

# Guide d'usages pédagogiques des ressources du portail Thermoptim-

RENAUD GICQUEL



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>I - Première partie : Problématique pédagogique et ressources développées</b>	<b>9</b>
A. Introduction à la première partie.....	9
B. 1 Problématique pédagogique.....	10
C. 2 Fondements méthodologiques.....	11
D. 3 Ressources numériques proposées dans le portail Thermoptim-UNIT.....	14
E. 4 Scénarios COMPETICE.....	23
<b>II - Seconde partie : Activités pédagogiques d'initiation</b>	<b>27</b>
A. Présentation générale de la seconde partie.....	27
B. 1 Fonctionnement des composants.....	29
C. 2 Etude d'une centrale électrique à vapeur.....	33
D. 3 Etude d'une turbine à gaz.....	52
E. 4 Etude d'un réfrigérateur domestique.....	74
<b>III - Troisième partie : activités pédagogiques de consolidation</b>	<b>95</b>
A. 1 Exercices.....	96
B. 2 Echangeurs de chaleur.....	97
C. 3 Cycles combinés à un niveau de pression.....	97
D. 4 Fiches thématiques.....	98
E. 5 Utilisation des classes externes.....	99
F. 6 Fiches-guides de TD.....	99
G. 7 Guides méthodologiques.....	102
<b>IV - Quatrième partie : activités pédagogiques d'approfondissement</b>	<b>107</b>

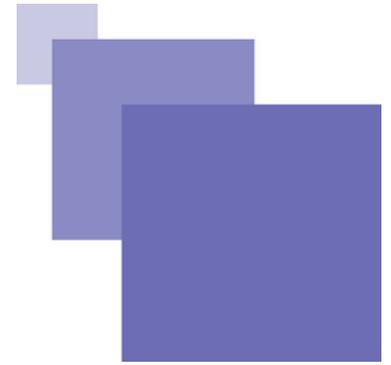
---

A. 1 Fiches thématiques.....	107
B. 2 Fiches-guides de TD.....	108
C. 3 Guides méthodologiques.....	109
D. 4 Fils d'Ariane pédagogiques.....	110

**V - Cinquième partie : présentation allégée des cycles thermodynamiques** **111**

A. 1 Architecture des machines étudiées.....	112
B. 2 Quatre fonctions élémentaires.....	115
C. 3 Notions de système thermodynamique et d'état.....	115
D. 4 Echanges d'énergie entre un système thermodynamique et l'environnement .....	116
E. 5 Conservation de l'énergie : premier principe de la thermodynamique.....	116
F. 6 Application aux quatre fonctions élémentaires identifiées précédemment...	118
G. 7 Evolutions de référence.....	119
H. 8 Rappels succincts sur les propriétés des corps purs.....	120
I. 9 Retour sur la notion d'état, choix des variables d'état à considérer.....	120
J. 10 Diagrammes thermodynamiques.....	121
K. 11 Représentation graphique de cycles dans le diagramme (h, ln(P)).....	123
L. Conclusion.....	128

# Introduction



Considérée jusqu'ici comme particulièrement difficile par des générations d'étudiants et d'ingénieurs, la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques dispose désormais d'une méthode d'apprentissage originale et extrêmement simplifiée basée sur une reconception radicale de la pédagogie de la discipline et sur deux outils faisant partie de ce que l'on appelle aujourd'hui communément les TICE (Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement). L'une est spécifique de la discipline, le simulateur Thermoptim, tandis que l'autre est beaucoup plus générique : les modules de formation à distance sonorisés Diapason (Diaporamas Pédagogiques Animés et Sonorisés).

Thermoptim permet quant à lui de modéliser très simplement les systèmes énergétiques, tandis que les modules Diapason donnent accès à tout moment aux explications orales de l'enseignant sur des questions relatives tant à la théorie et à la technologie qu'à la mise en œuvre pratique du simulateur.

