans le simulateur pour le quantifier, soit en travaillant directement dans l'environnement du simulateur.

La liste des éléments fonctionnels qui sont susceptibles d'apparaître dans les principales technologies de conversion de l'énergie correspond aux concepts qui sont mis en œuvre dans le noyau de Thermoptim et qui seront détaillés ultérieurement. D'une certaine manière, ce progiciel constitue ainsi un Système Général au sens de Le Moigne pour la modélisation systémique des technologies énergétiques : établir le modèle d'une technologie énergétique donnée consiste à en construire une représentation aussi fidèle que possible en assemblant entre eux différents objets choisis parmi ceux que le progiciel propose.

La liste suivante constitue une base de types primitifs suffisante pour l'étude de nombreuses technologies énergétiques, le recours aux classes externes (cf. tome 3) permettant de l'étendre en cas de besoin :

- il faut tout d'abord pouvoir représenter les *propriétés des fluides* utilisés, et en calculer l'état pour diverses valeurs de la pression, de la température...
- ces fluides subissent dans les machines des évolutions (ou *transformations*) qui peuvent être regroupées en quelques grandes catégories, dont les plus courantes sont les suivantes : des compressions, des détente, des combustions et des échanges de chaleur.
- les fluides mis en jeu parcourent les machines en formant des réseaux plus ou moins complexes qu'il faut pouvoir décrire. Les transformations mises en évidence précédemment correspondent à une partie de ces circuits. Pour les compléter, il faut faire appel à des *nœuds* (des diviseurs ou des mélangeurs).

- lorsque deux fluides échangent mutuellement de la chaleur, ils forment des *échangeurs de chaleur*, composants couplés dont les deux transformations ne peuvent être calculées séparément.

Nous commencerons par développer un peu plus avant la base de types primitifs proposée par cet environnement de modélisation.

## Propriétés thermodynamiques des corps

La représentation des propriétés thermodynamiques des corps est bien évidemment une nécessité. Elle suppose d'une part de se donner des modèles de fluides adéquats, et d'autre part de disposer de données pour représenter les fluides utilisés.

Tout corps se présente sous l'une au moins des trois phases solide, liquide ou gazeuse. Lorsque la pression est suffisamment faible et la température suffisamment élevée, on est en droit de considérer que le corps se comporte comme un gaz idéal dont la capacité thermique massique, l'énergie interne et l'enthalpie ne dépendent que de la température (et non pas de la pression).

La composition chimique des fluides mis en jeu dans les transformations peut varier, comme par exemple lors d'une combustion. Pour ce concerne les gaz, le problème peut être résolu relativement facilement, la loi de Dalton stipulant qu'un mélange de gaz idéaux se comporte lui-même comme un gaz idéal.

Il en va tout autrement des vapeurs condensables, dont le calcul est déjà complexe pour les corps purs, et peut être très difficile pour les mélanges du fait des interactions moléculaires entre leurs constituants. En pratique toutefois, les mélanges de vapeurs ne sont utilisés que rarement en énergétique, comme par exemple pour la réfrigération comme fluides de remplacement de certains chlorofluorocarbures (CFC) bannis par le Protocole de Montréal.

THERMOPTIM comprend l'ensemble des données thermophysiques nécessaires pour calculer l'état des fluides utilisés, qui peuvent être soit des corps purs, soit des mélanges de gaz. Leur composition peut évoluer, que ce soit du fait de mélanges ou de réactions de combustion.

Le progiciel définit trois catégories de corps : des gaz idéaux purs, des gaz idéaux composés, et des vapeurs condensables (sans mélanges). Les gaz parfaits correspondent au cas particulier de gaz idéaux dont la capacité thermique massique est indépendante de la température. Thermoptim accepte une autre catégorie de corps, dits externes, définis par l'utilisateur, mais qui apparaissent dans ses écrans (voir note spécifique à ce sujet).

Le corps peut être pur, auquel cas ses propriétés sont prédéfinies dans le progiciel, ou composé. Dans ce cas (qui n'est possible que pour un gaz), l'utilisateur doit définir la composition à partir des autres gaz présents dans la base, en indiquant, pour chacun d'entre eux, son nom et sa fraction molaire ou massique. Les propriétés du corps composé sont alors automatiquement déterminées à partir de celles de ses constituants. Deux catégories de gaz composés existent : les gaz protégés et les gaz non protégés. Cette distinction a été introduite pour éviter que certains gaz dont la composition est fixée, comme par exemple l'air, ne soient involontairement modifiés du fait d'une erreur de modélisation. Seuls les gaz non protégés peuvent voir leur composition modifiée et être enregistrés.

Un corps particulier a été introduit dans la base : il s'appelle "liquide générique" (cf. section sur les échangeurs). Sa particularité est d'être un liquide à la pression atmosphérique, et d'avoir une chaleur massique égale à 1 kJ/kg/K. Il peut être utilisé pour simuler un liquide absent de la base que l'on veut utiliser dans un échangeur. Toutefois, la meilleure manière d'introduire des liquides est certainement de définir des corps externes que Thermoptim est capable d'intégrer dans sa base de données (cf. tome 1).

## Précision des données

Avertissement : les ordres de grandeur de précision donnés ci-après sont seulement indicatifs et n'ont en aucun cas un caractère contractuel.

Les propriétés thermodynamiques des gaz idéaux sont déterminées par régression sur les données des tables JANAF [CHASE et al. 1985] à partir d'un développement polynomial à 7 termes. L'équation d'état

retenue pour toutes les vapeurs condensables sauf pour l'eau est celle de Peng Robinson, modifiée pour les pressions circum et supercritiques pour obtenir un bon ajustement. Pour l'eau, il s'agit des équations proposées par le Comité International de Formulation de la Sixième Conférence sur les Propriétés de la Vapeur en 1967 [GRIGULL et SCHMIDT, 1982], qui font appel à de nombreux paramètres, mais sont extrêmement précises.

La précision des calculs est excellente pour les gaz idéaux (erreur sur la chaleur massique inférieure à 0,5 %), et pour l'eau (des tests comparatifs effectués avec les Tables de la vapeur de l'ASME conduisent, pour des compressions et détente, à des erreurs relatives sur les enthalpies mises en jeu inférieures à 0,02 % pour les zones vapeur et équilibre liquide-vapeur, et inférieures à 0,5 % pour les compressions à l'état liquide).

Pour les autres vapeurs condensables, la précision est un peu moindre, les écarts les plus grands correspondant à la zone liquide pour des pressions réduites supérieures à 0,7, et notamment supercritiques.

## Références bibliographiques pour les corps

CHASE et al., Janaf Thermochemical Tables, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol 14 Suppl. 1, 1985

REID R. C., PRAUSNITZ J. M., POLING B. E., The Properties of Gases and Liquids, 4th Edition, Mc Graw Hill, 1987

GRIGULL U., SCHMIDT E., Properties of Water and Steam in SI units 0-800 °C, 0-1000 bar, 3rd Ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, R. Oldenbourg, München, 1982

DAUBERT T. E., DANNER R. P., SIBUL H. M., STEBBINS C. C., Physical and Thermodynamic Properties of Pure Chemicals : Data Compilation, Design Institute for Physical Property Data, ASME, Taylor & Francis, Washington, 1989-1997

## Etat d'une masse fluide : les points

Une fois que l'on dispose d'une représentation des propriétés des corps, il devient possible de calculer l'état d'une masse fluide en fonction des grandeurs représentatives intéressantes, comme la pression, la température, l'enthalpie...

Dans THERMOPTIM, on définit pour cela des points. Un point désigne une particule d'un corps et permet de déterminer ses variables d'état intensives : pression, température, capacités thermiques massiques, enthalpie, entropie, énergie interne, exergie, titre. Un point est identifié par son nom et celui du corps qui lui est associé. Pour le calculer, il faut :

- soit entrer au moins deux de ses variables d'état, généralement la pression et la température pour les systèmes ouverts, et le volume et la température pour les systèmes fermés,
- soit les déterminer automatiquement en utilisant par exemple l'une des transformations définies ci-dessous.

## Transformations

Les transformations (appelées transfos dans THERMOPTIM) correspondent à des évolutions thermodynamiques subies par un corps entre deux états. Une transfo associe donc deux points tels que définis précédemment, un point amont et un point aval. De plus, elle spécifie le débit massique mis en jeu, et permet donc de calculer les variables d'état extensives, et notamment de déterminer la variation d'énergie mise en jeu.

Les transformations les plus courantes ont été modélisées et sont directement accessibles. Connaissant l'état du fluide avant la transformation, THERMOPTIM peut alors résoudre soit le *problème direct*, soit le *problème inverse*. Dans le premier cas, connaissant les caractéristiques de la transfo, il calcule l'état à la fin de l'évolution et les énergies mises en jeu, et met à jour le point aval. Dans le second cas, il identifie



les valeurs des paramètres de la transfo pour que l'évolution choisie conduise bien à l'état du point aval tel qu'il est défini.

Les transformations peuvent être de plusieurs types : compressions, détente, combustions, laminages, échanges de chaleur, et transformations humides (ce dernier cas recouvre sept catégories d'évolutions différentes). Elles sont présentées en détail au chapitre 3.

Un point ne permettant pas de préciser le débit mis en jeu, il peut être nécessaire de créer des transfos particulières, appelées transfos-points. Une transfo-point relie un point avec lui-même, et spécifie le débit masse à prendre en compte. Son type sera préférentiellement "échange".

Un cycle peut être décrit comme un ensemble de points reliés par des transformations. Dans la mesure où le débit massique de fluide est le même dans toutes les transfos, des transfos et des points suffisent pour cela, le réseau de fluide étant implicitement défini par les connexions internes. Si ce n'est pas le cas, il peut être nécessaire de compléter la description du réseau en utilisant les nœuds définis ci-dessous.

## Nœuds

Les nœuds permettent de décrire les éléments du réseau où prennent place les mélanges et les divisions de fluides. Dans un nœud, plusieurs embranchements de fluide sont reliés entre eux pour former une veine unique.

S'il s'agit d'un mélangeur, les diverses branches se rejoignent pour former une seule veine. Le débit massique de la veine principale est égal à la somme de ceux des branches, et le bilan enthalpique permet de calculer l'enthalpie massique et la température du mélange.

S'il s'agit d'un diviseur, la veine principale se subdivise en plusieurs branches dont il faut bien sûr préciser les débits, la température et l'enthalpie massique étant conservées.

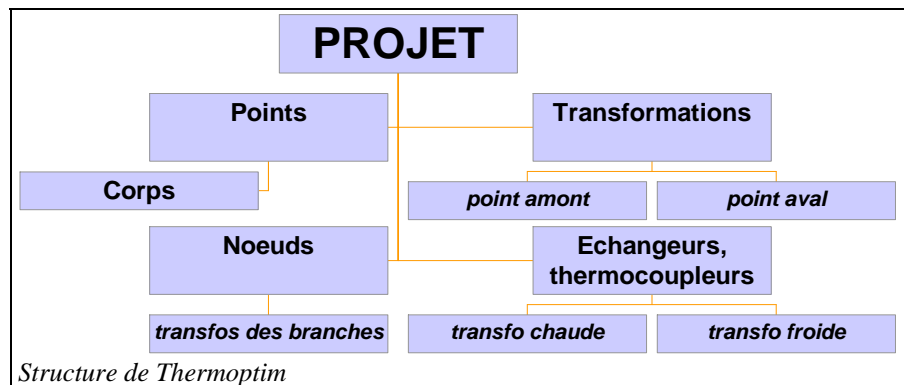


Dans THERMOPTIM, on peut mélanger entre eux plusieurs fluides différents, pourvu que le mélange soit un gaz. Cela signifie que s'il y a des vapeurs condensables parmi les fluides des branches d'un mélangeur associant plusieurs fluides distincts, on fait l'hypothèse qu'elles se retrouvent ensuite à l'état gazeux, et suivent un comportement de gaz idéal. Les mélanges de vapeurs ne sont, rappelons-le, pas encore modélisés dans le progiciel. Les propriétés du mélange sont calculées par application de la Loi de Dalton. L'utilisateur se doit de vérifier que cette hypothèse est valable. Si ce n'est pas le cas, les résultats trouvés par le progiciel peuvent être absurdes.

La définition logique d'un nœud se fait par association (1-n) de transfos : une transfo correspond à la veine principale, et n transfos correspondent aux branches. Les transfos étant elles-mêmes reliées à des points, et ces derniers aux corps, les mises à jour de l'état des fluides sont faites automatiquement.

## Echangeurs

Les échangeurs thermiques sont des composants qui associent deux fluides, l'un qui se réchauffe, l'autre qui se refroidit, dont les évolutions sont couplées et ne peuvent être calculées indépendamment. La définition la plus simple



d'un échangeur demande donc que l'on indique quelles sont les deux transfos qu'il apparie.

THERMOPTIM peut dimensionner un échangeur, c'est-à-dire calculer la valeur que doit prendre le produit UA de sa surface d'échange par son coefficient d'échange thermique, si l'on indique quelles sont les contraintes sur les débits et les températures que l'on impose (par exemple pincement minimal, efficacité imposée...).

## Ecran principal de projet (simulateur)

**THERMOPTIM Java. Copyright R. Gicquel 1999-2005** Fichier de projet : D:\Users\thermo\THERMOPTIM\_Java\...\ExLib\proj\...

Fichiers de projet Fichiers de résultats Spécial Aide

Nom du projet : TAG fract régén Schéma associé : TAG régénération

**14 POINTS**

nom du point	corps	P (bar)	T (°C)
1	air	1	15
2	air	16	228,9909
2 bis	air	16	668,9816
combustible	gaz_de_Mont...	20	15
1a	air	4	178,85305
1i	air	4	47,77061

**0 PRESSIONS IMPOSEES**

nom	valeur
-----	--------

turbine à gaz biétagée avec régénération

**16 TRANSFOS**

nom transfo	point amont	point aval	type transfo
échappement	5	5	échange
air refroidi	air refroid	air refroid	échange
air refr	1_0	1_0	échange
combustible 2	combustible 2	combustible 2	échange
entrée air	1	1	échange
combustible	combustible	combustible	échange

**0 NOEUDS**

nom	type	veine principale
-----	------	------------------

**2 ECHANGEURS DE CHALEUR**

nom	type	fluide chaud	fluide froid
intercooler	croisé non ...	refroid air	refroid air
régénérat...	croisé non ...	régén gaz	régén air

efficacité 0,462  
énergie utile 501  
énergie payante 1 084

Bilan

Recalculer

unité de débit

Cet écran donne accès aux principaux types primitifs de ThermoOptim permettant de définir et de modifier les projets. Il comprend cinq tables, dont les trois de gauche correspondent aux points, aux transfos et aux nœuds, et les deux de droite aux pressions imposées (sauf dans la version éducation) et aux échangeurs. Chacune de ces zones est munie d'un indicateur du nombre d'éléments existants. Un champ de commentaire est disposé dans la partie supérieure droite de l'écran. Il permet de documenter le projet par un petit descriptif affiché dans les bibliothèques de projet. Sur la droite de l'écran apparaît en médaillon une image illustrant le projet. En double-cliquant dessus, on accède à une fenêtre agrandie où elle peut être affichée en taille réelle, ou remplacée par une autre.

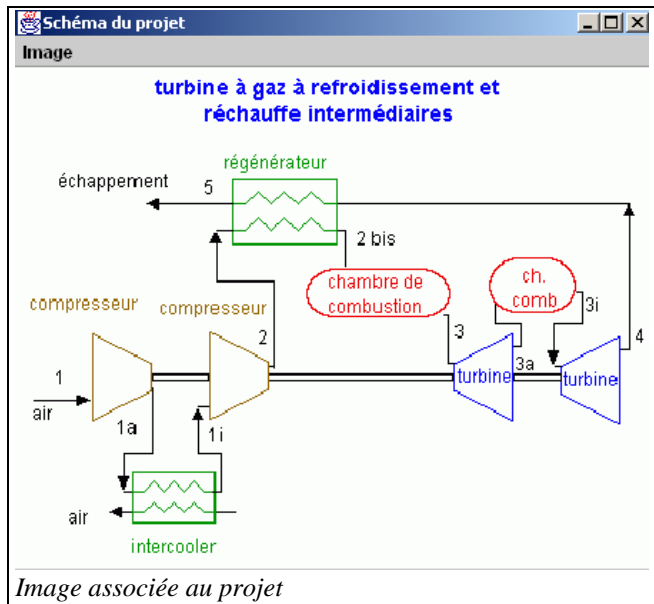
Au haut de l'écran apparaissent le nom du projet et le schéma associé s'il y en a un. Pour modifier ces noms, double-cliquez dans le champ correspondant, et entrez la nouvelle chaîne de caractères.

Dans la partie centrale, le bouton "Bilan" permet de calculer le bilan global du projet, avec les conventions suivantes. Chaque transfo possède un type d'énergie qui permet de distinguer les énergies "payante", "utile" et "autre". L'énergie payante affichée sur l'écran ci-dessus représente généralement la somme de toutes les énergies que l'on a dû fournir au cycle en provenance de l'extérieur. L'énergie utile représente le bilan net du cycle, c'est-à-dire la somme algébrique des énergies produites et consommées en son sein. Ces deux formes d'énergie sont celles qui apparaissent dans la définition de l'efficacité :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie payante}}$$

Par exemple, dans un cycle de Hirn, l'énergie payante est l'énergie fournie à la chaudière, et l'énergie utile est la différence entre l'énergie produite par la turbine et celle consommée par la pompe pour mettre l'eau en pression. L'énergie autre est la chaleur rejetée au condenseur. Dans un cycle de réfrigération à compression, l'énergie payante est l'énergie consommée par le compresseur, l'énergie utile est l'effet frigorifique (frigories extraites à l'évaporateur), et l'énergie autre est la chaleur à évacuer au désurchauffeur et au condenseur.

Au dessous de ces indicateurs, le bouton "Recalculer" permet d'initier le processus de recalcul, le nombre de types invalidés et calculables étant affichés. Cette fonctionnalité est présentée dans la section "Outils de recalcul".



Sur la droite de l'écran apparaît l'image miniaturisée d'un schéma représentant le projet étudié si une image lui a été associée. Si vous double-cliquez dessus, vous ouvrez une fenêtre dont le menu vous permet de charger ou de supprimer l'image.

Le nom de l'image au format .gif ou .jpg est sauvé dans le fichier de projet (.prj). Elle doit être placée dans le même répertoire que ce fichier.

## Principaux menus

Le menu "Fichiers de projet" permet de créer un nouveau projet ou d'en d'ouvrir un existant, et de le sauver. Il donne aussi accès à deux bibliothèques : celle des projets courants, placés dans un répertoire non protégé, et celle des exemples, placés dans un répertoire protégé depuis le progiciel.

Le "Catalogue d'exemples" permet de rechercher et de charger des exemples de cycles modélisés sur Thermoptim, pour faciliter leur utilisation en liaison avec un livre ou un polycopié (cf. tome 1).

Le menu "Fichiers de résultats" permet d'exporter sous format texte structuré les résultats du simulateur (voir page suivante), d'exporter un fichier de cycle qui peut être relu par un diagramme interactif (voir documentation des diagrammes), ou d'exporter un problème d'intégration thermique.

Lorsque la ligne de menu "Exporter des calculs exergetiques" est sélectionnée, un écran propose comme valeur de la température de l'environnement celle qui est définie dans les paramètres globaux. Cette valeur peut alors être modifiée, et l'ensemble des points et des transos du projet sont recalculés, puis sauvegardés dans un fichier. Une fois les calculs effectués, la température de l'environnement reprend sa valeur initiale. Il est ainsi possible de calculer l'ensemble des exergies mises en jeu dans un projet sans avoir à le recalculer complètement comme c'était le cas auparavant.

Fichiers de projet	Fichiers de ré
Nouveau projet	Ctrl-N
Charger un projet	Ctrl-O
Sauver ...	Ctrl-S
Enregistrer sous ...	
Bibliothèque de projets	
Bibliothèque d'exemples	
Catalogue d'exemples	Ctrl-E
Quitter	Ctrl-Q

Fichiers de résultats	Spécial	Aide
Exporter les résultats		
Exporter un fichier de cycle		
Exporter les fluides de méthode de pincement		
Exporter des calculs exergetiques		

Le menu "Spécial" donne accès à un certain nombre d'outils :

- l'éditeur de schémas qui permet de définir graphiquement un projet
- les diagrammes thermodynamiques interactifs
- les outils d'optimisation par intégration thermique (tome 1)
- les outils de recalcul automatique dont il a été fait mention plus haut
- les outils de diagnostic permettant de vérifier la cohérence d'un modèle
- un écran permettant d'effectuer des analyses de sensibilité sur un projet existant
- l'écran de pilotage est une spécificité utilisable avec des classes externes (tome 3)
- le visualisateur de classes externes permet d'analyser le contenu des archives extThopt2.zip et extUser2.zip (tome 3)
- le gestionnaire de classes externes permet de modifier le contenu de l'archive extUser2.zip (tome 3)

Spécial	Aide
Editeur de schémas	Ctrl-D
Diagrammes Interactifs	Alt-C
Outils d'Optimisation	Ctrl-M
Outils de recalcul automatique	Ctrl-R
Outils de diagnostic	
Analyses de sensibilité	
Gestionnaire des corps	
Ecran de pilotage	
Visualisateur de classes externes	
Gestionnaire de classes externes	

Le menu "Aide" donne un accès direct à la documentation via des hyperliens ("Manuels de référence"), permet d'ouvrir l'écran de "Référence rapide", qui fournit une synthèse des principales notions utilisées dans le progiciel, d'afficher le texte de la licence, et enfin d'accéder aux paramètres globaux (définition du répertoire de travail, et choix de l'unité de température...).

Aide
Manuels de référence
Référence rapide
A propos de THERMOPTIM
Licence
Paramètres globaux

## Internationalisation des sauvegardes

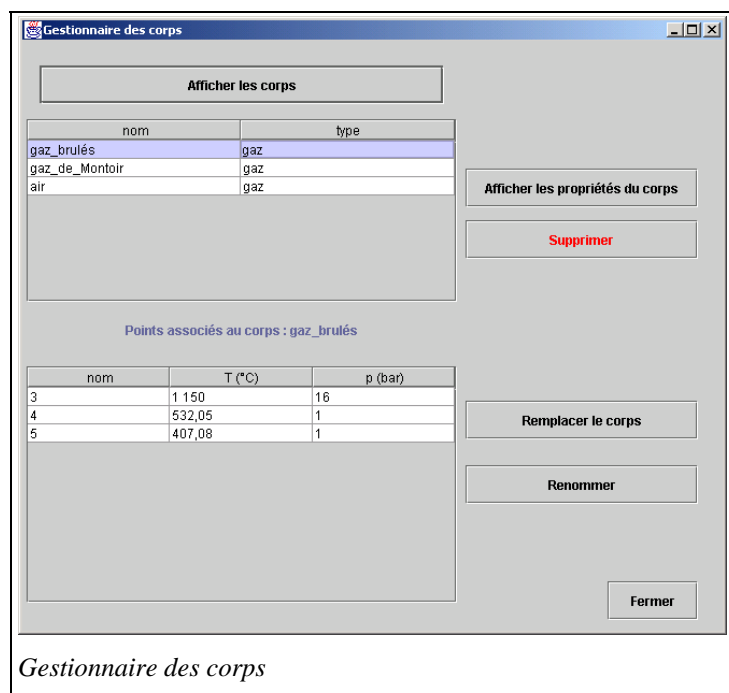
Jusqu'à la version 1.3, la sauvegarde des fichiers de projet et de schémas était faite en référençant les différents types primitifs dans la langue du système d'exploitation, et en utilisant le formatage de nombre correspondant. Cette méthode présente l'inconvénient qu'un tel fichier de données ne peut être lu dans une langue autre que celle de sa création.

Pour y remédier, la version 1.4 introduit un autre mode de sauvegarde, où chaque type primitif est référencé de manière universelle, et où le formatage des nombres est celui de la langue anglaise, sans séparateur des milliers. En fait, cette version peut relire l'un ou l'autre des types de fichiers (compatibilité descendante vers la version 1.3, la langue du système d'exploitation étant celle de création des fichiers), et les sauvegarde de manière universelle. Il est évident que les noms donnés aux types primitifs par l'utilisateur ne sont pas traduits, mais le projet peut être logiquement construit.

### Gestionnaire des corps

Un problème se pose cependant au niveau des noms des corps : afin d'éviter de générer des erreurs,

Thermoptim construit automatiquement un gaz composé ayant par défaut soit la composition de l'air, soit



celle de l'azote lorsqu'un utilisateur entre le nom d'un corps qui n'est pas dans la base. Lors de la relecture en anglais d'un fichier généré en français, le corps "eau" sera donc construit comme un gaz composé. Il est évident que ceci peut poser problème, mais il n'y a pas moyen d'effectuer automatiquement une traduction correcte quelle que soit la langue.

La solution retenue est de recourir à un outil permettant de contrôler facilement la manière dont les corps ont été instanciés et de les renommer. Cet outil s'appelle le Gestionnaire des corps, accessible à partir du menu Spécial du simulateur. Il permet de remplacer les corps d'un projet créé dans une autre langue, ou bien, si on le désire, de remplacer un corps dans l'ensemble d'un projet pour tester l'influence d'un changement de corps (par exemple celle du choix du fluide frigorigène sur les performances d'un cycle de réfrigération). Cet outil n'est pas disponible dans la version de démonstration.

La table située en haut à gauche permet, en cliquant sur "Afficher les corps", d'afficher tous les corps utilisés par le projet. Si vous cliquez sur une des lignes, les points associés à ce corps s'affichent dans la table du dessous. Si un corps n'est relié à aucun point, il est possible de le supprimer. Si une ligne est sélectionnée et que vous cliquez sur "Afficher les propriétés du corps", sa composition s'affiche si c'est un gaz, et ses paramètres caractéristiques si c'est une vapeur.

Si vous cliquez sur "Remplacer le corps", la liste hiérarchisée de sélection des corps est affichée, pour que vous sélectionniez le corps de remplacement de celui dont les points sont affichés. Si vous en choisissez un et cliquez sur "OK", tous les points associés au premier corps sont modifiés en conséquence et recalculés. De la même manière, vous pouvez renommer un corps à condition qu'il ne s'agisse pas d'une vapeur. Bien évidemment, le nouveau nom ne doit pas être celui d'un gaz pur ou protégé, ni celui d'une vapeur.

## Exportation des résultats sous forme de fichier texte

L'ensemble des résultats correspondant à un projet peut être regroupé dans un fichier texte retraitable soit par un progiciel de traitement de texte, soit par un tableur. Pour cela, dans le menu " Fichiers de résultat", activez la ligne "Exporter les résultats".

Une fenêtre de sauvegarde est ouverte pour que vous choisissiez le fichier de sauvegarde. Une fois qu'il est créé, ouvrez-le avec un tableur. Vous obtenez le résultat ci-dessous.

Ce fichier comporte le bilan d'ensemble et les principaux résultats de calcul des différents types primitifs qui composent votre projet : état des différents points, énergies mises en jeu dans les transfos, compositions des gaz du projet...

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J									
1	LOGICIEL THERMOPTIM	Copyright R. Gicquel 1999-2000																	
2	EXPORTATION	3 juillet 2000 14 h 52 GMT+02:00																	
3	lang=fr																		
4	Nom du projet	TAG fract régén																	
5																			
6	Bilan																		
7	efficacité	énergie payante	énergie utile																
8	0,458277	1 028,81	471,48																
9																			
10																			
11	POINTS	14																	
12	nom	nom corps	T (K)	p (bar)	titre	h (kJ/kg)	s (kJ/kg/K)	V (m3/kg)	u (kJ/kg)	Cp	Cv								
13		1 air	294	1	0	-4,00875394	0,14814965	0,84409696	-2,86032271	1 002,097808									
14		2 air	485,731721	16	1	190,27141	-0,13971003	0,08716086	136,372167	1 029,467808									
15	2 bis	air	914,573473	16	0	651,884191	0,53831449	0,16411324	474,861132	1 122,647808									
16	combustible	gaz_de_Montoir	298,15	20	0	0,31457081	-1,12432092	0,06731935	0,24683375	2 097,350432	1 6								
17	1a	air	460,986233	4	1	164,858127	0,20460767	0,33088187	118,063507	1 024,547808									
18	1i	air	310,148052	4	0	12,1798044	-0,19626237	0,22261482	8,69200391	1 002,987808									
19	air refroid	air	315,224705	4	0	17,2724941	-0,17997513	0,22625869	12,3271467	1 003,337808									
20		3 gaz brûlés	1 373,15	16	1	1 222,416758	1,11535112	0,24915092	910,288164	1 241,451672									
21	3a	gaz brûlés	1 043,903422	4	1	822,305459	1,18501294	0,75764337	605,760989	1 185,851672									
22	3i	gaz brûlés	1 373,15	4	1	1 247,687383	1,57359054	1,00406821	933,220956	1 271,376097									
23		4 gaz brûlés	1 048,215305	1	1	843,555255	1,64358726	3,06588404	624,127708	1 212,926097									
24		5 gaz brûlés	661,776844	1	0	391,954159	1,10774219	1,93560527	285,554489	1 121,146097									
25	1_0	air	300	1	0	2,00466182	0,16839752	0,86132343	1,4304462	1 002,377808									
26	combustible 2	gaz_de_Montoir	298,15	1	0	0,31457081	0,22849316	1,34638706	0,24683375	2 097,350432	1 6								
27																			
28	TRANSFOS	16																	
29	nom	point amont	point aval	type	Delta H	type_ener	débit												
30	combustion 1	2 bis		3 combustion	586,532794	payante	1,01308901												
31	combustion 2	3a	3i	combustion	442,279126	payante	1,02216931												
32	compression 1		1 1a	compression	168,866881	utile	1												
33	compression 2			2 compression	178,091605	utile	1												
34	détente 1		3 3a	détente	-405,34836	utile	1.01308901												

## Ecran de définition et d'évaluation des points

L'écran des points permet de définir un point et de calculer les valeurs prises par l'ensemble de ses fonctions d'état. Trois onglets permettent de sélectionner le mode de calcul approprié par défaut d'une part pour les systèmes ouverts, les grandeurs saisissables étant alors la pression, et la température, l'enthalpie ou l'entropie, d'autre part pour les systèmes fermés, pour lesquels on saisit le volume, et la température, l'énergie interne ou l'entropie, et enfin pour les systèmes humides, mélanges d'un gaz sec et de vapeur d'eau, qui seront détaillés dans une section particulière.

Pour les vapeurs condensables, le progiciel ne calcule ni les valeurs des chaleurs massiques  $C_p$  et  $C_v$  (excepté en zone liquide), ni leur rapport  $\gamma$ .

### Systèmes ouverts

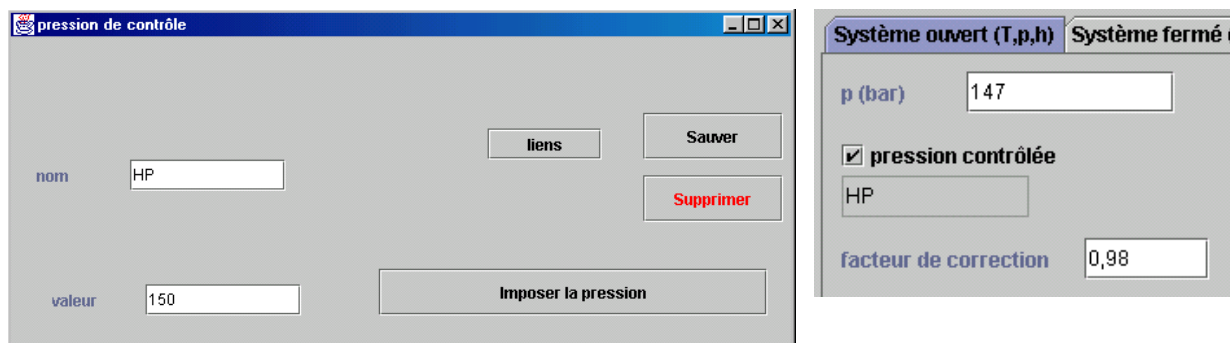
Pour les systèmes ouverts, la connaissance de la pression et de la température permet, si la boîte "p et T connus" est cochée, de calculer directement toutes les autres fonctions d'état (la température doit être saisie dans l'unité choisie au niveau des propriétés globales, mais elle s'affiche aussi dans l'autre une fois le calcul effectué). L'exergie est calculée sur la base de la température de référence définie au niveau des propriétés globales. Si l'on connaît l'enthalpie et la pression, c'est la boîte "p et h connus" est cochée. Si l'on connaît l'entropie et la pression, c'est la boîte "p et s connus" est cochée.

Pour les vapeurs condensables, s'affichent :

- trois options supplémentaires : "non contraint", "imposer la pression de saturation" et "imposer la température de saturation", dont la signification est sans ambiguïté,
- le titre  $x$  du mélange, qu'il faut entrer dans le cas où l'on se situe dans la zone d'équilibre liquide-vapeur
- un champ intitulé "écart Tsat" coloré en rose, qui permet, utilisé en association avec "imposer la température de saturation", de décaler la valeur de la température du point d'une valeur fixe par rapport à la température de saturation. Dans l'exemple ci-dessus, la température du point est de 5 K inférieure à celle de saturation.

Pour permettre de faire varier simultanément la pression d'un ensemble de points, un mécanisme particulier a été mis en place, celui des "pressions imposées" (excepté pour la version éducation). Il est possible de les définir en associant un nom et une valeur dans l'écran qui est affiché lorsqu'on double-clique dans le bandeau de la table intitulée "Pressions imposées" située en haut à droite de l'écran principal des projets.

Ici par exemple, la pression imposée s'appelle "HP" pour Haute Pression, et vaut 150 bar :

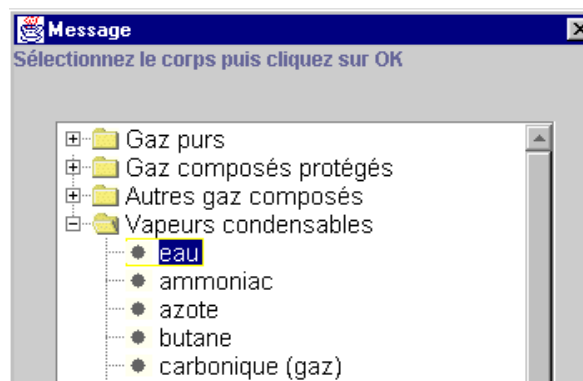


Ensuite, la pression imposée est associée aux points dont la pression doit être fixée à cette valeur. On le fait en sélectionnant la boîte à cocher " pression contrôlée" dans l'écran du point et en choisissant "HP" dans la liste proposée lorsqu'on double-clique dans le champ situé juste en dessous.

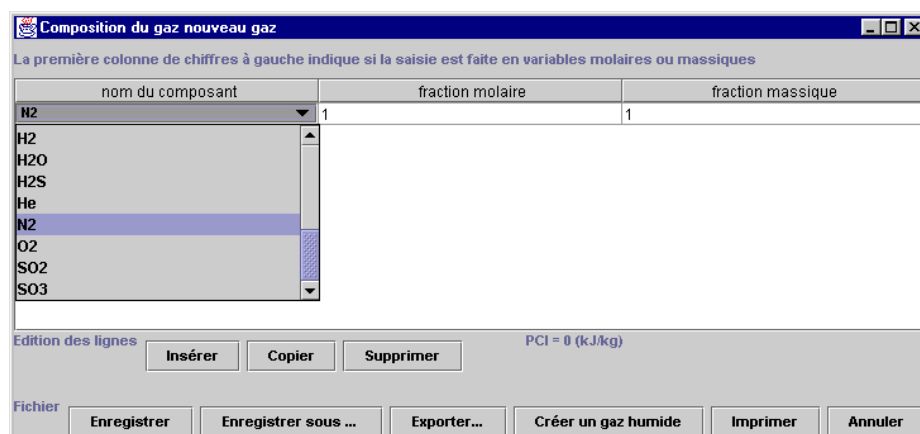
Il est même possible de définir un facteur de correction de la pression, par lequel la valeur de la pression imposée est multipliée pour calculer celle du point. On peut par ce biais prendre automatiquement en compte des pertes de charge. Dans l'exemple ci-dessus, la valeur de la pression imposée est 150 bar ; comme le facteur de correction est 0,98 (perte de charge de 2%), la pression du point est fixée à 147 bar.

Lorsque le corps associé est défini, son nom apparaît dans un champ de la partie supérieure gauche. Pour sélectionner le corps, vous pouvez :

- soit double-cliquer dans le champ correspondant au nom du corps. Un écran proposant la liste des corps existants est alors affiché. Déployez le dossier correspondant au type de corps désiré, puis sélectionnez le corps et cliquez sur "OK" (ici "Vapeurs condensables", et "eau").



- soit entrer directement le nom du corps dans le champ correspondant, puis taper Entrée. ThermoOptim cherche alors dans sa base de données si ce nom existe. Si c'est le cas, il est sélectionné. Sinon, si l'option mélange externe est sélectionnée, il considère que vous voulez créer un mélange externe (reportez-vous au tome 3 pour davantage d'explications). Si elle n'est pas sélectionnée, il crée un nouveau gaz composé et l'initialise avec de l'azote (N2). En cliquant sur le bouton "afficher" situé juste à gauche du nom, vous ouvrez un éditeur de gaz composés, qui vous permet de définir la





composition du gaz, en variables molaires ou massiques, la liste des gaz purs disponibles étant préchargée dans la colonne de gauche.

Des précisions complémentaires sur cet éditeur sont données ci-dessous.

Thermoptim considère que la première colonne de chiffres sur la gauche contient les données à prendre en compte, les autres étant calculées à partir de celles là (on déplace aisément les colonnes en cliquant sur leur intitulé et en le faisant glisser latéralement). Toutefois, si on choisit d'entrer les fractions massiques, il faut que les valeurs des fractions molaires soient mises à 0. Bien évidemment, la somme des fractions molaires ou massique doit être égale à 1.

Si le corps est pur (gaz ou vapeur condensable), l'écran affiché est légèrement différent :

Il fournit les caractéristiques principales du corps, et les limites de validité des modèles utilisés dans Thermoptim

## Systèmes fermés

Pour accéder à l'écran des systèmes fermés, cliquez sur l'onglet central. Un écran légèrement différent vous est proposé.

Le volume massique est ici saisissable, ainsi que l'énergie interne ou l'entropie, et on peut imposer l'une de ces deux grandeurs pour déterminer les autres fonctions d'état, en cochant la boîte "v et u connus" ou "v et s connus".

## Editeur de gaz composés

Le progiciel comporte un éditeur de gaz composés que nous avons rapidement évoqué à propos de la définition d'un nouveau gaz. Dans cette section, nous détaillerons les différentes possibilités offertes par cet éditeur. La manière de procéder pour définir ou modifier un gaz composé étant expliquée un peu plus haut, nous ne la détaillerons pas ici. Nous présenterons en revanche les fonctions disponibles pour enregistrer, supprimer, exporter ou importer des gaz composés dans la base de données du progiciel.

Notez qu'il est possible d'avoir plusieurs éditeurs de gaz composés ouverts simultanément.



Si vous affichez un gaz composé, sa composition apparaît dans l'éditeur.

Composition du gaz gaz\_brûlés\_IGCC

La première colonne de chiffres à gauche indique si la saisie est faite en variables molaires ou massiques

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
O2	0,1152211	0,1264579
N2	0,7540377	0,724501
H2O	0,05062008	0,03127836
CO2	0,07498776	0,1131931
CO	0,002962094	0,00284576
H2	0,0009617037	0,00006649455
Ar	0,00120959	0,00165743

Edition des lignes

Insérer Copier Supprimer

Fichier

Enregistrer Enregistrer sous... Exporter... Créer un gaz humide Annuler

Il est possible de modifier la composition du gaz, en choisissant les noms des constituants parmi la liste des gaz purs qui est proposée, et en entrant soit les fractions molaires, soit les fractions massiques. Une fois défini, le gaz composé peut être :

- enregistré, en cliquant sur "Enregistrer". Le progiciel vérifie que la somme des fractions de la colonne de chiffres de gauche est bien égale à 1, puis enregistre le gaz. Si la somme diffère de 1, rien n'est fait. Seuls les gaz non protégés peuvent être enregistrés.
- renommé, en cliquant sur "Enregistrer sous...". Le test sur la somme des fractions est effectué, et le gaz sauvegardé sous un nouveau nom qu'il vous est demandé de définir.
- exporté, en cliquant sur "Exporter...". La composition du gaz est alors copiée dans un fichier texte dont vous donnez le nom, et que vous pouvez ouvrir avec un logiciel de traitement de texte ou un tableur. Par exemple, le gaz précédent peut être exporté sous le format suivant :

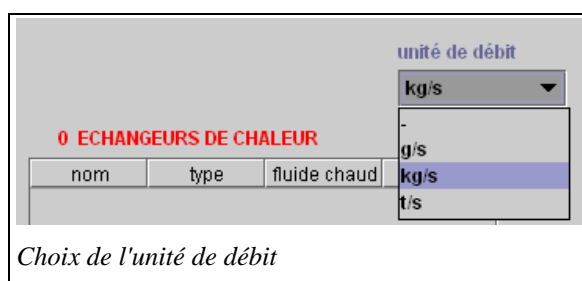
	A	B	C	D
1	DIAGRAMME INTERACTIF THERMOPTIM. Copyright 1998 R. GICQUEL			
2	Fichier de gaz composé	16 février 1999 11 h 31 GMT+01:00		
3				
4	Nom du gaz	gaz_brûlés_IGCC		
5	Nombre de constituants	7		
6	nom du composant	fraction molaire	fraction massique	
7	O2	0,1152211	0,1264579	
8	N2	0,7540377	0,724501	
9	H2O	0,05062008	0,03127836	
10	CO2	0,07498776	0,1131931	
11	CO	0,002962094	0,00284576	
12	H2	0,0009617037	0,00006649455	
13	Ar	0,00120959	0,00165743	
14				

- il est aussi possible de créer, à partir du gaz affiché dans l'éditeur, un gaz humide d'humidité absolue donnée. Pour cela, cliquez sur "Créer un gaz humide". Le progiciel vous demande le nom du gaz et l'humidité absolue que vous désirez, puis construit un nouveau gaz composé, de même gaz sec que le gaz de l'éditeur, et d'humidité absolue égale à celle que vous avez entrée. Ce gaz est ajouté à la liste des gaz composés de la base de données. Vous pouvez y accéder par les écrans de sélection précédents.
- enfin, si vous annulez, l'éditeur de gaz composé est fermé.

## Ecrans des transfos

La définition et le calcul des transfos font appel à une série d'écrans qui diffèrent selon le type de transfo considéré, mais qui partagent cependant certaines caractéristiques :

- En haut à gauche est défini le nom de la transfo
- En haut à droite apparaissent un certain nombre de boîtes à cocher et de champs servant à paramétrer la transfo : système "ouvert" ou "fermé", transfo à "débit imposé", transfo "observée" (ces deux dernières notions sont utilisées pour piloter le recalcul automatique d'un projet. Leur sens est expliqué plus loin dans la section qui traite de ce sujet).
- La partie gauche sert à définir les points amont et point aval. Pour connecter un point, double-cliquez dans le champ correspondant à son nom, et choisissez-le dans la liste proposée. Généralement, ces points sont distincts, mais ils peuvent être les mêmes, par exemple dans le cas des transfos-points (voir plus loin).
- Les boutons "Calculer", "Sauver", "Fermer", "Supprimer" et "liens " sont aussi communs. Le dernier donne accès au navigateur de liens (cf. section sur le recalcul automatique).
- Le type d'énergie peut être modifié en double-cliquant dans le champ correspondant.
- La valeur du débit-masse est par défaut initialisée à 1. Son unité n'est pas nécessairement précisée, afin que l'utilisateur puisse choisir de travailler aussi bien en mg/s qu'en g/s ou kg/s selon le problème étudié, tout en gardant une grande précision d'affichage. Bien évidemment, les résultats des calculs sur les enthalpies ou énergies (resp. sur les puissances) mises en jeu dépendent de l'unité choisie pour le débit, et peuvent ainsi s'exprimer en mJ, en J ou en kJ (resp. en mW, W ou kW). Toutefois, afin de permettre l'affichage des unités de débit et de puissance, la version 1.5 permet de choisir l'unité des débits, à partir d'une liste déroulante située en bas à droite de l'écran du simulateur.
- Enfin, un champ de texte permet de documenter la transfo.
- La partie inférieure droite de la transfo regroupe les paramétrages spécifiques à son type.