Leur utilisation conjointe permet de recourir à des approches pédagogiques qui rencontrent un grand succès auprès des élèves, alors que celles qui sont classiquement mises en œuvre sont généralement décriées.

Thermoptim et la nouvelle approche pédagogique qu'il rend possible ont progressivement diffusé dans l'enseignement supérieur, en France et dans le monde, de telle sorte qu'on a pu estimer qu'en 2008, plus de 120 établissements et plus de 7 000 élèves l'ont utilisé, pour un total d'environ 57 000 heures-élèves. Il peut être employé aussi bien en formation initiale qu'en formation continue par des ingénieurs en activité désireux d'actualiser leurs connaissances sur les systèmes énergétiques classiques ou innovants, notamment à faible impact environnemental.

L'intérêt qu'il a suscité au cours des années a justifié la mise au point de nombreuses ressources numériques y faisant appel, qui sont aujourd'hui rassemblées dans ce portail .

Sur la base des retours d'utilisation des élèves qui ont travaillé avec cette méthode, il est apparu souhaitable de graduer la progression en trois grandes étapes :

1. **l'acquisition des concepts et des outils**, consacrée aux rappels de thermodynamique, à l'étude des cycles de base, à la découverte des technologies mises en œuvre et à l'apprentissage de Thermoptim ;
2. **la consolidation des notions vues lors de la première étape**, avec quelques compléments théoriques comme par exemple sur les échangeurs et l'exergie, l'étude des variantes des cycles de base, des cycles combinés et de la cogénération ;
3. **les approfondissements et la mise en application personnelle**, donnant lieu à l'étude de cycles novateurs et/ou plus complexes que les précédents ainsi qu'à des réflexions sur les perspectives technologiques, à l'occasion de mini-projets menés seuls ou en groupes.

Les deux premières étapes sont en quelque sorte standard : elles permettent à un élève d'acquérir, dans le cadre d'un parcours très balisé, les bases de la discipline. En auto-formation, elles peuvent reposer essentiellement sur les séances Diapason qui le guident pas à pas dans les premières leçons, d'une part en lui présentant les technologies et un minimum de théorie, et d'autre part en lui expliquant comment mettre en œuvre le simulateur pour étudier les cycles de base.

Au fur et à mesure que sa culture du domaine et sa compréhension de la discipline se

---

développent, l'élève gagne en autonomie et peut utiliser des ressources numériques complémentaires de Thermoptim et des modules Diapason, comme les fiches thématiques de composants et systèmes et les fiches-guides de TD, ainsi que de nombreux exercices. Au cours de la troisième étape, il peut vraiment personnaliser son cursus en fonction de ses centres d'intérêt et de ses aspirations.

Ce guide d'usages pédagogiques a pour objectif d'expliquer comment ces ressources peuvent être utilisées dans l'enseignement. Il est divisé en cinq grandes parties.

La première présente la problématique pédagogique et les ressources développées.

Les trois suivantes fournissent des illustrations concrètes d'activités pédagogiques les utilisant, appliquées aux centrales à vapeur, aux turbines à gaz et aux machines de réfrigération, en suivant les trois grandes étapes mentionnées ci-dessus :

- initiation ;
- consolidation ;
- approfondissement.

La seconde partie est la plus développée dans ce guide car c'est elle qui permet d'acquérir les connaissances de base qui constitueront les fondements pour la suite.

Elle joue un rôle critique en ce sens qu'elle conditionne la compréhension des notions sur lesquelles s'appuieront les activités de consolidation et d'approfondissement présentées ultérieurement.

Au cours de cette phase d'acquisition des concepts et des outils, l'expérience montre qu'il est préférable que les élèves suivent pas à pas les étapes qui leur sont proposées et que nous avons cherché à expliciter le plus possible dans cette partie.

Dans la suite, ayant structuré leurs connaissances, les apprenants deviennent de plus en plus autonomes et le séquençement des activités pédagogiques prend moins d'importance.