## Ecran des compressions et détente

**transfo** : turbine HP    **type** : détente

**type énergie** : utile    ☐ débit imposé    ☐ système fermé    ☐ observée    ☒ système ouvert

**point amont** : 3    **affichage** : m Δh    **débit** : 1    **calculer**

**T (°C)** : 560    **Q** : 0

**P (bar)** : 165

**h (kJ/kg)** : 3 459,61

**titre** : 1

**point aval** : 4a    **affichage** :

**T (°C)** : 318,67    **rend. isentropique** : 0,85

**P (bar)** : 30    **exposant polytropique** : 1,22083

**h (kJ/kg)** : 3 042,14    **rapport de détente (>= 1)** : 5,5    ☒ calculé    ☐ imposé

**titre** : 1

☒ Imposer le rendement et calculer la transfo    ☐ Calculer le rendement, le point aval étant connu

☐ mécaniquement équilibrée avec

**Boutons** : < > Sauver Supprimer Fermer

Ecran d'une détente

Pour les compressions et les détente, les options possibles sont les suivantes :

- les calculs peuvent être effectués soit en système ouvert, auquel cas ils portent sur la pression et l'enthalpie, soit en système fermé, auquel cas c'est sur le volume et l'énergie interne.
- le rapport de compression  $p$  peut être imposé, auquel cas la pression (ou le volume) du point aval est déterminée à partir de celle (de celui) du point amont et de la valeur de  $p$  choisie, ou calculé, auquel cas la valeur de  $p$  est évaluée à partir des pressions ou des volumes des points amont et aval, considérés comme des données. Que ce soit pour une compression ou pour une détente,  $p$  est supérieur ou égal à l'unité.
- la transformation peut être adiabatique ou non.

Lorsqu'elle est **adiabatique** (la boîte "adiabatique" est cochée), elle est caractérisée par un rendement isentropique ou polytropique, compris entre 0 et 1. Dans ce cas l'exposant polytropique  $k$  apparaissant dans la loi  $p v^k = \text{Cste}$  est calculé par Thermoptim.

Lorsqu'elle est **non adiabatique** (la boîte "non adiabatique" est cochée), la transfo est polytropique, et caractérisée par son exposant polytropique  $k$  et son rendement polytropique (pour une compression, il s'agit du rapport du travail réversible au travail réel, et pour une détente du rapport inverse). Dans ce cas la chaleur  $Q$  échangée avec l'extérieur est calculée par Thermoptim et affichée dans le champ situé sous le travail de compression ou de détente  $\Delta H$  ou  $\Delta U$ .

On prendra garde à ne pas confondre le rendement polytropique  $\eta_p$  avec l'exposant polytropique  $k$ . Pour

une détente polytropique adiabatique en système ouvert, l'équation qui les relie est :  $\frac{k-1}{k} = \eta_p \frac{\gamma-1}{\gamma}$ .

- en choisissant l'option "mécaniquement équilibrée avec", il est possible, pour les seules transfos "détente", de déterminer la pression aval de la transfo telle que la valeur absolue du travail de détente mis en jeu soit égale à celle de la compression choisie. Pour choisir la compression, double-cliquez dans le champ situé sur la droite de la boîte à cocher, et choisissez dans la liste des compressions proposées. Le nom de la compression sélectionnée s'affiche.

<input checked="" type="checkbox"/> <b>mécaniquement équilibrée avec</b>	<div>compresseur HP</div>
--	---------------------------

Deux modes de calcul complémentaires peuvent être choisis, selon la boîte qui est cochée en bas à droite de l'écran :

- "Imposer le rendement et calculer la transfo" provoque la recherche de l'état du point aval, à partir de celui du point amont et des caractéristiques de la compression ou de la détente. Si la transformation est non adiabatique, les paramètres d'entrée sont l'exposant polytropique  $k$  et le rendement polytropique  $\eta_p$ . La chaleur échangée  $Q$ , le travail mis en jeu  $\Delta H$  et l'état du point aval sont alors calculés.
- "Calculer le rendement, le point aval étant connu" permet d'identifier la valeur du rendement de la compression ou de la détente conduisant à l'état aval. Si la transformation est non adiabatique, les paramètres d'entrée sont l'exposant polytropique  $k$  et la chaleur échangée  $Q$ . Le travail mis en jeu  $\Delta H$  et le rendement polytropique  $\eta_p$  sont alors calculés.

## Ecran de transfo échange

Son écran est semblable au précédent, avec un peu moins d'options.

Une transfo "échange" sert à calculer l'échauffement ou le refroidissement d'un fluide entre deux états représentés par les points amont et aval. Deux transfos "échange" peuvent être appariées dans un échangeur (voir plus loin).

Dans la partie centrale droite, apparaissent :

- un champ qui permet de définir le pincement minimum accepté au niveau de ce fluide. Ce paramètre peut être utilisé lors du dimensionnement des échangeurs.
- Une boîte à cocher "fluide méthode pinct." qui sert à indiquer que la transfo doit être prise en compte lors des calculs d'optimisation par intégration thermique (cf. tome 1 du manuel de référence).

Deux modes de calcul complémentaires peuvent être choisis, selon la boîte qui est cochée en bas à droite de l'écran :

- "Calculer le Delta H, le point aval étant connu" évalue l'enthalpie mise en jeu dans la transfo.
- "Imposer le Delta H et modifier le point aval" recalcule la température du point aval pour faire en sorte que l'enthalpie mise en jeu dans la transfo soit égale à la valeur entrée dans le champ Delta H.

## Prise en compte des débits volumiques et molaires

Depuis la version 1.5, il est possible d'afficher ou de masquer les **débits volumiques et molaires**. Pour les afficher, sélectionnez l'option "Afficher les débits volumiques et molaires" dans l'écran des paramètres globaux (menu Aide).

En les affichant, vous avez la possibilité d'entrer les valeurs des débits imposés en valeurs volumiques et molaires dans toutes les transfos-points ou transfos échange, ce qui peut être intéressant dans un certain nombre de cas.

Afin de permettre l'entrée de débits volumiques et molaire, l'écran des transfos "échange" (et des transfos-points) a été modifié.

transfo: rechauff type: échange

type énergie: autre ☐ débit imposé

point amont: fumees 2  débit (kg/s): 3,57473101 ☐ système fermé ☐ observée

☒ système ouvert

m ΔH (kW): -840,47

T (°C)	310,35
P (bar)	1
h (kJ/kg)	303,88
titre	1

☐ débit volumique imposé débit volumique d'entrée: 6,0763645688

☐ débit molaire imposé débit molaire: 0,12525353901

pincement minimum: 0

☒ fluide méthode pinct.

point aval

Ecran d'une transfo échange avec débits volumique et molaire et unités de débit et de puissance

Deux champs et deux options, dont le sens est immédiat, ont été rajoutés. Ils permettent d'entrer soit le débit volumique, soit le débit molaire (par défaut, c'est le débit massique qui est pris en compte). Dans tous les cas, les deux débits non spécifiés sont calculés en fonction du troisième.

Afin d'éviter tout conflit entre le mécanisme de gestion de la propagation automatique du débit, il n'est possible de choisir l'option débit volumique ou débit molaire imposé que dans des transfos à débit imposé. Si vous sélectionnez une de ces deux options et que le débit de la transfo n'est pas encore imposé, un message vous avertit du problème, et vous demande de vérifier que l'option débit imposé est cohérente avec votre modèle, puis le débit est imposé, sans possibilité pour vous de changer ce choix, sauf si vous désélectionnez les options débit volumique ou débit molaire imposé.

Il est enfin possible si on le désire de **rendre isobares les transfos "échange"**. Il faut pour cela commencer par sélectionner l'option "Transfos échange isobares" dans l'écran des paramètres globaux, alors que par défaut elle ne l'est pas. Lorsqu'elle est sélectionnée, l'écran des transfos "échange" fait apparaître une option isobare, cochée par défaut lors d'une création de transfo, et sauvegardée conformément au choix de l'utilisateur. Lorsque cette option est visible et cochée, la pression du point amont est automatiquement propagée au point aval. Sinon rien n'est fait.

☐ débit volumique imposé

☐ débit molaire imposé

☒ isobare

## Ecran de transfo laminage

L'écran des transfos laminage est analogue à celui des transfos échange. La seule différence provient de ce que, le laminage étant isenthalpique, le calcul de la transformation est très simple : il s'agit de déterminer la température et l'entropie du point aval.

transfo  type

type énergie  ☐ débit imposé

point amont   débit  ☐ système fermé ☐ observée

☐ système ouvert

T (°C)

P (bar)

h (kJ/kg)

titre


point aval

T (°C)

P (bar)

h (kJ/kg)

titre

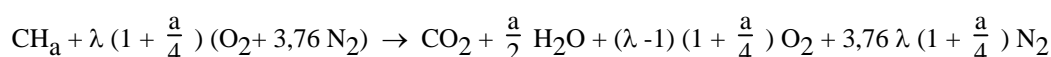


## Ecran des combustions

L'écran des combustions est le plus complexe, compte tenu du nombre d'options existantes.

## Déclaration du combustible

En excès d'air, la combustion non stœchiométrique complète du combustible  $\text{CH}_a$  avec de l'air atmosphérique s'écrit en fonction du facteur d'air  $\lambda$  :



THERMOPTIM utilise une équation de ce type généralisée, où le comburant peut être n'importe quel gaz composé comprenant de l'oxygène, et le combustible peut être soit donné sous forme  $\text{CH}_a$ , soit déclaré comme l'un des corps de la base de données (bouton "dans la base").

La définition du combustible se fait dans la partie supérieure droite de l'écran :

Le combustible peut être soit donné sous forme  $\text{CH}_a$ , soit choisi parmi les gaz définis dans la base de données. Dans ce cas, le combustible est un gaz pur ou composé contenant l'un quelconque des réactifs suivants :  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m\text{S}_p\text{O}_q$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $p$  et  $q$  étant des décimaux inférieurs à 100. Les gaz inertes pris en compte sont :  $\text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$ . On notera que l'on suppose donc que le combustible est vaporisé, ce qui peut entraîner une très légère erreur s'il est à l'état liquide.

Le combustible et le comburant peuvent l'un comme l'autre être composés de réactifs, d'oxygène et d'inertes, même s'il est habituel que le combustible ne comporte pas d'oxygène, ni le comburant de

combustible. Il est ainsi possible de calculer des combustions complexes, comme par exemple celle d'un mélange carburé réalisé avant introduction dans la chambre de combustion.

Les produits de la réaction sont :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ , ainsi que  $\text{CO}$  et  $\text{H}_2$  s'il y a de la dissociation, et du combustible si la réaction n'est pas complète.

Le progiciel analyse les formules chimiques des composants du combustible et du comburant, et en déduit la réaction qui prend place. Les calculs peuvent alors être exécutés. Les formules chimiques sont obtenues en décodant les noms des corps.

Lorsque le combustible est l'un des corps de la base, le nom qui apparaît à l'écran (ici "combustible") doit être celui d'une transfo (par exemple une transfo-point) permettant de préciser son débit. Cette transfo est elle même reliée à un point permettant de préciser le nom et l'état du corps.

L'exemple ci-dessous, extrait de l'exemple de la notice de prise en mains "Turbine à gaz", et relatif au gaz naturel en provenance du terminal méthanier de Gaz de France à Montoir de Bretagne illustre la manière de déclarer un combustible dont la composition est :

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
$\text{CH}_4$ ` méthane	0,871	0,758966
$\text{C}_2\text{H}_6$ ` éthane	0,088	0,1437279
$\text{C}_3\text{H}_8$ ` propane	0,025	0,05987759
$\text{C}_4\text{H}_{10}$ ` n-butane	0,008	0,02525591
$\text{N}_2$	0,008	0,01217253

Chaque composant, à l'exception de l'azote, est un combustible, dont la formule chimique apparaît en première partie du nom, éventuellement suivie par un commentaire, séparé de la formule par le caractère "`". Sur la base de l'analyse la formule chimique de chaque composant et de sa fraction molaire, le progiciel caractérise complètement le combustible.

Ce corps est associé à un point, permettant de préciser sa température, utilisée dans le calcul de la température de fin de combustion. Le débit de combustible est pris en compte par l'intermédiaire d'une transfo-point, dont le nom doit apparaître dans le champ "combustible" de la fiche de la transfo combustion.

Pour connaître le débit de comburant, le progiciel recherche s'il existe une transfo dont le point aval est le point amont de la transfo combustion, ou à défaut si cette dernière est connectée à un nœud. Des messages informent l'utilisateur en cas de problème, soit parce qu'il y a plusieurs transfos qui aboutissent au point amont, soit parce qu'aucune transfo ni aucun nœud ne lui est connecté.

Lorsque le combustible est donné sous forme  $\text{CH}_a$ , il faut entrer d'une part la valeur du paramètre  $a$ , et d'autre part son énergie de formation standard  $h_{f0}$  (ramenée à la formulation  $\text{CH}_a$ ). Il est alors impossible d'en spécifier le débit.

## Systèmes ouverts et systèmes fermés

Il faut ensuite préciser si la combustion a lieu en système ouvert ou en système fermé.

Dans le premier cas, elle sera supposée à pression imposée, soit "par l'utilisateur", ce qui signifie que la pression du point aval sera considérée comme la bonne valeur, soit "par le point amont", ce qui imposera une combustion à pression constante égale à celle du comburant en amont.

Pour les systèmes fermés, on peut choisir entre trois possibilités : une combustion à volume imposé, à pression imposée, ou à température constante. Pour chacun des deux premiers cas, deux modes d'imposition du volume ou de la pression existent aussi : "par l'utilisateur" ou "par le point amont". Dans le troisième cas, la température de combustion est constante et égale à celle du comburant en amont.

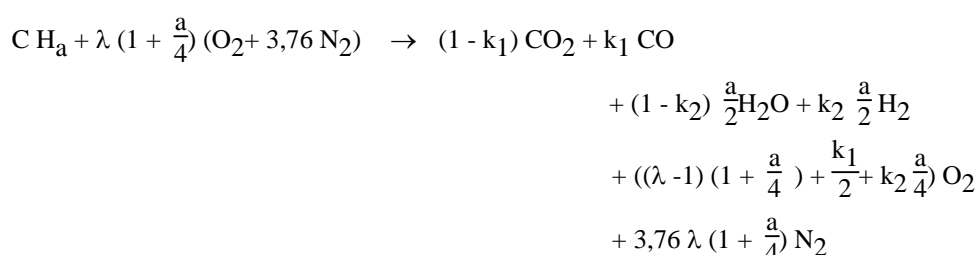


Dans les deux derniers cas (pression imposée et température constante), le volume varie pendant que la combustion se déroule, de telle sorte qu'une partie de l'énergie libérée se transforme directement en puissance mécanique du fait de l'expansion des gaz.

Le premier principe indique en effet que la variation d'énergie interne (du) est la somme algébrique de la chaleur ( $dQ \eta_{\text{comb}} \eta_{\text{th}}$ ) et du travail ( $dW = -pdv$ ) reçus par le système. THERMOPTIM calcule la valeur de W et l'affiche juste en dessous de la valeur de l'énergie libérée dans la combustion. Cette valeur est ensuite prise en compte comme énergie utile lors du calcul du bilan du cycle. On se reportera, pour plus de précisions à ce sujet, à l'exemple n° 4 sur les moteurs diesel et à essence du Guide d'Utilisation de la version 4D de Thermoptim.

## Paramétrage de la combustion

- la dissociation du  $\text{CO}_2$  en CO peut être prise en compte, en cochant le bouton approprié. Dans le cas de l'air atmosphérique la réaction de combustion devient alors :



L'équilibre entre les espèces donnant des imbrûlés est régi par l'équation :



Cet équilibre est indépendant de la pression, et n'est fonction que de la température. Avec l'hypothèse que la cinétique de combustion est suffisamment rapide pour que l'équilibre soit atteint, la loi d'action de masse permet d'écrire :

$$K_p = \frac{[\text{CO}] [\text{H}_2\text{O}]}{[\text{CO}_2] [\text{H}_2]} = \frac{k_1 (1 - k_2)}{(1 - k_1) k_2} = f(T_f)$$

THERMOPTIM utilise une approche de ce type, mais généralisée.

Si l'on choisit de tenir compte de la dissociation, un cadre est affiché dans lequel doivent être entrés le taux de dissociation  $k_1$  et la température de figeage  $T_f$  qui est utilisée pour le calcul de la constante  $K_p$ .

- pour tenir compte de pertes thermiques éventuelles de la chambre de combustion, non nécessairement adiabatique, on introduit un rendement thermique  $\eta_{\text{th}}$ , initialisé à 1 par défaut (à droite au centre de l'écran). Ce rendement diffère du rendement de combustion  $\eta_{\text{comb}}$ , calculé par le progiciel en fonction du taux de dissociation et de la température de figeage.

En bas à gauche de l'écran, apparaissent deux champs saisissables, l'un correspondant au facteur d'air  $\lambda$ , et l'autre à la température de fin de combustion  $T_{fc}$ . Il est possible d'imposer l'une ou l'autre de ces valeurs, et de calculer l'autre, ou encore de les calculer toutes deux à partir des débits de combustible et de comburant. Le facteur d'air peut être supérieur ou inférieur à 1. S'il est inférieur à 1, le progiciel considère qu'il s'agit d'une combustion en défaut d'air conduisant à la formation de monoxyde de carbone CO. Si le facteur d'air est trop faible pour que tout le carbone disponible puisse être oxydé en CO, un message avertit l'utilisateur.

## Options de calcul

- le bouton "Calculer T" détermine  $T_{fc}$ , température de fin de combustion, à partir de la valeur de  $\lambda$  imposée. Si le combustible est inclus dans la base de données, le débit masse de la transfo "combustible" est ajusté pour que le rapport entre le débit volumique de comburant et le débit volumique de combustible soit égal au facteur d'air.

Le débit masse de la transfo en cours d'évaluation (la combustion), est quant à lui égal à la somme des débits de combustible et de comburant, ce qui signifie que la transfo combustion se comporte, sur le plan hydraulique, comme un mélangeur de débits.

- le bouton "Calculer lambda" détermine le facteur d'air  $\lambda$  ( $\geq 1$ ), à partir de la valeur de  $T_{fc}$  imposée. Le traitement des débits est analogue à celui du bouton précédent. Si l'enthalpie libérée par la combustion stœchiométrique ne permet pas d'atteindre la température désirée, un message avertit l'utilisateur.

- le bouton "Imposer le débit de combustible" détermine  $\lambda$  et  $T_{fc}$  à partir des caractéristiques du combustible, qui doit être inclus dans la base de données, et du comburant. Le débit masse de la transfo en cours d'évaluation (la combustion), devient égal à la somme des débits de combustible et de comburant. Si le combustible est du type CHa, rien n'est fait.

Quand la combustion est calculée, les valeurs du rendement de combustion et du PCI du combustible sont déterminées.

## Cas particulier d'un mélange combustible seul

Comme indiqué plus haut, il est possible de réaliser des combustions d'un mélange combustible préparé avant introduction dans la chambre de combustion. Dans ce cas, il n'y a plus besoin de spécifier un combustible en complément du comburant. Pour que le progiciel sache que l'on est dans ce cas de figure, il faut choisir l'option "prémélangé", ou, par compatibilité avec les versions antérieures, " type CHa" en mettant à zéro les valeurs de  $a$  et de  $hf_0$ .

Etant donné qu'il est clair que, dans ce cas, la notion de facteur d'air  $\lambda$  perd son sens, ce paramètre est réutilisé pour représenter la fraction brûlée  $\xi$  des réactifs. Si  $\xi < 1$ , on suppose que seule une fraction  $\xi$  du mélange a réagi, et que  $(1 - \xi)$  n'a pas réagi. Les gaz de combustion sont alors considérés comme un mélange de deux gaz : d'une part les produits de la réaction, inertes compris, et d'autre part la fraction du mélange initial qui n'a pas réagi. De cette manière, on peut partir d'un mélange donné, et fractionner sa combustion en plusieurs phases, par exemple à volume constant, puis pression constante, puis température constante (cf. exemple n°4 sur les moteurs à essence du Guide d'Utilisation de la version 4D).

## Ecrans des nœuds

L'écran des nœuds comporte trois parties:

- en haut, sont indiqués le nom du projet, le nom du nœud et son type, et sa branche principale. Pour la connecter, double-cliquez dans le champ correspondant à son nom, et choisissez dans la liste des transfos disponibles
- en bas apparaissent les branches secondaires
- à droite sont placés les boutons permettant de construire et calculer le nœud

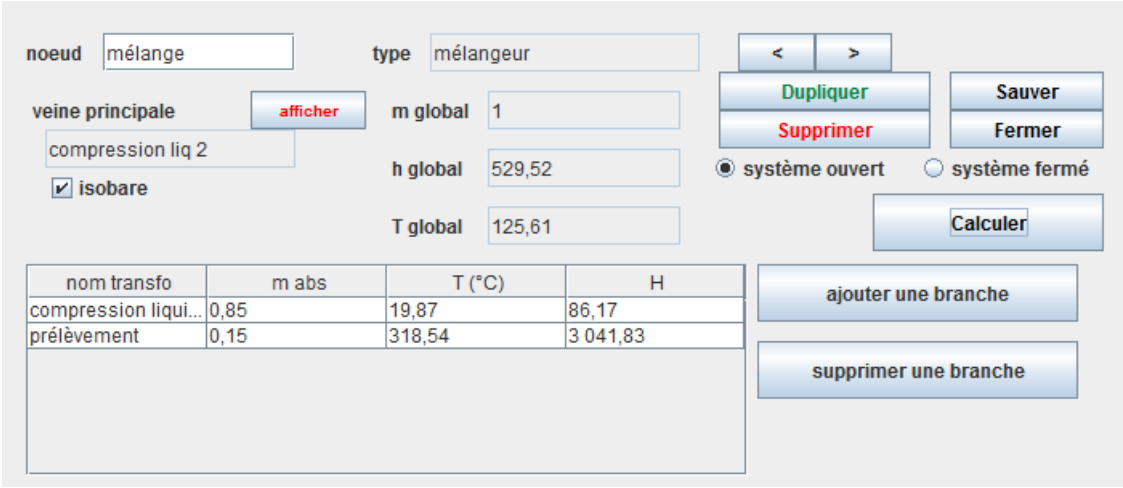
### Mélangeur

Dans un mélangeur, on peut ajouter ou supprimer des branches en cliquant sur les boutons correspondants. Le mélangeur peut être en système ouvert, ce qui est généralement le cas, ou bien en système fermé, ce qui correspond à un paramétrage particulier.

Lorsque le mélangeur est construit, le bouton "Calculer" effectue en système ouvert les bilans massique et enthalpique des branches et calcule la température de sortie. Le point d'entrée de la transfo aval est recalculé.

Lorsqu'un corps existe dans ThermoOptim sous forme à la fois de vapeur et de gaz pur, comme par exemple l'eau, le mélangeur peut être utilisé pour mélanger cette vapeur avec un gaz composé. Une correction est alors effectuée pour tenir compte de l'enthalpie de vaporisation de la vapeur. Il est ainsi possible par exemple de modifier l'humidité d'un gaz. Toutefois cette manière de faire n'est pas très précise et il est beaucoup plus précis d'utiliser les transfos et nœuds, notamment externes, qui prennent en compte les équations des mélanges humides.

Si l'option « isobare » est choisie et si le point aval est à pression imposée, cette pression est propagée aux points aval de toutes les branches.



nom transfo	m abs	T (°C)	H
compression liqui...	0,85	19,87	86,17
prélèvement	0,15	318,54	3 041,83

Le paramétrage d'un mélangeur en système fermé est très spécifique. Il est alors utilisé pour modéliser l'injection supposée instantanée d'un fluide dans une enceinte contenant un autre fluide, par exemple de l'eau injectée dans les gaz présents dans un cylindre de moteur alternatif. Dans ce cas, le modèle détermine le volume du composant à partir du débit-masse qui le traverse et du volume massique du fluide déjà présent. L'option isobare est désactivée et n'apparaît plus à l'écran.

ThermoOptim fait l'hypothèse que le fluide déjà présent correspond à celui dont le débit est le plus important parmi l'ensemble des branches amont.

Le bouton "Calculer" effectue en système fermé les bilans massique et d'énergie interne des branches et calcule la température de sortie, en considérant que le volume total reste inchangé. Le point d'entrée de la transfo aval est recalculé.

## Diviseur

L'écran d'un diviseur est doté d'un bouton supplémentaire intitulé "paramétrage du débit". Il sert à définir des facteurs de débit qui sont utilisés lors du calcul de la répartition du débit entre les branches. L'idée de base est la suivante : étant donné qu'un diviseur doit assurer la conservation du débit, il n'est pas possible d'imposer les valeurs des débits des branches lorsque celui de la veine principale varie. On demande donc à l'utilisateur de définir un facteur de débit qui représente la part du débit total qui passe par la branche considérée.

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
resurchauffe	0,8	4	318,67	3 042,14
prélèvement	0,2	1	318,67	3 042,14

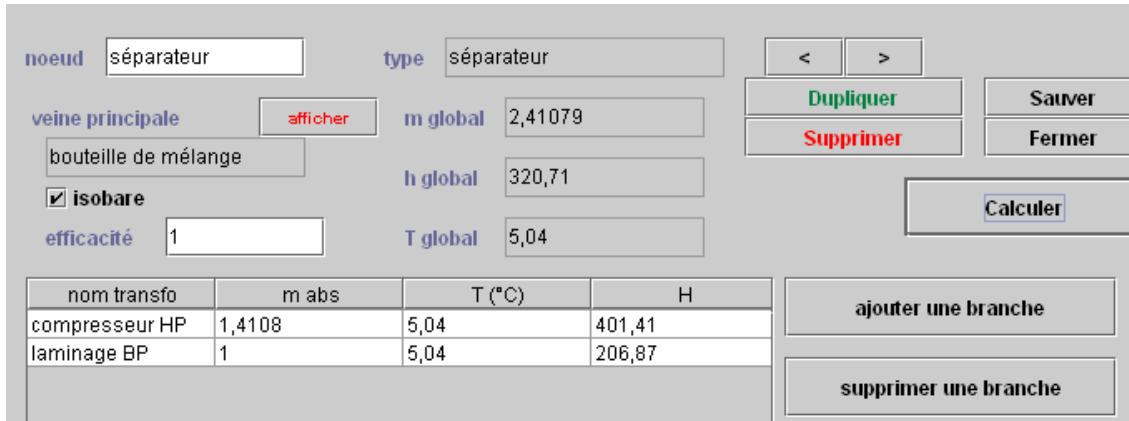
Thermoptim somme l'ensemble des facteurs de débit des différentes branches, puis répartit le débit total proportionnellement à ceux-ci. Dans l'exemple ci-dessus, les facteurs de débit sont égaux à 1 et 4, conduisant à une répartition du débit unitaire égale à 0,2 et 0,8.

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
resurchauffe	0,8	0,8	318,67	3 042,14
prélèvement	0,2	0,2	318,67	3 042,14

Une exception existe cependant : il est possible d'imposer le débit dans une transfo en sortie d'un diviseur, à condition que ce diviseur n'ait que deux branches : celle à débit imposé et une autre. Dans ce cas, le débit de la deuxième transfo est égal au débit dans la veine principale moins celui de la branche où il est imposé, et les facteurs de débit des deux branches sont recalculés pour correspondre à cette répartition. Dans ce cas, s'affiche en rouge, sous le nom de la veine principale, le message "débit imposé", comme dans l'exemple ci-dessus.

## Séparateur (ou sécheur)

Comme son nom l'indique, il a pour rôle de séparer un fluide en équilibre liquide-vapeur, caractérisé par sa température, sa pression et son titre, en divisant son débit en deux parties, l'une correspondant au liquide, et l'autre à la vapeur. Il s'agit donc en quelque sorte d'un diviseur d'un type particulier...



nom transfo	m abs	T (°C)	H
compresseur HP	1,4108	5,04	401,41
laminage BP	1	5,04	206,87

Il est possible d'imposer une efficacité de séparateur qui doit être comprise entre 0 et 1. Elle est définie comme le rapport du débit masse réel de liquide au maximum théoriquement possible, et représente donc une efficacité de séchage. Si sa valeur est inférieure à 1, le titre de la vapeur sortant du séparateur est inférieur à 1.

Pour créer un séparateur, sélectionnez comme veine principale la transfo qui représente le fluide diphasique. Le point aval de cette transfo doit être diphasique, c'est à dire que son titre doit être strictement compris entre 0 et 1. Si ce n'est pas le cas, le séparateur ne peut pas être calculé.

Ajoutez alors les deux branches, sachant que le point amont l'une d'entre elles doit être à l'état liquide (titre égal à 0) pour que Thermoptim puisse la reconnaître comme étant la sortie liquide

Dans l'exemple ci-dessus, le fluide diphasique s'appelle "séparateur". Le débit global de 2,48 kg/s est séparé en 1,0 kg/s de liquide et 1,48 kg/s de vapeur sèche.

## Ecran des échangeurs

**nom**  **type**

**fluide chaud**

**fluide froid**

<b>Tce (°C)</b> <input type="text" value="178,85304985"/> <input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé	<b>Tfe (°C)</b> <input type="text" value="15"/> <input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé
<b>Tcs (°C)</b> <input type="text" value="47,77947229"/> <input type="radio"/> imposé <input checked="" type="radio"/> calculé	<b>Tfs (°C)</b> <input type="text" value="28,23806762"/> <input type="radio"/> imposé <input checked="" type="radio"/> calculé
<b>mc</b> <input type="text" value="1"/> <input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé	<b>mf</b> <input type="text" value="10"/> <input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé
<b>Cpc</b> <input type="text" value="1,01213869"/>	<b>Cpf</b> <input type="text" value="1,00214447"/>
<b>m ΔHc</b> <input type="text" value="-132,66463973"/>	<b>m ΔHf</b> <input type="text" value="132,66456295"/>

☐ non contraint

☐ pincement minimum **DTmin**

☒ efficacité imposée **epsilon**

**UA**   
**R**   
**NUT**   
**DTML**

☒ dimensionnement ☐ non nominal

Un échangeur réalisant le couplage thermique entre deux fluides, l'un qui se refroidit, l'autre qui se réchauffe, la connexion se fait en deux temps, l'un pour la partie chaude, et l'autre pour la partie froide.

L'écran comporte les informations relatives au fluide chaud dans sa partie centrale gauche, tandis que celles relatives au fluide froid sont à droite. Pour connecter un fluide, double-cliquez dans le champ de son nom, et choisissez-le dans la liste proposée.

Outre les valeurs des températures, débits, chaleurs massiques et enthalpies mis en jeu, apparaissent des contraintes sur les températures et les débits qui servent à gérer le calcul des échangeurs, en permettant de distinguer, parmi les variables du problème, celles qui sont imposées et celles qui doivent être calculées.

Les types possibles d'échangeurs sont les suivants : contre-courant, co-courant, courants croisés, mélangés ou non, et (p-n).

Dans la partie inférieure gauche, apparaissent trois boutons permettant éventuellement de spécifier l'absence ou la présence de contraintes implicites sur les températures (voir plus loin).

Dans la partie inférieure droite sont placées les boîtes à cocher permettant de définir le mode de calcul ("dimensionnement" ou "non nominal").

## Dimensionnement des échangeurs simples

Un échangeur met en relation deux transfos de type "échange". L'une d'entre elles, le fluide chaud, correspond à un corps qui se refroidit, tandis que l'autre, le fluide froid, se réchauffe. Une fois le couple de transfos apparié, le problème du dimensionnement se pose comme suit : il faut d'une part assurer la conservation de l'enthalpie dans l'échangeur, et d'autre part respecter certaines contraintes sur les températures.

Etant donné qu'il y a quatre températures (deux pour chaque fluide) et deux débits, le problème comporte cinq degrés de liberté une fois la conservation de l'enthalpie assurée. On peut par ailleurs montrer que l'un des deux débits au moins doit être spécifié, faute de quoi le problème est indéterminé.

Pour les températures, on peut imposer des contraintes explicites : on fixe par exemple les températures d'entrée des fluides, ou des contraintes implicites : on impose une valeur pour l'efficacité de l'échangeur, ou encore que le pincement soit égal à une valeur minimale. Pour imposer une valeur de l'efficacité, il faut entrer cette valeur en face de  $\varepsilon$ , puis sélectionner "efficacité imposée".

Pour imposer un "pincement minimal", il suffit de sélectionner ce mode de calcul ; la valeur du pincement minimal est indiquée dans le champ situé à droite de l'option "pincement minimal". Ce champ est initialisé, lors de la création de l'échangeur, ou si on double-clique dans ce champ, à la demi-somme des valeurs de pincement minimum définies dans chacune des transfos chaude et froide. L'utilisateur a donc le choix entre conserver cette valeur ou en entrer une autre. Lors du calcul, c'est la valeur lue dans ce nouveau champ qui est prise en compte.

Pour que le problème soit soluble, il faut donc fixer un total de cinq contraintes, dont l'une de débit imposé. Si l'une d'entre elles est implicite (efficacité ou pincement imposé), il doit y en avoir quatre explicites (3 températures et 1 débit imposés, ou 2 températures et 2 débits imposés), sinon il en faut cinq (un seul débit ou une seule température de libre).

Ces conditions sont nécessaires, mais non suffisantes. Aussi le progiciel analyse-t-il l'ensemble des contraintes proposées. S'il y a une solution, elle est trouvée. Sinon, un message avertit l'utilisateur que le calcul est impossible.

On notera que le dimensionnement des échangeurs se fait toujours avec l'hypothèse implicite que les propriétés thermophysiques du fluide restent constantes tout au long de l'échangeur, alors que cette hypothèse n'est pas faite lors du calcul des transfos. Il en résulte que, lorsque l'on recalcule une température sur la base des équations des échangeurs, de légers écarts peuvent exister entre la valeur du module d'échange et celle de la transfo correspondante. Si l'on veut une très bonne précision, on pourra itérer en faisant plusieurs dimensionnements. Généralement deux ou trois suffisent.

Il faut aussi noter que, si l'un des deux débits n'est pas imposé au niveau de l'échangeur, il est recalculé, même si la transfo correspondante est "à débit imposé". Le calcul de l'échangeur passe en effet outre à cette consigne. L'intérêt de cocher la boîte "débit imposé" est d'éviter, notamment en mode "dimensionnement", que ce débit soit involontairement mis à jour par la transfo amont.

Lors de la mise à jour du débit d'un échangeur, la nouvelle valeur est propagée en amont tant qu'il n'y a pas de conflit possible avec les autres modes de calcul du débit, c'est-à-dire tant qu'on ne rencontre ni une transfo combustion, ni un nœud. Si un de ces éléments est rencontré, la propagation s'arrête. En pareil cas, la cohérence du modèle doit être vérifiée.

## Liquide générique

Rappelons qu'un corps particulier a été introduit dans la base : il s'appelle "liquide générique". Sa particularité est d'être un liquide à la pression atmosphérique, et d'avoir une chaleur massique égale à 1 kJ/kg/K. Il peut être utilisé pour simuler un liquide absent de la base que l'on veut utiliser dans un échangeur (sauf cas particulier, nous recommandons quand même de créer un corps externe, ce qui se fait sans difficulté majeure en suivant les explications données dans le tome 3).

L'utilisation de ce liquide générique est justifié par le fait que, dans les équations énergétiques des échangeurs, le débit masse  $m$  et la chaleur spécifique  $C_p$  apparaissent toujours par leur produit  $mC_p$ , quelquefois appelé débit calorifique. Si donc  $C_p$  est égal à 1, la valeur qui apparaît dans le champ de débit de l'écran de l'échangeur est celle du produit  $mC_p$ .

Ainsi, plutôt que d'entrer dans la base un grand nombre de liquides différents, il devient possible de n'en utiliser qu'un : le liquide générique. Supposons que vous désiriez étudier un liquide ce chaleur massique  $C_{p\text{liq}}$ . Si le débit de liquide  $m_{\text{liq}}$  est imposé, entrez dans le champ du débit la valeur ( $m_{\text{liq}} \cdot C_{p\text{liq}}$ ). Imposez les autres contraintes, et cliquez sur le bouton "Calculer".

Si le débit de liquide doit être calculé, imposez les autres contraintes et cliquez sur le bouton "Calculer". La valeur du débit de liquide est égale à la valeur déterminée par THERMOPTIM dans le champ de débit, divisée par  $C_{p\text{liq}}$ .

## Résolution des échangeurs en régime non nominal

Le mode de calcul "non nominal" permet de calculer, par la méthode du NUT, l'échangeur en régime non nominal si au moins deux températures sont imposées.

L'ensemble des procédures de régime non nominal s'applique à l'étude d'un échangeur déjà défini, dont on cherche à comprendre comment il se comporte en dehors des conditions retenues pour son dimensionnement. On notera dans ce qui suit que, pour utiliser la méthode du NUT, on fait aussi l'hypothèse que les propriétés thermophysiques des fluides restent invariables dans l'échangeur.

La procédure effectue une mise à jour des liens amont de l'échangeur à partir des transfos, puis effectue le calcul des températures aval et équilibre le bilan sur le plan enthalpique. Les points et les transfos associés au module sont mis à jour en fonction des résultats.

Pour le moment, aucune correction n'est apportée sur les coefficients d'échange lorsque les débits ne sont pas nominaux.



## Gaz humides

Dans ce qui suit, nous appelons gaz humides des corps composés comprenant un ou plusieurs gaz purs et de l'eau susceptible de se condenser. Dans ces conditions, la composition du mélange peut évoluer au cours de transformations aussi simples qu'un refroidissement. Les transfo définies par ailleurs ne permettent alors pas toujours de déterminer les propriétés thermodynamiques du gaz humide.

Le cas que l'on rencontre le plus souvent en pratique est bien évidemment celui de l'air humide à la pression atmosphérique, et THERMOPTIM permet de résoudre de nombreux problèmes de climatisation. Mais, plus généralement, il permet d'étudier des gaz humides de composition quelconque.

Une hypothèse reste cependant toujours faite : l'eau gazeuse est supposée rester assimilable à un gaz idéal, ce qui signifie que sa pression partielle reste inférieure à quelques bars, ce qui est presque toujours le cas.

Pour calculer les propriétés thermodynamiques (essentiellement l'enthalpie) d'un gaz humide, il est pratique d'appliquer la Loi de Dalton en considérant qu'il s'agit d'un mélange de deux constituants : d'une part le gaz sec (lui-même pouvant être un mélange de gaz), et d'autre part l'eau sous forme vapeur.

Dans THERMOPTIM l'état de référence, ou zéro, pour le calcul des enthalpies des gaz est pris à la valeur standard de 298 K. Or, les ingénieurs climaticiens ont coutume de choisir comme état de référence 0 °C pour l'air sec, et 0 °C, liquide saturé pour l'eau. Il en résulte un décalage entre les enthalpies des gaz humides telles que les calcule THERMOPTIM et celles qui sont représentées sur les diagrammes psychrométriques usuels. Cet écart varie en fonction de l'humidité spécifique.

Un autre point doit être souligné : dans THERMOPTIM, les propriétés thermodynamiques des points sont généralement exprimées en unités massiques, sous forme intensive.

Or, dans la plupart des transformations humides, la masse totale de la phase gazeuse ne se conserve pas, du fait de la variation de la teneur en eau du mélange. Le seul invariant dans ces conditions est la masse de gaz sec, à laquelle il est d'usage de rapporter les propriétés des points. Le qualificatif de "spécifique" signifie donc, en matière de gaz humides, que les grandeurs exprimées sont ramenées à 1 kg de gaz sec.

En définitive, les enthalpies qui seront considérées dans la suite peuvent être rapportées à trois références différentes :

- enthalpie massique du gaz sec  $h_{gs}$  ( $h_{gs} = 0$  à  $T = 298$  K)
- enthalpie massique du gaz humide  $h_{gh}$  ( $h_{gh} = 0$  à  $T = 298$  K)
- enthalpie spécifique du gaz humide  $q'$  ( $q' = 0$  à  $T = 0$  °C, eau liquide)

Avec les notations habituelles,  $w$  étant l'humidité spécifique du gaz, ces trois enthalpies sont reliées par les équations suivantes :

$$q'(t, w) = h_{gs}(t) - h_{gs}(0 \text{ °C}) + w (h_{H_2O}(t) - h_{H_2O}(0 \text{ °C})) + w L_{0eau}$$

$$q'(t, w) = (h_{gh}(t) - h_{gh}(0 \text{ °C})) (1 + w) + w L_{0eau}$$

$h_{H_2O}(t)$  étant l'enthalpie de l'eau gazeuse calculée par THERMOPTIM, et  $L_{0eau}$  la chaleur de vaporisation de l'eau à 0 °C.

De ce qui vient d'être dit, il ressort que l'on peut représenter un gaz humide dans THERMOPTIM de deux manières équivalentes : soit directement comme un corps composé comprenant au moins deux constituants : H<sub>2</sub>O et un autre gaz, pur ou composé, soit comme un gaz sec dont on connaît l'humidité spécifique. La première manière présente l'avantage que la composition du gaz humide est accessible à tout moment. En revanche, elle suppose que, pour un même gaz sec, on crée un nouveau corps humide pour chaque valeur de l'humidité relative. La seconde représentation est quant à elle beaucoup plus concise, étant donné qu'elle ne fait appel qu'au gaz invariant et à la valeur de l'humidité spécifique.

Signalons enfin que l'eau peut être présente sous les trois phases gazeuse, liquide ou solide, selon la température et l'humidité du gaz considéré. Cependant, pour des raisons pratiques, la température inférieure des gaz humide a été fixée dans THERMOPTIM à - 123 °C ou 150 K.

## Calcul des propriétés humides d'un point

L'onglet "Gaz humides" de l'écran des points permet de calculer les propriétés des gaz humides.

## Représentation par un gaz humide

Lorsque le gaz est représenté par un corps humide, ce dernier peut avoir été mélangé dans un mélangeur, généré à partir d'un gaz sec et d'une humidité spécifique, ou encore défini directement par l'utilisateur, auquel cas il faut prendre garde à ce que l'eau soit entrée en tant que gaz (H<sub>2</sub>O).

Soit par exemple de l'air humide dont la composition est la suivante :

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
O <sub>2</sub>	0,2068688	0,2307367
N <sub>2</sub>	0,7782206	0,7599001
H <sub>2</sub> O	0,01491061	0,009363201

Construisez un point utilisant ce corps, à la pression de 1 atmosphère et la température de 35 °C, et cliquez sur l'onglet intitulé "Gaz humides". L'écran suivant apparaît :

A gauche apparaissent les données relatives au point considéré : humidité spécifique w, humidité relative epsi. A droite se trouvent indiquées les valeurs spécifiques (c'est-à-dire rapportées à 1 kg de gaz sec) de l'enthalpie, du volume, ainsi que la température humide et température de rosée. Les condensats éventuels sont affichés à gauche sous l'humidité relative.

## Calcul des caractéristiques humides

Pour effectuer le calcul de toutes les caractéristiques humides du point, cliquez sur le bouton "imposer w". Les résultats suivants s'affichent :

## Imposer l'humidité relative

Il est aussi possible d'imposer une valeur particulière de l'humidité relative, en entrant cette valeur dans le champ correspondant, puis en cliquant sur le bouton "imposer epsi". Supposons que l'on impose une humidité relative égale à 0,5 :

Système ouvert (T,p,h)		Système fermé (T,v,u)		Gaz humides	
imposer w		imposer epsi		valeurs spécifiques (rapportées à 1 kg de gaz sec)	
imposer l'humidité du gaz					
w (kg/kg)	0,0178163366	q' (kJ/kg)	81,0238		
epsi	0,499999999	v (m3/kg)	0,9014101		
condensats	0	t' (°C)	26,1419		
p (bar)	1,01325	tr (°C)	23,018		
T (K)	308,15				

Il est possible de modifier la teneur en eau du gaz humide en cliquant sur le bouton "imposer l'humidité du gaz". La composition du gaz est ici modifiée comme suit :

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
O2	0,2041745	0,2288404
N2	0,7680852	0,7536551
H2O	0,02774027	0,01750447

Si la quantité d'eau présente dans le mélange dépasse la teneur saturante, l'humidité relative prend la valeur 1, l'humidité spécifique devient égale à l'humidité saturante, et la quantité d'eau en excès apparaît dans le champ intitulé "condensats" :

## Représentation par un gaz sec

La composition du gaz sec étant le plus souvent invariante, on a vu qu'il est intéressant de pouvoir définir un gaz humide en se rapportant à son gaz sec. De manière dérogatoire à la règle générale employée dans le progiciel, THERMOPTIM permet de le faire en construisant des points définis par le gaz sec et la valeur de l'humidité spécifique.