Toutefois, le temps de travail des élèves n'est pas du tout proportionnel à la taille des sections de ce guide : certaines activités de consolidation et surtout d'approfondissement peuvent les mobiliser pendant de très longues durées, car elles représentent des investissements personnels significatifs.

La cinquième partie propose une présentation allégée des cycles thermodynamiques élémentaire destinée à des apprenants en formation professionnelle dont les connaissances initiales en thermodynamique sont succinctes. Elle présente la particularité de ne pas faire appel à la notion d'entropie, souvent difficile à bien comprendre pour les débutants, et constitue un sous-ensemble d'une **note de présentation plus complète** <sup>1</sup> à laquelle vous pouvez vous référer si vous le souhaitez.

Il est clair que l'utilisation qui peut être faite de ces ressources est beaucoup plus diversifiée que les quelques pistes qui sont proposées dans ce guide, et qu'elles peuvent être enchaînées de nombreuses manières qu'il n'était pas possible de décrire toutes ici.

Notre ambition est donc juste de présenter quelques scénarios d'usage cohérents en indiquant à quelle catégorie d'apprenants ils peuvent a priori s'adresser. Chaque enseignant pourra ensuite définir son propre usage personnalisé, en fonction du contexte dans lequel il travaille et de son parti-pris pédagogique.

Tout comme un certain nombre de collègues y ont déjà contribué, les pages de ce portail sont ouvertes à ceux qui souhaiteraient partager leur approche avec la communauté d'enseignants.

Les principales références, valables pour l'ensemble du document, sont données ci-dessous.

### Références

[1] GICQUEL, R. Systèmes Energétiques, tome 1 : méthodologie d'analyse, bases de thermodynamique, Thermoptim, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, janvier 2009.

[2] GICQUEL, R. Systèmes Energétiques, tome 2 : Applications, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, janvier 2009.

1 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/pedagogie/presentation-pedagogique>

- 
- [3] GICQUEL, R. Systèmes Energétiques, tome 3 : cycles et modélisations avancés, systèmes innovants a faible impact environnemental, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, janvier 2009.
- [4] GICQUEL, R. Utilisation pédagogique des simulateurs : Volet 1 : éclairages de la didactique, Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie, n° 868, novembre 2004.
- [5] GICQUEL, R. Utilisation pédagogique des simulateurs : Volet 2 : application à l'enseignement de la thermodynamique, Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie, n° 869, décembre 2004.
- [6] SWELLER, J. Cognitive technology: Some procedures for facilitating learning and problem solving in mathematics and science. Journal of Educational Psychology, 81 (4), 457-466, 1989.
- [7] GICQUEL, R. Le progiciel Thermoptim, une boîte à outils pour l'énergétique, Techniques de l'Ingénieur, Génie Energétique, BE 8047, 2009.



# Première partie : Problématique pédagogique et ressources développées

Introduction à la première partie	9
1 Problématique pédagogique	10
2 Fondements méthodologiques	11
3 Ressources numériques proposées dans le portail ThermoOptim-UNIT	14
4 Scénarios COMPETICE	23

## A. Introduction à la première partie

Dans la **première section**, nous commencerons par rappeler brièvement la problématique pédagogique dont nous sommes partis, puis nous montrerons dans la **seconde** les solutions que nous avons développées pour dépasser les difficultés rencontrées.

Dans la **troisième section**, nous détaillerons les différentes ressources pédagogiques mises à disposition de la communauté des enseignants et des élèves dans le portail ThermoOptim-UNIT, en commençant par les deux principales, ThermoOptim et les modules Diapason, qui sont comme nous l'avons vu deux TICE innovantes.

L'existence des TICE, qui se sont généralisées depuis environ deux décennies, induit de nombreuses évolutions dans les pratiques pédagogiques. Leur introduction étant encore assez récente, la typologie des modalités relatives à leur utilisation est encore loin d'être figée, et des difficultés de vocabulaire et de définition peuvent apparaître lorsqu'on cherche à s'y référer.

Dans ce qui suit, nous nous appuyerons sur les catégories recensées par l'Education Nationale dans son site COMPETICE<sup>2</sup>, qui se veut un « outil de pilotage pour gérer les compétences des acteurs des projets TICE, campus numérique, e-learning, FOAD » (Formation Ouverte et A Distance).

La justification essentielle de ce choix est que le portail **COMPETICE<sup>2</sup>** met à disposition de tous les intervenants du système éducatif supérieur (administration, enseignants, équipes support, étudiants) une série de fiches cohérentes qui leur permet de se situer par rapport aux TICE et de faire évoluer leur pratique, en

2 - <http://www.educnet.education.fr/bd/competice/superieur/competice/index.php>

analysant les implications que peut avoir leur mise en œuvre sur toute une série de dimensions complémentaires, ce qui est rarement fait (en consultant le portail COMPETICE selon le parcours dit libre, les différentes fiches disponibles sont accessibles sans cheminement préétabli).

La **quatrième section** de cette première partie nous permettra ainsi de définir les cinq grands scénarios pédagogiques avec lesquels ces ressources peuvent être utilisées.

## B. 1 Problématique pédagogique

Notre démarche a pour origine les difficultés que nous avons rencontrées lorsque nous avons commencé à enseigner la discipline en école d'ingénieurs : nous nous sommes trouvés en situation d'échec vis à vis des objectifs que nous nous étions fixés et que les approches pédagogiques classiques ne pouvaient pas permettre d'atteindre, à savoir rendre nos élèves capables, à l'issue du cours, de s'attaquer aux défis actuels de l'énergétique : réduction de l'impact environnemental des technologies, amélioration des rendements dans des conditions économiques acceptables...

En caricaturant à peine, on pourrait dire que les approches classiques sont confrontées à un dilemme, les modèles auxquels elles conduisent étant soit irréalistes, soit incalculables. Compte tenu des difficultés qu'il y a à estimer avec précision les propriétés des fluides thermodynamiques, elles conduisent en effet généralement soit à faire des hypothèses un peu trop simplificatrices, soit à adopter des méthodes fastidieuses à mettre en pratique. Il en résulte deux écueils qui ont pour effet de démotiver les étudiants :

- les hypothèses de calcul étant trop simplistes, ils ne comprennent pas l'intérêt pratique des modèles qu'ils élaborent, ceux-ci étant très éloignés de la réalité ;
- les calculs précis des cycles étant fastidieux, ils sont rebutés par la discipline.

De surcroît, le temps consacré à la mise en équation des propriétés des fluides et du comportement des composants élémentaires représente l'essentiel du cours, de telle sorte que les élèves ne peuvent in fine travailler que sur les exemples de base de la discipline, sans aborder l'étude des cycles innovants, pour laquelle ils ne sont pas outillés sur le plan méthodologique.

Le renouveau pédagogique que nous avons introduit est basé sur un déplacement du savoir acquis par les élèves. La mise en équations des évolutions subies par les fluides est drastiquement réduite, les calculs étant effectués par le simulateur sans que les élèves aient besoin d'en connaître les détails. Ils consacrent en revanche l'essentiel du temps d'une part à l'apprentissage des technologies, et d'autre part à la réflexion sur les architectures des cycles thermodynamiques aussi bien classiques que novateurs, bâtissant graphiquement et paramétrant des modèles des diverses technologies énergétiques.

Ils peuvent dans ces conditions aller beaucoup plus loin qu'en suivant l'approche classique, et devenir vraiment opérationnels grâce à la maîtrise du simulateur. Leur motivation s'en trouve fortement augmentée.