A titre d'exemple, construisez ainsi un point de pression 1 atmosphère et température 35 °C, associé au corps "air atmosphérique", puis cliquez sur l'onglet "Gaz humides", et imposez comme précédemment une humidité relative égale à 0,5. Le résultat que vous obtenez est le suivant, identique au précédent aux arrondis près :

corps		air_atmosphérique		afficher		Dupliquer		Sauver	
						Supprimer		Fermer	
Système ouvert (T,p,h)		Système fermé (T,v,u)		Gaz humides					
imposer w		imposer epsi		valeurs spécifiques (rapportées à 1 kg de gaz sec)					
imposer l'humidité du gaz									
w (kg/kg)	0,0178187981	q' (kJ/kg)	81,0346						
epsi	0,499999999	v (m3/kg)	0,9015347						
condensats	0	t' (°C)	26,1418						
p (bar)	1,01325	tr (°C)	23,018						
T (K)	308,15								

## Ecrans des transfos humides

Pour étudier les évolutions que peut subir un gaz humide, une transfo "humides" a été introduite. En fait, elle correspond à six transfos différentes, qui se distinguent par leur catégorie. Les écrans des transfos humides ont l'aspect suivant, mais ils varient légèrement en fonction de la catégorie choisie :

The screenshot shows the 'transfo' screen for 'humides' (humid) transfers. The 'type' is set to 'soufflage' (blow). The 'type énergie' is 'autre' (other). The 'débit imposé' (imposed flow) checkbox is unchecked. The 'débit masse de gaz sec' (dry gas mass flow) is 11,98322. The 'système fermé' (closed system) checkbox is unchecked, and 'système ouvert' (open system) is checked. The 'point amont' (upstream point) is 'intérieur' (interior). The 'point aval' (downstream point) is 'soufflage'. The 'type' for the downstream point is also 'soufflage'. The 'rapport de pente' (slope ratio) is 9 856,729965. The 'charge hydrique' (humidity charge) is -0,0166667, and the 'charge thermique' (thermal charge) is -162,6. The 'Delta Q'' is -164,28. The 'Calculer' (Calculate) button is visible. At the bottom, there are two checkboxes: 'Calculer les conditions de soufflage, le débit de gaz sec étant connu' (checked) and 'Calculer les conditions de soufflage, la température de soufflage étant connue' (unchecked).

Il s'agit ici d'une transfo humide "soufflage", permettant de calculer les conditions de soufflage pour maintenir une ambiance désirée, compte tenu de charges hydrique et thermique données.

Avant de détailler le mode d'utilisation de cet écran, précisons quelques points valables pour toutes les transfos humides.

Tout d'abord, THERMOPTIM n'effectue des calculs de transfos entre points humides que dans la mesure où ces points sont représentés par leur gaz sec et leur humidité relative. La raison est simple : ce mode de représentation évite d'avoir à introduire un nouveau corps humide pour chaque valeur de l'humidité relative.

Il faut souligner que cette manière de faire est tout à fait exceptionnelle dans THERMOPTIM : pour toutes les autres transfos, les calculs sont faits à partir de la composition précise du corps considéré. Si donc des couplages doivent être faits entre des transfos humides et d'autres transfos, il faudra prendre garde à les interconnecter par des corps humides.

De plus, les grandeurs étant préférentiellement exprimées en unités spécifiques, les débits qui apparaissent sur les transfos sont les débits de gaz sec.

La notion d'efficacité est souvent utilisée pour qualifier les transfos réelles comparativement aux transfos théoriques ou idéales. En pratique, ces dernières correspondent généralement à des évolutions dont l'état final est saturé (humidification complète, refroidissement jusqu'à la saturation).

La partie supérieure droite de l'écran rappelle les caractéristiques générales de la transfo, tandis que la partie gauche affiche les points amont et aval, avec indication de leurs températures, pression, enthalpie massique et humidité spécifique.

Les paramétrages des différentes catégories de transfos humides, et les options de calculs sont situés dans la zone centrale et inférieure droite.

## Transfo soufflage

Cette transfo relie le point décrivant l'ambiance intérieure connue (point amont) au point correspondant aux conditions de soufflage recherchées (point aval).

Les champs situés à droite de l'écran permettent d'entrer les charges hydrique et thermique à évacuer, respectivement en kg/s et kW. On fait l'hypothèse que la charge hydrique doit être évacuée à la température du point intérieur.

Thermoptim calcule alors les valeurs d'une part du "rapport de pente  $\gamma$ ", qui représente le ratio entre les variations d'enthalpie et d'humidité spécifiques, et d'autre part de l'enthalpie totale Delta Q' mise en jeu dans la transfo (sur la base des enthalpies spécifiques).

Deux actions sont ici possibles :

- soit déterminer la température et l'humidité spécifique du point de soufflage, le débit de gaz sec étant connu.
- soit, la température de soufflage étant considérée comme imposée, déterminer l'humidité spécifique du point de soufflage, ainsi que le débit de gaz sec nécessaire.

## Transfo refroidissement

Cette transfo permet d'étudier le refroidissement d'un gaz humide sur batterie froide, avec ou sans condensation.

Les conditions du refroidissement sont précisées à droite de l'écran : température de surface et efficacité de la batterie froide, si elles sont toutes deux connues. Si l'efficacité n'est pas connue, la donnée de l'humidité du point aval permet de calculer la transfo.

transfo		refroidissement		type		humides				< >		Sauver	
type énergie		autre		<input type="checkbox"/> débit imposé		liens		Supprimer		Fermer			
point amont		air mélangé		débit masse de gaz sec		11,9564		<input type="checkbox"/> système fermé		<input type="checkbox"/> observée			
		afficher		Delta Q'		-325,73		<input checked="" type="checkbox"/> système ouvert		Calculer			
T (K)		298,98		type		refroidissement		rapport de pente		5 372,216105			
p (bar)		1,0133						eau mise en jeu		-0,06063267			
h (kJ/kg)		0,982						efficacité		0,75			
w (kg/kg)		0,01297						température de surface °C		7			
point aval		air refroidi		afficher									
T (K)		284,9											
p (bar)		1,0133											
h (kJ/kg)		-13,12											
w (kg/kg)		0,007898853											
Calculer la transfo, l'efficacité de la batterie froide étant connue <input checked="" type="checkbox"/>													
Calculer la transfo, l'humidité du point aval étant connue <input type="checkbox"/>													

Deux actions sont ici possibles :

- l'efficacité étant imposée, calculer l'humidité du point aval. En cas de condensation anticipée (cas où la droite reliant le point amont au point de la courbe saturante à la température de surface coupe la courbe de saturation en deux points), le point aval est recherché sur la courbe de saturation, son enthalpie étant calculée à partir de l'efficacité de la batterie.

- l'humidité du point aval étant imposée, calculer sa température et l'efficacité de la batterie. En cas de condensation anticipée (voir ci-dessus), le point aval est recherché sur la courbe de saturation, pour l'humidité spécifique désirée.

## Transfo humidification eau/vapeur ou adiabatique

Ces deux types de transfos permettent d'étudier soit l'humidification avec de l'eau ou de la vapeur soit l'humidification adiabatique.

transfo: hum adiab type: humides

type énergie: autre

débit masse de gaz sec: 11,956

point amont: soufflage

Delta Q': 0,466

T (K): 287,15

p (bar): 1,0133

h (kJ/kg): -10,87

w (kg/kg): 0,007899163

type: humidificateur adiabatique

rapport de pente: 52,589205

eau mise en jeu: 0,008866535

efficacité: 0,9

point aval: intérieur

T (K): 285,35

p (bar): 1,0133

h (kJ/kg): -12,68

w (kg/kg): 0,008640761

Calculer la transfo, l'efficacité de l'humidificateur étant connue ☒

Calculer la transfo, l'humidité du point aval étant connue ☐

Les conditions de l'humidification sont précisées à droite de l'écran : température et pression de l'eau ou de la vapeur, et efficacité de l'humidificateur, si elle est connue. Si l'efficacité n'est pas connue, la donnée de l'humidité du point aval permet de calculer la transfo.

Deux actions sont ici possibles :

- l'efficacité étant imposée, calculer l'humidité du point aval. En cas de condensation anticipée (cas où la droite reliant le point amont au point de la courbe saturante à la température de surface coupe la courbe de saturation en deux points), le point aval est recherché sur la courbe de saturation, son enthalpie étant calculée à partir de l'efficacité de l'humidificateur.

- calculer le point aval pour obtenir l'humidité désirée. En cas de condensation anticipée (voir ci-dessus), le point aval est recherché sur la courbe de saturation, pour l'humidité spécifique désirée. L'efficacité de l'humidificateur est alors calculée.

## Transfo dessiccation

Cette transfo permet d'étudier la déshumidification par dessiccation ou la régénération d'un dessiccant. Différents types de matériaux dessiccants sont proposés, leur nom et leur chaleur de sorption s'affichant à droite de l'écran, cette dernière pouvant être modifiée si l'utilisateur le désire.

transfo: dessiccation    type: humides    < >    Sauver

type énergie: autre    ☐ débit imposé    liens    Supprimer    Fermer

point amont: soufflage    afficher    débit masse de gaz sec: 11,956    ☐ système fermé    ☐ observée

Delta Q': -196,57    ☒ système ouvert    Calculer

point aval: intérieur    afficher

T (K): 287,15    type: dessiccation

p (bar): 1,0133    rapport de pente: 6 572,202936

h (kJ/kg): -10,87    corps: gel silice microporeux

w (kg/kg): 0,007899164    eau sorbée: -0,02990872

chaleur de sorption: 2 900

T (K): 277,15

p (bar): 0,94505

h (kJ/kg): -20,89

w (kg/kg): 0,005288728

Calculer la transfo, la température du point aval étant connue ☒

Calculer la transfo, l'humidité du point aval étant connue ☐

Deux actions sont ici possibles :

- la température du point aval étant supposée connue, calculer son humidité.
- calculer la température du point aval pour obtenir l'humidité désirée.

On notera que la même transfo calcule aussi bien la dessiccation que la régénération du dessiccant, selon les valeurs relatives du point amont et du point aval. Pour la régénération, le progiciel ne vérifie toutefois pas si la température est suffisante.



## Transfo chauffage

Cette transfo permet d'effectuer différents calculs d'évolution d'un gaz humide. Selon les cas, le contenu en eau des deux points peut être le même ou différent.

transfo	réchauffe	type	humides	<	>	Sauver
type énergie	autre	<input type="checkbox"/> débit imposé	liens	Supprimer		Fermer
point amont	débit masse de gaz sec		11,9564	<input type="checkbox"/> système fermé		<input type="checkbox"/> observée
air refroidi	afficher	Delta Q'	27,33	<input checked="" type="checkbox"/> système ouvert		Calculer
T (K)	284,9	type	chauffage			
p (bar)	1,0133	rapport de pente	7 350 529,06			
h (kJ/kg)	-13,12	eau mise en jeu	0,00000372			
w (kg/kg)	0,007898853					
point aval						
soufflage	afficher					
T (K)	287,15					
p (bar)	1,0133					
h (kJ/kg)	-10,87					
w (kg/kg)	0,007899163					
Calculer la transfo, le point aval étant connu <input checked="" type="checkbox"/>						
Calculer le point aval, le Delta H et l'eau mis en jeu étant connus <input type="checkbox"/>						

Deux actions sont ici possibles :

- calculer le Delta H, les points amont et aval étant supposés connus.
- déterminer l'état du point aval, la variation d'enthalpie et l'eau mises en jeu étant supposées connues.



## Mélangeur humide

Ce nœud permet de déterminer les propriétés humides d'un mélange de plusieurs gaz secs ou humides.

nom transfo	m abs	m rel	T	H
débit intérieur	0,69624		277,15	-20,78
débit extérieur	0,29287		303,15	5,04

Un mélangeur humide diffère d'un mélangeur simple de la manière suivante :

- tout d'abord, il accepte comme branches d'entrée des transfos aussi bien humides que non. Etant donné que le débit des transfos humides est celui de leur gaz sec, le mélangeur humide effectue les corrections nécessaires
- ensuite, sa veine principale doit être une transfo humide. Si ce n'est pas le cas, un message avertit l'utilisateur, et les calculs sont faits comme s'il s'agissait d'un mélangeur simple.

En général, le point aval se trouve sur la droite de mélange. En cas de sursaturation, un message informe l'utilisateur et THERMOPTIM recherche le point de mélange sur la courbe de saturation, en assurant la conservation de l'enthalpie. L'excédent d'eau est alors affiché dans le cadre supérieur droit.

Les valeurs qui sont affichées ne sont pas exprimées par rapport au gaz sec.

## Diagrammes interactifs

Les diagrammes interactifs THERMOPTIM sont destinés à remplacer les diagrammes thermodynamiques classiques sous forme d'abaques sur papier. Même si les éditeurs choisissent avec soin des jeux de couleur permettant de distinguer les différentes courbes représentées, la lecture de ces derniers est en effet toujours délicate, et les risques d'erreur par interpolation non négligeables. Les diagrammes interactifs permettent, sur simple clic souris, d'afficher l'état thermodynamique complet d'un fluide, et de faciliter ainsi l'obtention des valeurs désirées. Leur principal atout réside dans une prise en mains très rapide du fait de leur grande facilité d'emploi : l'affichage à l'écran des valeurs des grandeurs thermodynamiques est immédiat, et un éditeur de points convivial permet des gains de productivité appréciables pour les utilisateurs.

L'utilisation des diagrammes interactifs est très simple : positionnez le curseur en forme de croix au point dont vous désirez obtenir les grandeurs thermodynamiques, et cliquez pour qu'elles soient affichées à l'écran. Pour les vapeurs condensables, les grandeurs fournies sont les suivantes : la pression (bar), la température (K ou °C), l'enthalpie (kJ/kg), l'entropie (kJ/kg/K), le volume massique ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) et le titre (rapport adimensionnel de la masse de la phase gazeuse à la masse totale).

Etant donné que la précision de positionnement du curseur dépend de la résolution de l'écran et n'est généralement pas très grande, il est possible d'effectuer des calculs plus précis soit en déplaçant une mire grâce aux flèches du clavier, soit en créant des points (dits points de cycle car un ensemble de plusieurs points représente souvent un cycle thermodynamique) et en les éditant.

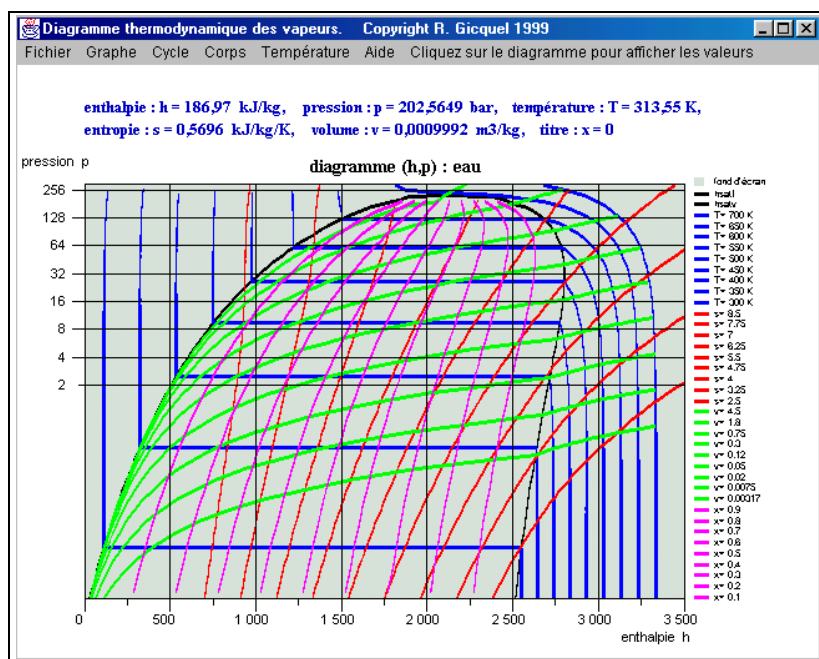
Les diagrammes interactifs utilisent cette propriété de l'éditeur pour définir les variables d'entrée utilisées lors du calcul d'un point : les deux premières colonnes de chiffres sur la gauche sont considérées par le progiciel comme indiquant les variables d'état connues à partir desquelles les autres grandeurs thermodynamiques doivent être calculées.

Les différentes fonctionnalités des diagrammes interactifs sont présentées en détail dans leurs manuels ou de manière synthétique dans les écrans de Référence Rapide accessibles par le menu "Aide".

Les diagrammes suivants sont aujourd'hui disponibles :

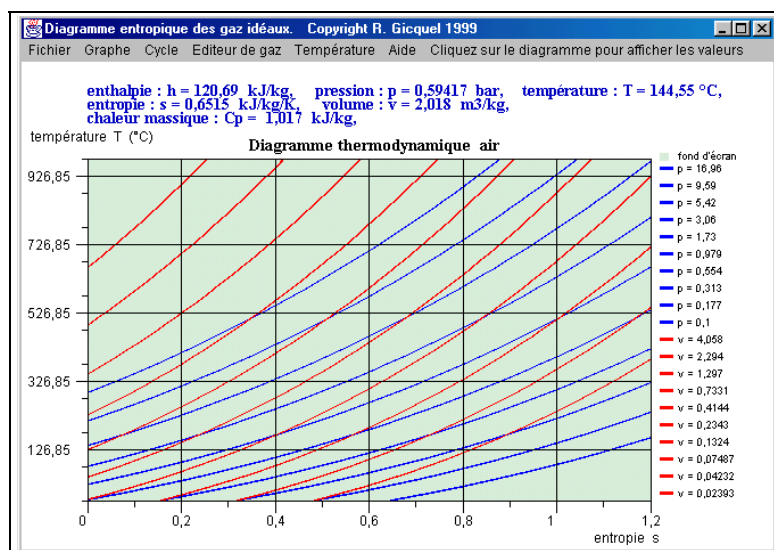
1) des diagrammes de vapeurs, qui présentent les zones liquide, équilibre liquide-vapeur et vapeur d'une quinzaine de corps purs, dont l'eau (voir exemple ci-contre). Pour les vapeurs, les diagrammes suivants sont disponibles (en fonction du corps) :

- le diagramme (h, P) dit des frigoristes, généralement en échelle semi-logarithmique, avec l'enthalpie en abscisse et la pression en ordonnée ;
- le diagramme entropique (T, s), avec l'entropie en abscisse et la température en ordonnée ;
- le diagramme de Clapeyron (P, v), pour l'eau uniquement, avec le volume en abscisse et la pression en ordonnée ;
- le diagramme de Mollier (h, s), avec l'enthalpie en abscisse et l'entropie en ordonnée ;
- le diagramme exergétique (h, xh), avec l'enthalpie en abscisse et l'exergie en ordonnée ;
- le diagramme exergétique (s, xh), avec l'entropie en abscisse et l'exergie en ordonnée.



2) des diagrammes des gaz idéaux, permettant de faire varier la nature du gaz (pur ou composé). Pour les gaz idéaux, les diagrammes suivants sont disponibles :

- le diagramme entropique ( $T, s$ ), avec l'entropie en abscisse et la température en ordonnée (ouvert par défaut lors du lancement de l'application) ;
- le diagramme de Clapeyron ( $P, v$ ), avec le volume en abscisse et la pression en ordonnée ;
- le diagramme ( $h, \ln(P)$ ) dit des frigoristes, généralement en échelle semi-logarithmique, avec l'enthalpie en abscisse et la pression en ordonnée. Ce diagramme n'est calculé que si l'option correspondante est sélectionnée dans l'écran des paramètres globaux.



jeu d'isovaleurs, les isobares pour le diagramme entropique, et les isothermes pour le diagramme des frigoristes.

La préparation des fonds de diagramme fait appel à une classe externe particulière, appelée CreateMixtureCharts.java qu'il n'est pas nécessaire de présenter ici.

Ces diagrammes étant une variante des diagrammes des vapeurs, leur utilisation est expliquée dans la documentation de ces derniers.

## Connexions entre le simulateur et les diagrammes

Les diagrammes interactifs peuvent être soit utilisés indépendamment de Thermoptim, soit à partir du progiciel, par l'intermédiaire de la ligne "Diagramme Interactifs" du menu "Spécial", qui ouvre la fenêtre suivante :

nom du point	corps	simulateur	Diagramme	sélectionné
1	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
2	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
3	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
3a	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
4	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
4a	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
5	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
7	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
8	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>
9	R134a	X		<input checked="" type="checkbox"/>

L'interface entre le simulateur et les diagrammes interactifs comprend plusieurs champs et boutons, ainsi qu'une table principale montrant les différents points soit qui existent dans le projet, soit qui ont été définis comme points de cycle dans le diagramme.

Les deux premières colonnes indiquent le nom et le corps des points. Si un point est défini dans le simulateur, un "X" apparaît dans la troisième colonne, s'il appartient à un cycle du diagramme, un "X" est affiché dans la quatrième.

La dernière colonne intitulée "sélectionné" définit l'état du point : si la boîte est cochée, le point est pris en compte lors des transferts entre le simulateur et les diagrammes, et sinon il est ignoré. Pour changer l'état d'un point, double-cliquez sur la ligne correspondante.

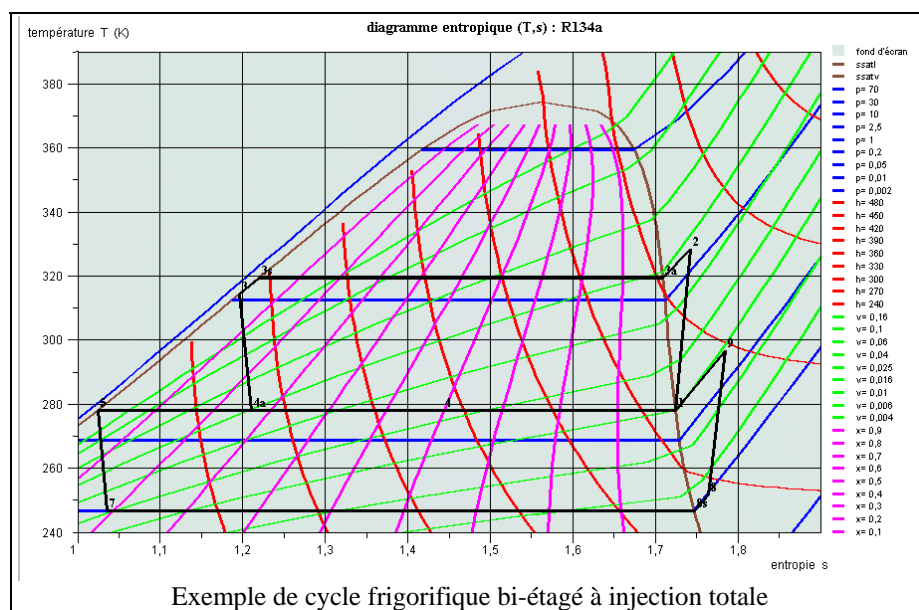
Au dessus de la table un champ indique le diagramme sélectionné. Lorsque vous double-cliquez dedans, la liste des différents diagrammes disponibles est proposée. Celui que vous choisissez est alors affiché.