## C. 2 Fondements méthodologiques

Chronologiquement, nous avons commencé par développer le progiciel ThermoOptim. Très rapidement, il est apparu que son utilisation induisait un changement radical dans l'attitude des élèves vis à vis de la discipline : nous

espérons une amélioration, mais sans imaginer qu'elle serait aussi nette. Pour tenter de comprendre l'accueil enthousiaste fait à cet outil à la fois par les élèves et par de nombreux collègues, nous avons mené quelques explorations sur la didactique des sciences et le cognitivisme. Considérant que les réponses à nos questions pourraient intéresser d'autres collègues, nous avons publié les résultats qui nous paraissaient les plus pertinents dans un article en deux volets du Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie [3, 4]. Dans ce qui suit, nous nous limiterons à présenter deux de ces résultats, dont l'influence vis à vis de nos propres développements a été la plus importante : le modèle RTM(E) [3] et la théorie de la charge cognitive due à Sweller [6].

## 2.1 Articulations des connaissances scientifiques : le modèle RTM(E)

Lorsqu'un enseignant veut définir le contenu de son enseignement, disposer d'une typologie adéquate pour décrire les connaissances à transmettre nous semble essentiel. Pour aborder ce sujet, la didactique met l'accent sur la distinction aujourd'hui classique entre **savoir (connaissances déclaratives)** et **savoir-faire (connaissances procédurales)**. Cette distinction est bien évidemment essentielle, mais elle est trop globale pour notre propos.

Faute d'avoir trouvé dans la littérature un modèle qui réponde pleinement à notre attente, nous en avons proposé un, appelé **RTM(E)**, dans lequel les connaissances à transmettre sont regroupées en quatre grandes catégories reliées entre elles, appelées la Réalité, la Théorie, les Méthodes (et les Exemples). Par Réalité, nous entendons le monde réel, tel qu'il existe concrètement, c'est-à-dire la nature et la technologie, les faits observés, la matière, le terrain...

L'étude de cette Réalité par l'observation, l'analyse et l'expérimentation, permet de développer ou d'affiner la Théorie, c'est-à-dire un schéma explicatif mettant en évidence les ressemblances entre les différentes observations de la Réalité, et les expliquant de manière à la fois cohérente et aussi simple et générique que possible. La Théorie d'une part constitue ainsi une grille de lecture de la Réalité, et d'autre part sert de guide pour l'élaboration de Méthodes (et/ou d'outils opérationnels) de résolution de problèmes, faisant si nécessaire appel à des concepts spécifiques.

Cette typologie nous paraît structurer de manière très féconde les connaissances relatives à une discipline scientifique, surtout si elle est complétée par les principaux Exemples d'application, qui illustrent très concrètement comment résoudre (grâce aux Méthodes et dans le cadre d'une Théorie) une classe de problèmes relative à un aspect particulier (de la Réalité). C'est en effet autour des Exemples que s'explicitent le plus clairement les liens qui existent entre ces trois pôles de référence (Réalité, Théorie, Méthodes). D'où leur importance fondamentale lors de l'apprentissage de la discipline. Il est en particulier indispensable que ces exemples soient réalistes et qu'ils montrent par quelles méthodes les théories sont mises en application. L'apprentissage d'une discipline scientifique suppose ainsi l'acquisition à la fois de connaissances déclaratives pour la Réalité et la Théorie, et de connaissances procédurales pour les Méthodes, qui correspondent essentiellement à du savoir-faire.

Nous allons maintenant montrer qu'il faut avant tout structurer les schèmes des élèves, en s'appuyant notamment sur les Exemples-clés de la discipline. Ce n'est qu'une fois que les bases sont bien acquises qu'il est possible d'approfondir les choses.