A droite de la table, il y a trois boutons :

- "Mettre à jour la table des points" construit la table à partir des informations disponibles dans le projet et dans le diagramme. Dans l'exemple ci-dessus, il y a dix points créés dans le simulateur, et aucun dans le diagramme.
- "Mettre à jour le diagramme à partir du simulateur" transfère les valeurs des points sélectionnés depuis le simulateur vers le diagramme. Si des points de cycle existent, ils sont mis à jour, sinon ils sont créés. Ce bouton permet donc de tracer sur un diagramme interactif un cycle défini dans le simulateur. Les points sont transférés en essayant de les ordonner aussi bien que possible, mais il peut être nécessaire de les réordonner pour obtenir un tracé relié correct. L'éditeur de points du diagramme permet de le faire.
- "Mettre à jour le simulateur à partir du diagramme" transfère les valeurs des points sélectionnés depuis le diagramme vers le simulateur. Si des points du projet existent, ils sont mis à jour, sinon ils sont créés.

## Affichage en foncé de l'isovaleur centrale

Dans les versions de Démonstration et Education, l'interactivité des diagrammes est supprimée. L'inconvénient est qu'il n'est plus possible dans ces conditions de savoir à quelles valeurs correspondent les courbes d'iso température, enthalpie, titre... affichées. Afin de remédier à cette situation, la



(généralement la cinquième), est affichée en couleur sombre, ce qui permet de l'identifier, et d'en déduire relativement facilement les matricules des autres.

La figure ci-dessus montre les résultats que l'on peut obtenir en transférant un cycle du simulateur vers un diagramme, puis en le complétant pour obtenir un beau rendu.

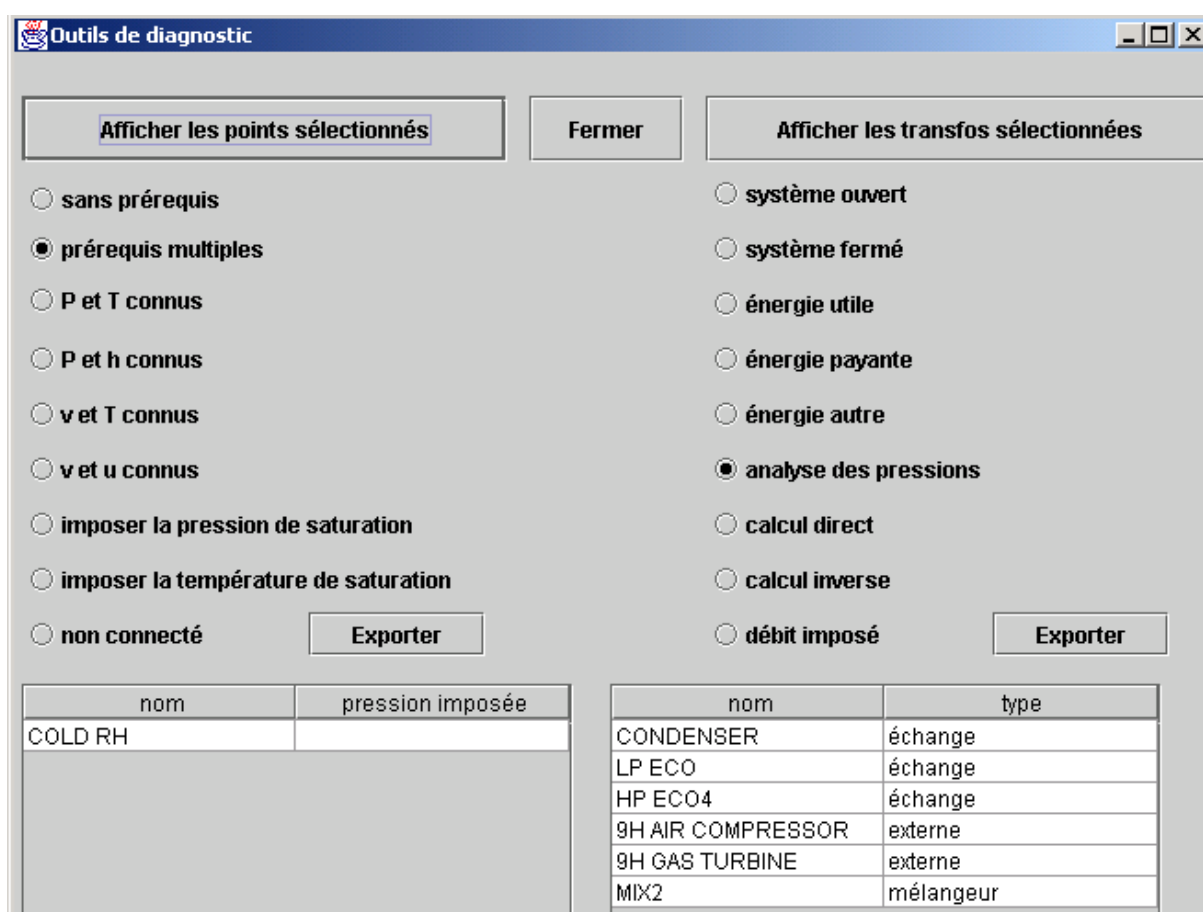
## Outils de diagnostic

Rappelons que l'interface entre l'éditeur de schémas et le simulateur possède depuis la version 1.5 des outils pour rechercher des anomalies de modélisation, et supprimer celles qui sont identifiées (cf. tome 1).

Par anomalies de modélisation, on entend essentiellement des incohérences entre les deux environnements de travail :

- éléments du simulateur absents de l'éditeur de schémas
- éléments de l'éditeur de schémas absents du simulateur
- points non reliés présents dans le simulateur
- corps non utilisés

En complément, un écran appelé "Outils de diagnostic" permet (à partir de la version Standard) de faciliter le diagnostic d'un modèle. Il est affiché à partir du menu Spécial de la fenêtre principale du projet.



nom	pression imposée
COLD RH	

nom	type
CONDENSER	échange
LP ECO	échange
HP ECO4	échange
9H AIR COMPRESSOR	externe
9H GAS TURBINE	externe
MIX2	mélangeur

Il comporte deux tables :

- celle de gauche concerne les points ; elle propose une liste d'options de recherche et permet d'afficher les points correspondant à la recherche demandée. Si le point a une pression imposée, son nom apparaît dans la colonne de droite. Après avoir sélectionné le bouton radio correspondant à votre choix, un clic sur le bouton "Afficher les points sélectionnés" charge la table de gauche ;
- celle de droite concerne les transfos et fonctionne de manière similaire.

Pour les points les options de recherche sont les suivantes :

- **sans pré requis** autre que le corps qui leur est associé ou une pression imposée : ces points ne sont en principe jamais modifiés, sauf si la composition du corps associé varie ou si la pression imposée est modifiée;



- **pré requis multiples** : si un point a plusieurs pré requis, cela signifie qu'il peut être modifié par plusieurs composants. C'est généralement parce que, lors de la modélisation, il a été connecté par erreur soit en sortie de deux transfos différentes, soit en sortie d'une transfo et en entrée de la transfo principale d'un mélangeur ;
- calculés en **système ouvert avec soit p et T, soit p et h connus** ;
- calculés en **système fermé avec soit v et T, soit v et u connus** ;
- à **pression de saturation imposée** ou à **température de saturation imposée** ;
- **non connectés** à une transfo : ces points sont inutiles et peuvent généralement être supprimés.

Pour les transfos les options de recherche sont les suivantes :

- **système ouvert ou fermé** ;
- **type d'énergie utile, payante ou autre** ;
- **analyse des pressions** : dans ThermoOptim, les pressions sont initialisées par défaut à 1 bar, puis c'est à l'utilisateur de fixer leurs valeurs, le progiciel ne le faisant que dans un très petit nombre de cas. Si l'utilisateur oublie de le faire ou commet une erreur, des problèmes de convergence peuvent apparaître. Cette option recherche **d'une part toutes les transfos** autres que des compressions, des détentes ou des laminages dans lesquelles la pression de sortie est soit supérieure à celle d'entrée (impossibilité physique sauf pour certaines transfos externes), soit inférieure à 80 % de la pression d'entrée (perte de charge sans doute démesurée), et d'autre part tous les nœuds à travers lesquels la pression augmente (impossibilité physique sauf pour certains nœuds externes) ;
- **calcul direct ou inverse** ;
- à **débit imposé** : cette option facilite la vérification de la cohérence de la propagation des débits dans les projets un peu complexes.

Les deux tables sont double-cliquables : si vous double-cliquez sur une des lignes, le composant correspondant s'affiche. En cliquant sur "Exporter", la liste des points ou des transfos de la table est imprimée dans le fichier "output.txt".

Sur la copie d'écran ci-dessus, il y a 1 point avec pré requis multiples, et la partie droite de l'écran montre le résultat d'une analyse des pressions.

### Point avec pré requis multiples

Un double-clic sur la ligne du point "COLD RH" affiche son écran et donne ainsi accès à sa fenêtre des **liens** (voir le paragraphe "Navigateur de liens" section suivante).

L'analyse des éléments prérequis montre que "COLD RH" est à la fois défini comme point de sortie de la turbine "HP TURBINE", et comme point d'entrée de la transfo principale du mélangeur "FROM HP TURBINE & GAS...", ce qui correspond à une erreur de modélisation, dont la détection eût été difficile sans l'outil de diagnostic.

**nom / type** COLD RH / PointCorps

**Éléments prérequis**

nom	type	validé	calcula...	code
HP TURBINE	Expansi...	true	true	process
FROM HP TURBINE & GAS ...	Mixer	true	true	node

**Éléments amont**

nom	type
-----	------

**Éléments subordonnés**

nom	type	validé	calculable
IP STEAM HEA...	Exchange	true	true
IP RH	Exchange	true	true

**Éléments aval**

nom	type
-----	------

Fermer

Navigateur de liens

### Analyse des pressions

L'analyse des pressions a identifié six composants éventuellement mal paramétrés. En double-cliquant sur la table de droite, leurs écrans peuvent être affichés. L'examen des trois premiers montre que la pression de sortie avait été arrondie supérieurement, l'erreur étant négligeable.

Les deux composants suivants sont des transfos externes correspondant à un compresseur et une turbine non adiabatiques ; il est donc parfaitement normal que la pression aval du premier soit supérieure à sa pression amont, et que la pression aval du second soit inférieure à 80 % de sa pression amont.

Quant au mélangeur "MIX2", son examen montre que la pression amont de sa transfo principale est supérieure aux pressions aval de ses branches, ce qui est une erreur manifeste de paramétrage.

L'outil de diagnostic a ainsi identifié trois erreurs négligeables, deux changements de pression normaux dans des transfos externes, et une erreur de paramétrage en sortie d'un mélangeur. Le projet mettant en jeu une soixantaine de points et transfos ainsi qu'une quinzaine de nœuds, le dépistage de ces erreurs aurait été difficile sans cet outil.

## Moteur de recalcul automatique

Le moteur de recalcul automatique de la version Java de ThermoOptim permet de mener facilement des études de sensibilité sur des systèmes complexes : le progiciel est en effet capable, lorsque l'utilisateur modifie un ou plusieurs des paramètres caractéristiques d'un composant, ou une ou des variables d'état du système, de déterminer l'ensemble des recalculs qui doivent être faits et l'ordre dans lequel ils doivent l'être compte tenu des changements effectués.

Lorsqu'un projet (c'est-à-dire un modèle) est construit, l'utilisateur fournit, implicitement ou explicitement, toute l'information sur la configuration du système : paramètres caractéristiques des types primitifs, connexions logiques entre eux... Cette information est très riche, même si elle est difficile à exploiter.

Pour effectuer le calcul du modèle, l'utilisateur peut le faire de deux manières : soit en effectuant lui-même pas à pas le calcul des différents éléments, soit automatiquement si le progiciel est capable d'extraire de l'information précédente l'ordre dans lequel les calculs doivent être menés, lequel dépend non seulement de la structure du problème, mais aussi de ses données.

Dans les versions 4ème Dimension de ThermoOptim, seule la première méthode était possible. Les versions Java donnent accès à un moteur de recalcul automatique dont les principales caractéristiques sont décrites ci-dessous.

L'automatisation des calculs peut être un problème difficile pour les raisons suivantes :

- chaque type primitif peut être calculé de différentes manières, selon le paramétrage choisi par l'utilisateur. En particulier les transfos peuvent être calculées en sens direct ou inverse. En calcul direct, le point aval est modifié par la transfo, tandis qu'en calcul inverse, le point aval est imposé et la transfo est calculée à partir de lui. Cela signifie que la causalité (l'ordre dans lequel les calculs doivent être effectués) dépend des caractéristiques du type. De plus, un point aval peut être considéré à la fois comme une donnée et un résultat de calcul : dans une compression ou une détente, la pression du point aval est fréquemment imposée, tandis que sa température doit être calculée par la transfo.
- lorsque deux transfos sont connectées l'une à l'autre, le débit-masse qui les traverse est le même (conservation du débit). Dans ce cas, il peut être intéressant de propager automatiquement le débit de la transfo amont à la transfo aval. En pratique toutefois, comme nous le verrons plus loin, la propagation du débit est un problème non trivial. De temps en temps par exemple, il est nécessaire d'imposer le débit dans une ou plusieurs transfos pour faire converger le moteur de recalcul automatique.
- le réseau des fluides peut être fermé, auquel cas il comprend des boucles, ce qui complique nettement le processus de recalcul.
- enfin, même si des règles générales gouvernant le recalcul peuvent être trouvées, des exceptions existent toujours. Elles doivent être analysées avec un grand soin et conduisent à imposer des contraintes particulières. Par exemple, elles ont eu pour conséquence d'interdire la connexion directe de deux nœuds, qui doivent être reliés dans tous les cas par une transfo au moins. Une combustion, qui est dans la catégorie des transfos, se comporte quant à elle comme un nœud un peu particulier, du fait qu'elle est connectée à la fois à un comburant et à un combustible...



## Concepts de base et principes

Le moteur de recalcul est basé sur les concepts suivants :

1. chaque type primitif peut être **calculable** ou non. Il est calculable si toute l'information nécessaire pour le calculer est connue et valide. Cette information est de double nature : ses propres caractéristiques, et celle qui provient des autres types primitifs.
2. chaque type primitif peut être **validé** ou **invalidé**. Il est validé s'il était calculable et a été calculé. Il devient invalidé lorsqu'une partie de l'information nécessaire à son recalcul est modifiée.
3. chaque type primitif a des **pré requis** et/ou des **subordonnés**. Ses pré requis sont les autres types primitifs qui contiennent une partie de l'information dont il a besoin pour être calculé, et doivent donc être validés pour qu'il devienne calculable. Ses subordonnés sont les autres types primitifs dont il est un pré requis.
4. un type devient ainsi invalidé dans deux cas : soit si l'une de ses propres caractéristiques est changée, soit quand l'un au moins de ses pré requis est invalidé. Il est calculable quand tous ses pré requis sont validés. Les corps n'ont pas de pré requis, et certains types pas de subordonnés.
5. chaque type primitif suit l'évolution de ses **liens** avec ses pré requis et ses subordonnés. Lorsqu'un type est recalculé, il invalide ses subordonnés, ce qui signifie qu'eux aussi doivent se recalculer lorsque tous leurs pré requis sont validés. A leur tour, ses subordonnés invalident les leurs, et ainsi de suite.
6. des **Navigateurs de Liens** permettent d'analyser les liens logiques qui existent entre les différents éléments d'un projet.
7. chaque **projet** suit l'évolution des types invalidés. Lorsque le bouton **Recalculer** de la fenêtre de projet ou de recalcul est activé, tous les types invalidés qui sont calculables sont calculés.

## Eléments du moteur de recalcul

Le moteur de recalcul utilise les éléments suivants :

### Contrôle du débit

Pouvoir contrôler le débit est très important en pratique. Dans Thermoptim, ce contrôle est effectué par les nœuds et par les connexions entre transfos.

Pour une information plus détaillée, le lecteur se réfèrera à la partie du manuel traitant des nœuds, ce paragraphe n'étant qu'un résumé de ce qui y est exposé. Dans les mélangeurs et les séparateurs, la propagation du débit est assez simple : dans un mélangeur le débit de la veine principale est la somme de ceux des branches, et dans un séparateur il dépend du titre de la vapeur en entrée et de l'efficacité de séchage.

Dans un diviseur, la distribution du débit de la veine principale entre les différentes branches est généralement faite proportionnellement à leurs facteurs de débit. Une exception existe cependant : il est possible d'imposer le débit dans une transfo en sortie d'un diviseur, à condition que ce diviseur n'ait que deux branches : celle à débit imposé et une autre. Dans ce cas, le débit de la deuxième transfo est égal au débit dans la veine principale moins celui de la branche où il est imposé, et les facteurs de débit des deux branches sont recalculés pour correspondre à cette répartition.

Pour propager automatiquement le débit entre des transfos, certaines règles doivent être respectées :

- tout d'abord, la connexion entre les deux transfos doit être sans ambiguïté. Si le point qui les relie est aussi connecté à une troisième transfo, le problème devient beaucoup complexe, et ne peut être résolu que s'il existe un schéma dans lequel la connexion valide est la seule (ce point est discuté plus en détail plus loin).
- deuxièmement, le mécanisme de propagation automatique du débit doit être activé en sélectionnant la boîte à cocher "débit auto" située près du bouton "Recalculer" déjà mentionné.

- troisièmement, on peut désirer simultanément activer le mécanisme de propagation automatique du débit dans la plupart des transfos, et le désactiver dans certaines. C'est notamment utile lorsque le réseau comporte des boucles. Pour cela, on peut sélectionner ou non la boîte à cocher "débit imposé" qui est placée dans l'écran des transfos à côté du champ "Delta H". Lorsque la boîte à cocher "débit imposé" d'une transfo est sélectionnée, son débit n'est pas modifié, sauf si elle est connectée à un nœud (à l'exception du diviseur à débit imposé mentionné plus haut).

Pour des projets complexes, la liaison entre le projet et l'éditeur de schémas peut ne pas être biunivoque : dès lors qu'il y a des points partagés par plusieurs éléments, il y a davantage de liens possibles que de liens valides. C'est pourquoi, après un transfert depuis le simulateur vers l'éditeur de schémas, on peut avoir besoin d'élaguer le réseau obtenu, et cette opération ne peut être automatisée.

Une fois le travail d'élagage effectué, le schéma dispose d'une information complémentaire permettant de gérer les liens de propagation du débit. Cela signifie que, si l'on travaille sans schéma, il faut être très soigneux pour que le moteur de recalcul puisse sans ambiguïté retrouver son chemin, alors que, si l'on en dispose, on peut s'appuyer sur la structure du schéma pour savoir comment opérer.

L'existence de l'éditeur de schémas amène ainsi à voir sous un œil neuf la question de la propagation du débit lors du recalcul automatique, et fournit des solutions à un certain nombre de problèmes difficiles à résoudre en son absence.

La gestion du recalcul tient compte de ces possibilités. Deux manières d'opérer sont possibles pour aller chercher dans l'éditeur de schémas les informations sur les connexions existantes :

- soit le faire à chaque fois qu'un composant est recalculé,
- soit le faire une fois pour toutes pour l'ensemble des composants désirés.

Cette seconde solution étant beaucoup moins coûteuse en temps de calcul, c'est elle qui a été choisie. Chaque fois qu'un composant du type transfo est transféré ou mis à jour depuis l'éditeur de schémas vers le simulateur, la transfo correspondante du simulateur mémorise des informations sur ses liens amont et aval que le moteur de recalcul utilise en priorité pour gérer la propagation du débit et du recalcul. De plus, lorsqu'une transfo a le même point en amont et en aval (transfo-point), elle n'est pas recalculée, ceci pour éviter un blocage dans l'invalidation.

Sur le plan pratique, pour tirer parti de cette nouvelle fonctionnalité lors du recalcul d'un projet existant, il faut opérer comme suit :

- ouvrir le fichier de projet dans le simulateur
- ouvrir le fichier de schéma dans l'éditeur
- ouvrir l'interface Editeur de schémas / Simulateur
- effectuer une mise à jour de la table des éléments
- mettre à jour du simulateur à partir du schéma

Une fois ces opérations effectuées, il est possible d'utiliser le moteur de recalcul en tenant compte des informations sur les connexions qui sont contenues dans le schéma.

Afin de simplifier l'affichage, la version 1.5 permet de choisir d'afficher ou de masquer les **types calculables ou invalidés**. Par défaut, ces champs ne sont plus affichés dans le simulateur. Pour les afficher, sélectionnez l'option "Afficher les informations de recalcul" dans l'écran des paramètres globaux (menu Aide).

Notez que par défaut, le recalcul automatique est activé, ainsi que la propagation du débit.

## Navigateurs de liens

Nous avons vu que des navigateurs de liens ont été créés pour analyser les liens logiques qui existent entre les différents éléments d'un projet. Ils permettent d'afficher quatre tables qui résument les liens entre un type donné et les autres. Pour y accéder, cliquez sur le bouton "liens" du type qui vous intéresse (ces boutons ne sont visibles que si vous avez choisi l'option "Afficher les informations de recalcul").

Par exemple, le point 3a du cycle de réfrigération bi-étagé donné en exemple a le navigateur de liens suivant :

- Son pré requis est une pression imposée HP
- Ses éléments subordonnés sont deux transfos échange : désurchauffe et condenseur (il est connecté en sortie du premier et en entrée du second)
- Les éléments amont auxquels il est directement relié sont les transfos désurchauffe et compresseur HP, elles-mêmes connectées au point 2
- Les éléments aval auxquels il est directement relié sont les transfos condenseur et laminage HP, elles-mêmes connectées au point 3

nom / type		3a / PointCorps		
<b>Eléments prérequis</b>				
nom	type	validated	calculable	code
HP	PresSetVal...	true	true	pression
<b>Eléments amont</b>				
nom	type			
compresseur HP	Compression			
2	PointCorps			
désurchauffe	Exchange			
<b>Eléments subordonnés</b>				
nom	type	validated	calculable	
désurchauffe	Exchange	true	true	
condenseur	Exchange	true	true	
<b>Eléments aval</b>				
nom	type			
condenseur	Exchange			
3	PointCorps			
laminage HP	Throttle			

En double-cliquant sur n'importe quelle ligne d'une des tables, on ouvre le navigateur de liens du type correspondant. Ceci permet de tester la description du système et/ou d'en comprendre la logique.

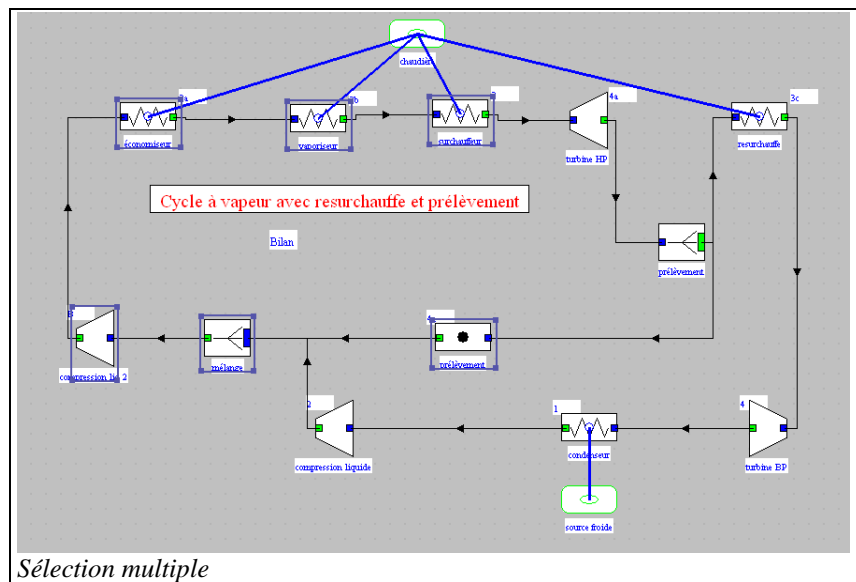
## Recalcul de sélections multiples

Depuis la version 1.5, un mécanisme particulier permet de faciliter le travail sur des sélections multiples de composants. Il est accessible à partir du menu Spécial de l'éditeur de schémas.

Lorsqu'une sélection multiple est faite, elle peut être chargée dans cet écran en cliquant sur le bouton "Mettre à jour la sélection à partir de l'éditeur".

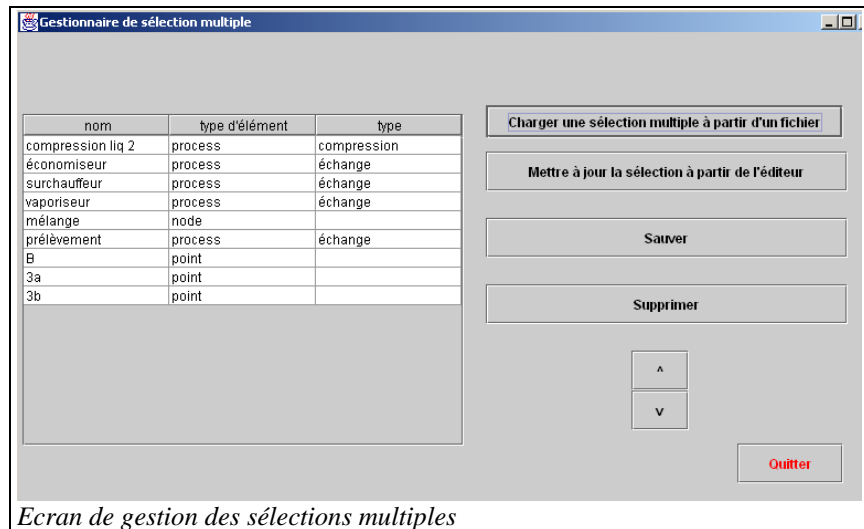
La liste des éléments sélectionnés (points, transfos, nœuds, échangeurs de chaleur) apparaît dans une table. L'ordre de ces composants peut être modifié grâce aux boutons de navigation situés en bas à droite de l'écran, et des éléments peuvent être supprimés.

La liste des éléments sélectionnés (attention : pour le moment, les points ne sont pas sélectionnés lors de la relecture du fichier) peut être sauvegardée dans un fichier du répertoire "res". Elle peut être rechargée en cliquant sur le bouton "Charger une sélection multiple à partir d'un fichier".



Une fois une sélection effectuée de cette manière, diverses fonctionnalités peuvent être activées à partir de l'éditeur de schémas :

- la touche F5 permet d'effectuer un recalcul automatique dans le simulateur ;
- la touche F6 met à jour l'écran de gestion des sélections multiples en chargeant la sélection courante de l'éditeur de schémas ;
- la touche F7 effectue un recalcul des différents éléments dans la sélection, dans l'ordre où ils apparaissent dans la table de l'écran de gestion des sélections multiples, avec mise à jour de l'affichage des valeurs des points sélectionnés si leur affichage est demandé ;
- la touche F8 permet de faire afficher ou masquer sélectivement les valeurs des points de la table de l'écran de gestion des sélections multiples. Pour que l'affichage ait lieu, après avoir tapé sur F6, il faut taper deux fois sur F3 (la première sélectionne tout, et la seconde la sélection multiple. Ensuite, à chaque recalcul par F7, les valeurs affichées sont mises à jour.



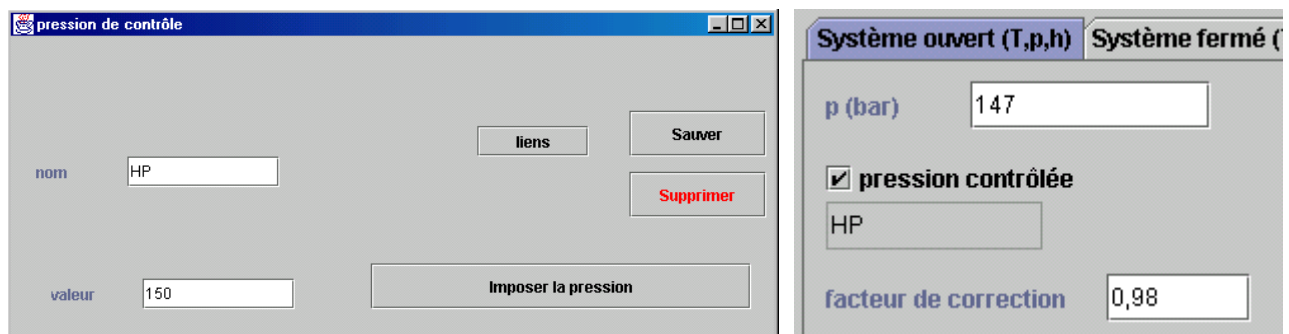
Ecran de gestion des sélections multiples

Ces touches sont accessibles à partir du menu Edition de l'éditeur de schémas :



## Contrôle des pressions

Pour permettre de faire varier simultanément la pression d'un ensemble de points, un mécanisme particulier a été mis en place, celui des "pressions imposées". Il est possible de les définir en associant un nom et une valeur dans l'écran qui est affiché lorsqu'on double-clique dans le bandeau de la table intitulée "Pressions imposées" située en haut à droite de l'écran principal des projets (ici par exemple, "HP", pour Haute Pression et 150 bar) :



Ensuite, la pression imposée est associée aux points dont la pression doit être fixée à cette valeur. On le fait en sélectionnant la boîte à cocher "pression contrôlée" dans l'écran du point et en choisissant "HP" dans la liste proposée lorsqu'on double-clique dans le champ situé juste en dessous.

Il est même possible de définir un facteur de correction de la pression, par lequel la valeur de la pression imposée est multipliée pour calculer celle du point. On peut par ce biais prendre automatiquement en compte des pertes de charge. Dans l'exemple ci-dessus, la valeur de la pression imposée est 150 bar ; comme le facteur de correction est 0,98 (perte de charge de 2%), la pression du point est fixée à 147 bar.

Pour modifier les pressions des points contrôlés par une pression imposée donnée se fait en cliquant sur le bouton intitulé "Imposer la pression".

## Echangeurs de chaleur

Pour le recalcul automatique des échangeurs de chaleur, les règles de causalité impliquant que les températures d'entrée et les débits du fluide chaud et du fluide froid soient connus, THERMOPTIM les impose à partir des transfos correspondantes (voir la section sur les échangeurs de chaleur pour plus de détails).

## Outils de recalcul automatique

Afin de faciliter l'utilisation du moteur de recalcul, un écran appelé "Outils de recalcul automatique" a été introduit. Il est affiché à partir du menu Spécial de la fenêtre principale du projet, ou directement par Ctrl R.

**Afficher les transfos à observer**

nom	transfo	débit	Delta H
détente	détente	1,1221	-812,51
combustion	combustion	1,1221	1 005,7

**Afficher les types invalidés**

nom	type	calculable
compression	compression	<input checked="" type="checkbox"/>
2	point	<input type="checkbox"/>
mélangeur	mélangeur	<input type="checkbox"/>
2inj	point	<input type="checkbox"/>
combustion	combustion	<input type="checkbox"/>
comburant	échange	<input checked="" type="checkbox"/>

types invalidés

types calculables

☒ débit auto  
☐ verrouillé

efficacité

énergie utile

énergie payante

**Recalculer**

**Fermer**

Pour mieux suivre les évolutions des calculs, une notion a été introduite : celle de transformation "observée". Lorsqu'une transfo est "observée", ce qui se fait en sélectionnant une boîte à cocher située en haut à droite de son écran, apparaissent, dans la table de droite de la fenêtre de recalcul, son nom, son type, et les valeurs du débit qui

la traverse et de la variation d'enthalpie ou d'énergie interne dont elle est le siège. Il est ainsi possible, au fur et à mesure que le recalcul se déroule, de suivre l'évolution de ces deux paramètres clés.

Les deux tables de droite affichent les éléments invalidés et ceux qui sont calculables pour deux étapes successives du recalcul : le dernier en bas et l'avant dernier en haut. Seule celle du bas est double-cliquable, et permet d'accéder aux types invalidés. L'intérêt de suivre pas à pas la propagation de l'invalidation est de bien vérifier que les recalculs se déroulent de manière correcte. L'affichage des types invalidés se fait soit à partir du bouton correspondant situé en haut à droite, soit automatiquement lors du recalcul. On peut indifféremment activer le moteur de recalcul à partir de cet écran ou de la fenêtre principale du projet.

Au bas de l'écran sont affichés un certain nombre d'informations que l'on retrouve dans la fenêtre principale de projet : le nombre de types invalidés et calculables, et trois indicateurs dont la signification doit être rappelée car leurs intitulés peuvent induire en erreur. Chaque transfo est caractérisée entre autres par son "type d'énergie", qui peut être "utile", "payante" ou "autre". Les indicateurs affichés sont les suivants : "énergie utile" est la somme algébrique de toutes les énergies mises en jeu ("Delta H" pour les systèmes ouverts, "Delta U" pour les systèmes fermés) dans les transfos de type "utile" ; "énergie payante" est la somme algébrique de toutes les énergies mises en jeu dans les transfos de type "payante" ; enfin "efficacité" est le rapport de "énergie utile" à "énergie payante".

En général, les types d'énergie choisis correspondent au sens qu'on leur donne habituellement en thermodynamique, mais il est aussi possible de s'en servir comme simple totalisateurs pour distinguer différentes catégories de transfos.

Lorsque l'on suit l'évolution des calculs effectués automatiquement, ces indicateurs sont très utiles, car leur stabilisation montre que le processus converge.

La boîte à cocher "verrouillé" peut être utilisée pour stopper l'invalidation automatique lorsqu'existent des boucles dans le réseau des fluides.

Rappelons que les types invalidés peuvent être analysés plus en détail en affichant les navigateurs de liens.

## Utilisation du moteur de recalcul automatique

Lorsqu'un projet est défini, il est souvent préférable de le calculer une première fois pas à pas pour s'assurer que le paramétrage est fait correctement. De la même manière, il vaut mieux bien vérifier les connexions logiques entre ses différents éléments, en s'aidant d'une part de l'éditeur de schémas, et d'autre part des navigateurs de liens.

Si vous désirez que les débits soient propagés automatiquement, vérifiez que l'option "débit auto" est sélectionnée, que les transfos à débit imposé sont bien spécifiées, et testez la cohérence de votre modèle en utilisant les outils de diagnostic.

Une fois que vous avez bien vérifié le modèle, ouvrez l'écran des outils de recalcul, et cliquez sur le bouton "Recalculer" si le nombre de types calculables n'est pas nul. Sinon, il faut que vous calculiez d'abord un élément situé en amont du système.

Lorsque vous utilisez le moteur de recalcul automatique, les types invalidés calculables sont calculés à leur tour, éventuellement en parallèle. Dès qu'un type est calculé, il invalide ses subordonnés, rendant le processus itératif. Quand tous les types qui étaient initialement calculables sont recalculés, le bilan global est effectué et les valeurs des indicateurs sont mises à jour. Généralement, de nouveaux types ont été invalidés. Itérez jusqu'à ce que les valeurs des indicateurs se stabilisent (5 à 10 itérations suffisent la plupart du temps).

Si le processus ne converge pas, c'est probablement qu'il y a un problème au niveau des interconnexions ou de la propagation du débit : il peut être nécessaire d'imposer le débit de l'une des transfos, notamment dans les différentes boucles.

Si vous sélectionnez l'option "verrouillé", le mécanisme d'invalidation est bloqué, ce qui signifie que, lorsqu'un élément est recalculé, il reste validé, même si l'un de ses prérequis est invalidé. Cela permet de terminer le processus de recalcul en quelques itérations.



## Analyses de sensibilité

Un écran particulier permet d'effectuer des analyses de sensibilité simples. Il se présente comme suit :

**Afficher les éléments modifiables**

nom	type
gaz naturel	point
injection eau	point
3	point
comburant	échange
injection eau	échange

**échange | injection eau**

**débit | valeur initiale : 0,1**

valeur minimale : 0

valeur maximale : 0,25

incrément : 0,05

nombre maximum de recalculs : 10

valeur de test : 0,01

ANALYSE DE SENSIBILITE  
projet STIG  
7 juin 2000 19 h 12 GMT+02:00

échange | injection eau

débit	utile	payante	itérations	précision
0	279,23	829,92	2	0
0,05	340,9	917,81	2	0
0,1	402,52	1005,7	2	0
0,15	464,02	1093,58	2	0
0,2	525,48	1181,47	2	0
0,25	586,9	1269,35	2	0

**Itérer** **Fermer**

Une table située dans la partie supérieure gauche permet d'afficher les trois types d'éléments suivants, et de modifier les variables indiquées :

- des pressions imposées (pression)
- des points sans pré requis (température)
- des transfos à débit imposé (débit)

Lorsqu'on clique sur le bouton "Afficher les éléments modifiables", la liste des éléments correspondants du projet en cours est affichée. Pour sélectionner l'un d'entre eux, il suffit de double-cliquer sur la ligne correspondante, ce qui affiche sa fenêtre.

Le type et le nom de l'élément sélectionné sont affichés en bleu en haut à droite, et, juste en dessous, apparaît le nom de la variable modifiable, et sa valeur initiale.

Les trois champs situés en dessous permettent de définir la valeur minimale, la valeur maximale et l'incrément à utiliser pour réaliser l'analyse de sensibilité sur cette variable.



On notera qu'aucun test de cohérence n'est effectué sur le paramétrage de l'étude de sensibilité. Il revient à l'utilisateur de s'assurer de la pertinence de ses choix.

Un peu plus bas, deux champs servent à définir le nombre de recalculs maximum, et la précision recherchée. Le test de précision est fait sur la somme Delta des valeurs absolues des écarts entre les énergies utile et payante obtenues pour deux recalculs successifs. Si Delta est inférieure à la précision spécifiée, le calcul est arrêté.

Une fois ces paramètres indiqués, l'analyse de sensibilité est initiée en cliquant sur le bouton "Itérer". Les résultats sont résumés dans le champ de texte situé dans la partie centrale, sous forme d'un tableau fournissant la valeur de la variable modifiée, les énergies utile et payante, le nombre d'itération, et la valeur de Delta.

L'ensemble de ces valeurs est aussi écrit dans le fichier "sensit.txt" du sous-répertoire "res".

Dans l'exemple ci-dessus, on a examiné l'influence du débit d'injection de vapeur sur les performances d'une turbine à gaz à injection de vapeur.

Précisons les raisons qui ont conduit au choix des variables modifiables : pressions imposées (pression), points sans pré requis (température) et transfos à débit imposé (débit).

Le choix des premières est naturel : l'intérêt des pressions imposées est de permettre de faire varier simultanément la pression dans une portion de cycle. Un test de sensibilité sur ces pressions présente donc beaucoup d'intérêt.

Le choix des points sans pré requis s'explique parce que ce sont des points dont l'état ne changera pas, sauf si la composition de leur corps varie. A priori donc, ce sont des invariants du système, non affectés par le calcul des autres éléments. Pouvoir en faire varier la température se justifie bien dans le cadre d'une analyse de sensibilité.

Le même raisonnement s'applique aux transfos à débit imposé. La seule manière d'étudier l'influence de ce débit sur les performances du système est d'inclure ces transfos dans les éléments modifiables.

## Méthodologie de construction et de vérification des modèles

Grâce à leurs puissants environnements de modélisation, les simulateurs comme Thermoptim permettent d'élaborer rapidement des modèles de systèmes énergétiques parfois très complexes. Ils peuvent ainsi conduire à des gains de productivité considérables, mais à une condition, c'est d'être judicieusement utilisés, ce qui demande d'éviter un certain nombre de pièges que leur apparente facilité d'emploi peut masquer.

Pour tirer véritablement parti de leur potentiel, il faut prendre un certain nombre de précautions, ou, si l'on préfère, il faut adopter une bonne méthodologie de construction et de vérification des modèles. L'objet de cette note est de fournir aux utilisateurs de Thermoptim un certain nombre de recommandations basées sur l'expérience passée.

### Réfléchir avant de commencer la saisie du modèle

Une des erreurs les plus communément commises par les débutants consiste à démarrer la réalisation de leur modèle avant d'avoir vraiment bien réfléchi à ce qu'ils veulent faire : ils ouvrent le logiciel et commencent à construire un schéma sans très bien savoir où ils vont.

Il est fondamental de commencer par bien comprendre le problème posé : de quoi s'agit-il, quels résultats faut-il obtenir, de quelles informations dispose-t-on, quelles sont celles qui manquent, quels composants thermodynamiques faut-il mettre en œuvre, selon quelle architecture globale, quels sont les fluides de travail, y a-t-il des changements d'état, des réactions chimiques (combustion...), les composants du noyau de Thermoptim suffisent-ils pour représenter leurs évolutions... Il est souvent à ce stade nécessaire de reformuler voire de transformer l'énoncé initial du problème, et la feuille de papier ou le tableau noir sont les bons supports pour ce travail.

Une fois le problème défini, on cherchera si possible à en réduire la complexité en commençant par le décomposer en parties plus simples, puis à dégrossir la solution en recourant à des hypothèses simplificatrices

permettant une approche analytique de chacune des parties (gaz parfait) et en procédant à des analyses dimensionnelles, afin d'avoir une première idée des ordres de grandeur des débits et des énergies mis en jeu.

## **Construire le modèle en plusieurs étapes, et effectuer les calculs pas à pas**

Ce n'est qu'après ce travail préliminaire que l'on commencera à construire le modèle dans Thermoptim, en procédant si possible par itérations : résoudre les différents sous-problèmes identifiés préalablement et vérifier la cohérence des résultats obtenus pour chacun d'entre eux (notamment les bilans de masse et d'énergie), construire si nécessaire des composants externes, puis assembler le modèle complet, et vérifier sa validité.

Lors de la construction du modèle, il est recommandé de conserver des sauvegardes des différentes versions des fichiers de projet et de schéma, à la fois en cas de perte de données dues à une erreur de saisie, du progiciel ou de l'ordinateur, mais aussi pour pouvoir revenir en arrière si nécessaire.

Il importe aussi de documenter du mieux possible le modèle, tant de manière globale que dans certains détails. Les différents types primitifs de Thermoptim, excepté les corps, disposent d'un champ de commentaires qui permet de donner quelques indications sur la signification d'un paramétrage, le rôle d'un point ou d'une transfo... Dans l'éditeur de schémas, on peut facilement ajouter du texte, pour distinguer les principaux groupes de composants représentant des parties du modèle. Le travail de documentation est toujours plus facile à faire lorsque le modèle vient d'être réalisé que plusieurs mois plus tard. Il est beaucoup plus aisé de se replonger dans un modèle documenté qui garde trace des choix effectués, que de chercher à se les remémorer ultérieurement.

Tant que votre modèle n'a pas été bien vérifié (étape suivante), il est préférable de ne pas utiliser le moteur de recalcul automatique, et d'effectuer les calculs pas à pas, composant après composant, en suivant la logique d'écoulement des fluides mis en jeu. En opérant de la sorte, vous ne propagerez pas automatiquement des erreurs qui risqueraient de fausser tous vos paramétrages.

## **Réinitialiser Thermoptim après avoir construit un modèle un peu complexe**

Malgré toutes les précautions prises dans l'élaboration du progiciel, l'expérience montre que le simulateur peut présenter des comportements anormaux, notamment en matière de gestion du recalcul automatique, lorsque l'on construit un modèle pour la première fois, mais que ces anomalies disparaissent lorsque l'on procède à une réinitialisation complète.

Prenez donc l'habitude, lorsque vous créez un nouveau modèle, notamment si vous repartez d'un modèle existant en ajoutant et supprimant des composants ou en en renommant, de sauvegarder votre travail, c'est-à-dire les fichiers de projet et de schéma, puis quittez Thermoptim. Rouvrez-le et rechargez votre modèle. Vous serez certains ainsi d'éliminer les problèmes liés à la construction initiale.

## **Comment renommer des éléments d'un projet existant**

Repartir d'un modèle existant et le modifier est une manière très économique d'opérer, mais certaines précautions doivent être prises si l'on ne veut pas passer de longues heures à tester le nouveau modèle. En particulier, il est nécessaire de procéder avec précautions aux renommages des corps, points et composants. Il est fortement recommandé d'utiliser pour cela la fonction "Renommer" (Ctrl R) accessible à partir du gestionnaire de corps (voir plus loin) pour les premiers, et de l'éditeur de schémas pour les autres, car elle effectue la modification non seulement dans le type primitif sélectionné, mais aussi dans tous ceux qui lui sont logiquement reliés.

## **Tester le modèle très soigneusement avant de l'exploiter**

Pour peu que le modèle mette en jeu un nombre significatif de composants, les risques d'erreur sont multiples :

- erreurs de représentation de l'architecture globale
- erreurs de connexions des points aux transfos
- erreurs de paramétrage logique ou thermodynamique des composants

Il est donc nécessaire de tester avec un très grand soin le modèle, en vérifiant que sa structure est bonne et que ses résultats sont cohérents, notamment avec les ordres de grandeur mis en évidence lors des réflexions initiales. Thermoptim effectue déjà diverses vérifications de cohérence lors de la saisie, et affiche des messages lorsqu'il détecte une anomalie, mais il existe beaucoup d'erreurs que seul le concepteur du modèle peut repérer.

Pour faciliter cette étape délicate et difficile, le progiciel met à la disposition des utilisateurs diverses fonctionnalités (interface Schéma/Simulateur, gestionnaire de corps, diagrammes interactifs), et propose de plus, à partir de la version standard, des outils de diagnostic, accessibles à partir du menu Spécial de la fenêtre principale du projet.

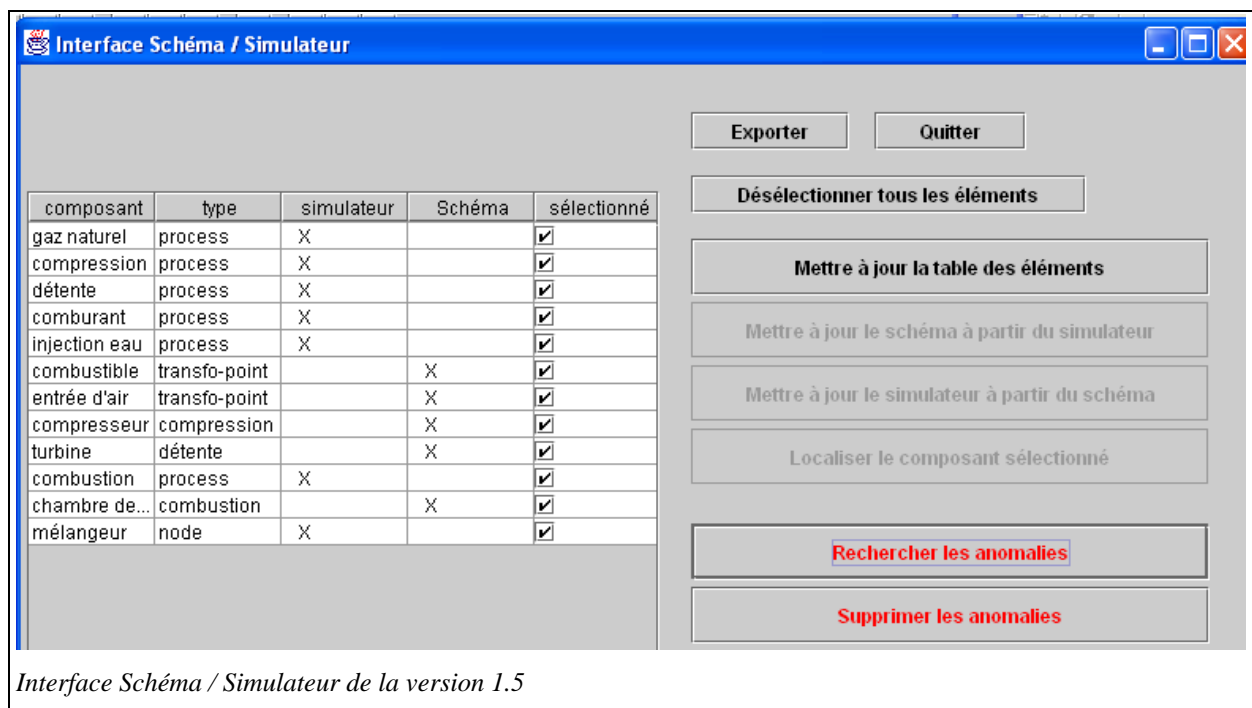
## Recherche des anomalies de modélisation

Afin de permettre de diagnostiquer les différences existant entre l'éditeur de schémas et le simulateur, l'interface a été complétée dans la version 1.5 par deux boutons rouges, permettant d'une part de rechercher des anomalies de modélisation, et d'autre part de supprimer celles qui sont sélectionnées (dernière colonne cochée).

Par anomalies de modélisation, on entend :

- les éléments du simulateur absents de l'éditeur de schémas
- les éléments de l'éditeur de schémas absents du simulateur
- les points non reliés présents dans le simulateur
- les corps non utilisés

La mise en œuvre de ces nouvelles fonctionnalités se fait de manière tout à fait analogue à celle des précédentes : en cliquant sur le bouton "Rechercher les anomalies", l'ensemble des éléments douteux est affiché dans la liste. Un clic sur le bouton "Supprimer les anomalies" vous propose de supprimer les éléments sélectionnés uniquement.



On notera qu'une fois certains éléments supprimés, de nouvelles anomalies peuvent apparaître, comme des points non reliés qui l'étaient auparavant, ou des corps inutilisés qui l'étaient avant suppression de points. Il peut donc être nécessaire d'itérer pour que toutes les anomalies soient supprimées.

Pour éviter toute opération malencontreuse, les boutons de mise à jour du simulateur et de l'éditeur de schémas sont désactivés lorsque l'on clique sur celui de recherche des anomalies, et celui de suppression des anomalies lorsqu'on utilise l'interface de manière habituelle.

## Gestionnaire de corps

Le Gestionnaire des corps, accessible à partir du menu Spécial du simulateur (sauf dans la version de démonstration), permet d'afficher tous les corps utilisés par le projet. Si vous cliquez sur une des lignes, les points associés à ce corps s'affichent dans la table du dessous. Une vérification des corps mis en jeu dans le projet et des points qui leur sont associés peut ainsi être effectuée facilement.

Si un corps n'est relié à aucun point, il est possible de le supprimer. Si une ligne est sélectionnée et que vous cliquez sur "Afficher les propriétés du corps", sa composition s'affiche si c'est un gaz, et ses paramètres caractéristiques si c'est une vapeur.

Il permet aussi de remplacer un corps dans l'ensemble d'un projet par exemple pour tester l'influence d'un changement de corps (utiliser par exemple des gaz parfaits au lieu de gaz idéaux peut vous permettre de retrouver des résultats analytiques).

Vous ne pouvez renommer un corps qu'à condition qu'il ne s'agisse pas d'une vapeur. Bien évidemment, le nouveau nom ne doit pas être celui d'un gaz pur ou protégé, ni celui d'une vapeur.

## Diagrammes interactifs

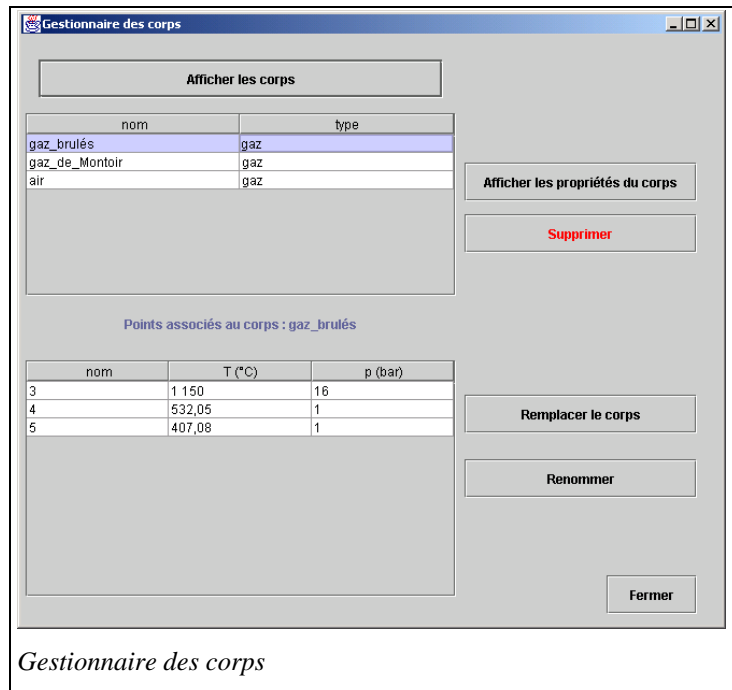
Tracer un cycle dans plusieurs diagrammes interactifs est souvent une manière très efficace d'effectuer une vérification du paramétrage des différentes transformations qu'il met en jeu : des erreurs sur les pressions ou les températures se traduisent par des tracés inhabituels qui font "sauter aux yeux" certaines erreurs.

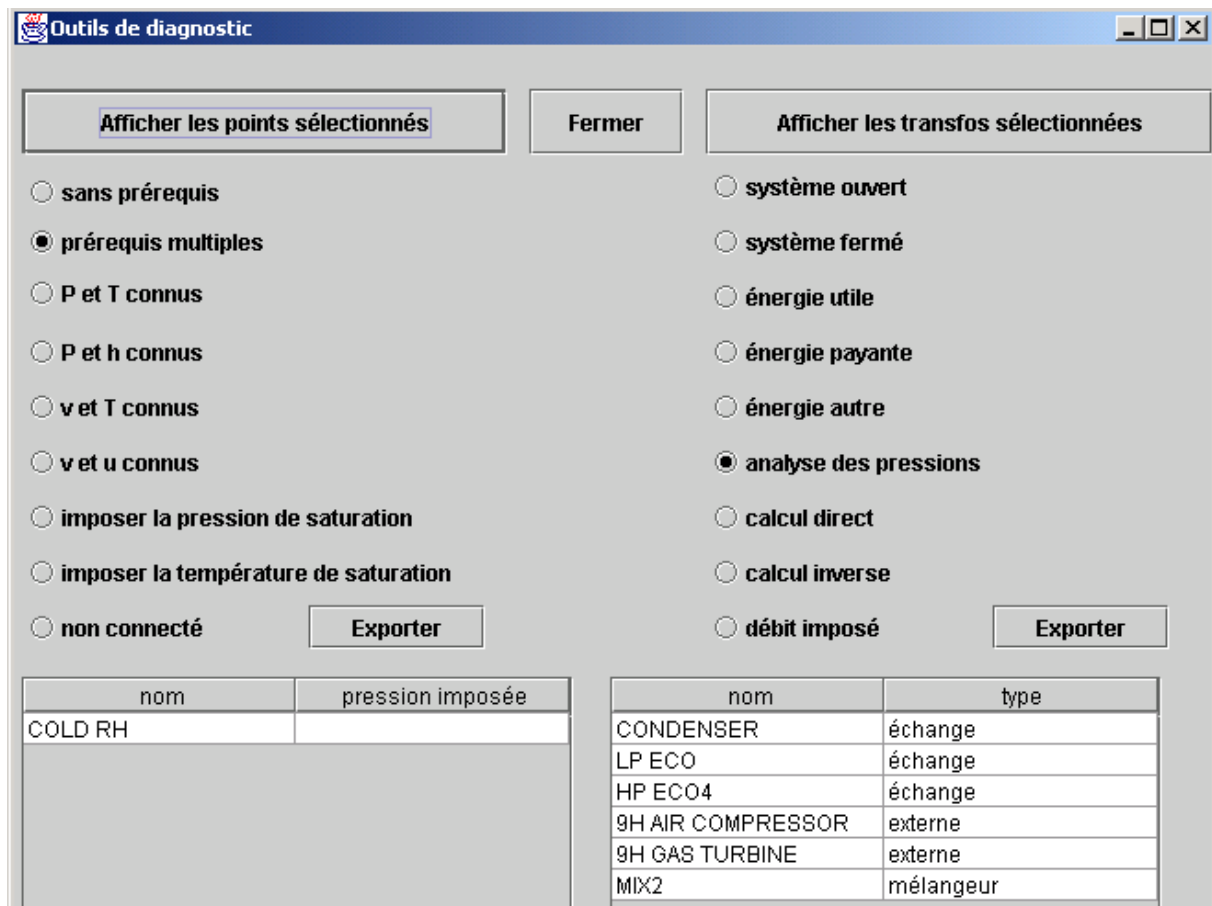
## Outils de diagnostic

Il est recommandé de commencer les tests en utilisant ces outils pour bien vérifier que par mégarde le paramétrage d'un des points ou d'une des transfos ne soit pas erroné (du fait d'une erreur de clic tout simplement). Examinez en particulier les modes de calcul (direct, inverse, en système ouvert ou fermé...), les types d'énergie qui conditionnent l'établissement du bilan...

Pour les points les options de recherche sont les suivantes :

- **sans pré requis** autre que le corps qui leur est associé ou une pression imposée : ces points ne sont en principe jamais modifiés par le progiciel, sauf si la composition du corps associé varie ou si la pression imposée est modifiée. Ce sont donc des paramètres d'entrée du modèle.
- **pré requis multiples** : si un point a plusieurs pré requis, cela signifie qu'il peut être modifié par plusieurs composants. C'est généralement parce que, lors de la modélisation, il a été connecté par erreur soit en sortie de deux transfos différentes, soit en sortie d'une transfo et en entrée de la transfo principale d'un mélangeur. Des explications complémentaires sont données plus loin.
- calculés en **système ouvert avec soit p et T, soit p et h connus**.
- calculés en **système fermé avec soit v et T, soit v et u connus** ;
- à **pression de saturation imposée** ou à **température de saturation imposée** ;
- **non connectés** à une transfo : ces points ne sont pas utilisés et doivent généralement être supprimés. On notera que lors de la suppression d'une transfo, les points sont conservés pour éviter de perdre leur paramétrage et pour permettre de les réutiliser avec d'autres transfos.





**Outils de diagnostic**

**Afficher les points sélectionnés**      **Fermer**      **Afficher les transfos sélectionnées**

☐ sans prérequis  
☒ **prérequis multiples**  
☐ P et T connus  
☐ P et h connus  
☐ v et T connus  
☐ v et u connus  
☐ imposer la pression de saturation  
☐ imposer la température de saturation  
☐ non connecté      **Exporter**

nom	pression imposée
COLD RH	

☐ système ouvert  
☐ système fermé  
☐ énergie utile  
☐ énergie payante  
☐ énergie autre  
☒ **analyse des pressions**  
☐ calcul direct  
☐ calcul inverse  
☐ débit imposé      **Exporter**

nom	type
CONDENSER	échange
LP ECO	échange
HP ECO4	échange
9H AIR COMPRESSOR	externe
9H GAS TURBINE	externe
MIX2	mélangeur

Pour les transfos les options de recherche sont les suivantes :

- **système ouvert ou fermé** ;
- type **d'énergie utile, payante ou autre** ;
- **analyse des pressions** : dans Thermoptim, les pressions sont initialisées par défaut à 1 bar, puis c'est à l'utilisateur de fixer leurs valeurs, le progiciel ne le faisant que dans un très petit nombre de cas. Si l'utilisateur oublie de le faire ou commet une erreur, des problèmes de convergence peuvent apparaître. Cette option recherche **d'une part toutes les transfos** autres que des compressions, des détentes ou des laminages dans lesquelles la pression de sortie est soit supérieure à celle d'entrée (impossibilité physique sauf pour certaines transfos externes), soit inférieure à 80 % de la pression d'entrée (perte de charge sans doute démesurée), et **d'autre part tous les nœuds** à travers lesquels la pression augmente (impossibilité physique sauf pour certains nœuds externes) ;
- **calcul direct ou inverse** ;
- à **débit imposé** : cette option facilite la vérification de la cohérence de la propagation des débits dans les projets un peu complexes.

Par exemple, sur la copie d'écran ci-dessus, il y a 1 point avec pré requis multiples, et la partie droite de l'écran montre le résultat d'une analyse des pressions.

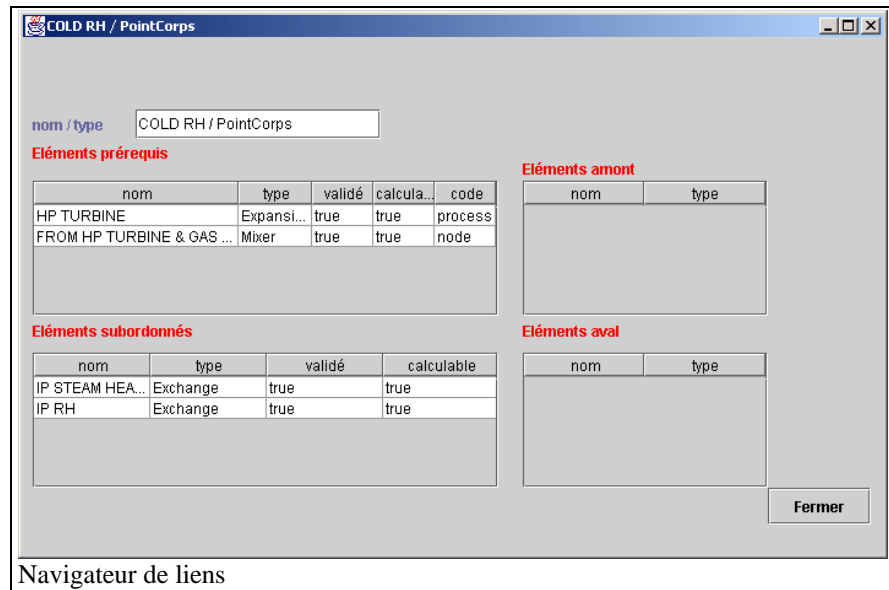
### Point avec pré requis multiples

Un double-clic sur la ligne du point "COLD RH" de la figure suivante affiche son écran et donne ainsi accès à sa fenêtre des **liens**.

Les navigateurs de liens ont été créés pour analyser les liens logiques qui existent entre les différents éléments d'un projet. Ils permettent d'afficher quatre tables qui résument les liens entre un type donné et les autres. On y accède en cliquant sur le bouton "liens" du type primitif.

L'étude des éléments prérequis montre que "COLD RH" est à la fois défini comme point de sortie de la turbine "HP TURBINE", et comme point d'entrée de la transfo principale du mélangeur "FROM HP TURBINE & GAS...", ce qui correspond à une erreur de modélisation, dont la détection eût été difficile sans l'outil de diagnostic.

### Analyse des pressions



L'analyse des pressions a identifié six composants éventuellement mal paramétrés. En double-cliquant sur la table de droite, leurs écrans peuvent être affichés. L'examen des trois premiers montre que la pression de sortie avait été arrondie supérieurement, l'erreur étant négligeable.

Les deux composants suivants sont des transfos externes correspondant à un compresseur et une turbine non adiabatiques ; il est donc parfaitement normal que la pression aval du premier soit supérieure à sa pression amont, et que la pression aval du second soit inférieure à 80 % de sa pression amont.

Quant au mélangeur "MIX2", son examen montre que la pression amont de sa transfo principale est supérieure aux pressions aval de ses branches, ce qui est une erreur manifeste de paramétrage.

L'outil de diagnostic a ainsi identifié trois erreurs négligeables, deux changements de pression normaux dans des transfos externes, et une erreur de paramétrage en sortie d'un mélangeur. Le projet mettant en jeu une soixantaine de points et transfos ainsi qu'une quinzaine de nœuds, le dépistage de ces erreurs aurait été difficile sans cet outil.

### Tester le recalcul automatique

Si tout se présente bien après ces vérifications, sauvegardez bien votre modèle, puis testez-le en mode de recalcul automatique. Cette étape, nous l'avons dit, ne doit pas être effectuée trop tôt, avec un modèle qui n'aurait pas subi les tests précédents. En revanche, un modèle sans erreur se recalcule sans difficulté, et le moteur de recalcul permet de réaliser diverses analyses de sensibilité qui se révèlent très utiles pour juger de sa validité.

Si vous désirez que les débits soient propagés automatiquement, vérifiez que l'option "débit auto" est sélectionnée, que les transfos à débit imposé sont bien spécifiées, et testez la cohérence de votre modèle en utilisant les outils de diagnostic.

Une fois que vous avez bien vérifié le modèle, ouvrez l'écran des outils de recalcul, et cliquez sur le bouton "Recalculer" si le nombre de types calculables n'est pas nul. Sinon, il faut que vous calculiez d'abord un élément situé en amont du système.

Lorsque vous utilisez le moteur de recalcul automatique, les types invalidés calculables sont calculés à leur tour, éventuellement en parallèle. Dès qu'un type est calculé, il invalide ses subordonnés, rendant le processus itératif. Quand tous les types qui étaient initialement calculables sont recalculés, le bilan global est effectué et les valeurs des indicateurs sont mises à jour. Généralement, de nouveaux types ont été invalidés. Itérez jusqu'à ce que les valeurs des indicateurs se stabilisent (5 à 10 itérations suffisent la plupart du temps).

Si le processus ne converge pas, c'est probablement qu'il y a un problème au niveau des interconnexions ou de la propagation du débit : il peut être nécessaire d'imposer le débit de l'une des transfos, notamment dans les différentes boucles.

A partir de la version Professionnelle, l'écran de la méthode d'optimisation permet d'automatiser la répétition des recalculs avec des critères d'arrêt liés à la convergence du modèle.

Si vous sélectionnez l'option "verrouillé", le mécanisme d'invalidation est bloqué, ce qui signifie que, lorsqu'un élément est recalculé, il reste validé, même si l'un de ses pré requis est invalidé. Cela permet de terminer le processus de calcul en quelques itérations.

Si des difficultés apparaissent lors des recalculs automatiques, c'est généralement soit que le paramétrage thermodynamique n'est pas bon, soit que le modèle lui-même doit être revu.

## Contrôler le débit

Pouvoir contrôler le débit est très important en pratique. Dans Thermoptim, ce contrôle est effectué par les nœuds et par les connexions entre transfos.

Dans les mélangeurs et les séparateurs, la propagation du débit est assez simple : dans un mélangeur le débit de la veine principale est la somme de ceux des branches, et dans un séparateur il dépend du titre de la vapeur en entrée et de l'efficacité de séchage.

Dans un diviseur, la distribution du débit de la veine principale entre les différentes branches est généralement faite proportionnellement à leurs facteurs de débit. Une exception existe cependant : il est possible d'imposer le débit dans une transfo en sortie d'un diviseur, à condition que ce diviseur n'ait que deux branches : celle à débit imposé et une autre. Dans ce cas, le débit de la deuxième transfo est égal au débit dans la veine principale moins celui de la branche où il est imposé, et les facteurs de débit des deux branches sont recalculés pour correspondre à cette répartition.

Pour propager automatiquement le débit entre des transfos, certaines règles doivent être respectées :

- tout d'abord, la connexion entre les deux transfos doit être sans ambiguïté. Si le point qui les relie est aussi connecté à une troisième transfo, le problème devient beaucoup complexe, et ne peut être résolu que s'il existe un schéma dans lequel la connexion valide est la seule (ce point est discuté plus en détail plus loin).
- deuxièmement, le mécanisme de propagation automatique du débit doit être activé en sélectionnant la boîte à cocher "débit auto" située près du bouton "Recalculer" déjà mentionné.
- troisièmement, on peut désirer simultanément activer le mécanisme de propagation automatique du débit dans la plupart des transfos, et le désactiver dans certaines. C'est notamment utile lorsque le réseau comporte des boucles. Pour cela, on peut sélectionner ou non l'option "débit imposé" qui est placée dans l'écran des transfos à côté du champ "Delta H". Lorsque l'option "débit imposé" d'une transfo est sélectionnée, son débit n'est pas modifié, sauf si elle est connectée à un nœud (à l'exception du diviseur à débit imposé mentionné plus haut).