## 2.2 Théorie de la charge cognitive : privilégier une bonne structuration des connaissances

Sur la base d'une analyse détaillée des capacités de traitement de l'information de l'homme, Sweller a développé une théorie particulièrement intéressante à notre sens, appelée théorie de la charge cognitive. La mémoire de travail à court terme étant limitée (nous ne pouvons traiter simultanément que peu d'éléments et devons

leur attribuer un sens dans un temps très bref), les capacités humaines d'apprentissage sont réduites [6]. Pour contourner cette difficulté, deux mécanismes sont utilisés :

- l'acquisition des schèmes, c'est-à-dire la construction de modèles mentaux explicatifs appropriés, permet de décomposer l'information en éléments significatifs mémorisables ;
- une fois les schèmes bien structurés, l'automatisation des tâches (règles procédurales) résulte ensuite de la pratique. Elle permet de retenir les méthodes de travail appropriées.

De surcroît, des surcharges cognitives apparaissent lorsque trop d'informations disparates doivent être simultanément prises en compte par l'esprit. Il importe donc de simplifier autant que possible le contenu des matériaux éducatifs utilisés, et surtout d'éviter de présenter séparément des éléments qui ne peuvent être compris qu'ensemble. Eviter ce mécanisme, dit de "split attention", doit être un souci constant lorsque l'on développe des ressources pédagogiques numériques.

Si l'on se réfère à cette théorie, il est fondamental que les élèves commencent par structurer leurs connaissances : il faut tout faire pour les guider dans cette tâche, en étant conscient qu'elle n'est pas directement intuitive, et qu'il n'y a aucune raison pour qu'ils découvrent par eux-mêmes des schèmes adéquats. Il faut les expliciter et s'assurer qu'ils sont pertinents pour eux et non pas simplement pour des experts. On notera qu'il existe ici une petite difficulté dialectique : il est souhaitable que les élèves construisent par eux-mêmes leurs schèmes, mais ils ne peuvent cependant être livrés complètement à eux-mêmes. Il faut pour cela trouver des pédagogies centrées sur l'élève et suffisamment ouvertes.

Cette théorie rejoint par ailleurs les conclusions du modèle RTM(E), en affirmant que les exemples commentés jouent un rôle essentiel dans l'apprentissage, car ils permettent d'organiser les différentes connaissances de manière concrète et réaliste. La mémorisation des Exemples-clés de la discipline, rendue possible par des imprégnations successives à l'occasion d'activités pratiques personnelles, leur permet d'ancrer dans le concret leur culture du domaine et de pouvoir s'y référer ultérieurement.

### 2.3 Reconception de l'enseignement de la thermodynamique appliquée

---

En nous basant principalement sur le modèle RTM(E) et la théorie de la charge cognitive, nous avons pu reconcevoir radicalement la pédagogie de la thermodynamique appliquée et proposer une nouvelle approche qui est très bien accueillie si l'on en juge par sa diffusion. Ses principes directeurs sont une réduction de la charge cognitive des apprenants grâce à Thermoptim et aux modules Diapason, et une meilleure structuration de leurs schèmes en nous basant sur les enseignements du modèle RTM(E).

Cette reconception comporte quatre principaux volets :

- l'utilisation du simulateur Thermoptim permet à un élève de s'initier à l'étude des systèmes énergétiques en explorant ou en assemblant par lui-même des modèles des principales technologies de conversion de l'énergie. Celles-ci se présentant comme des assemblages de composants traversés par des fluides thermodynamiques qui y subissent des transformations diverses, on simplifie grandement les choses si on adopte une double démarche, en commençant par dissocier la représentation globale du système, généralement assez simple, de l'étude de ses différents composants considérés individuellement. La représentation d'ensemble se révèle très utile sur le plan qualitatif : elle peut être faite visuellement et permet de bien comprendre le rôle joué par chaque composant dans le système complet. Sur le plan didactique, elle est essentielle pour bien

assimiler les principes de conception de ces technologies. Une fois que l'on a bien à l'esprit la structure interne d'un moteur ou d'un appareil frigorifique, l'étude du comportement de l'un de ses composants est facilitée parce que l'on comprend comment il s'insère dans le tout et quelle est sa contribution au fonctionnement global. Si l'on dispose d'un environnement graphique approprié comme l'éditeur de schémas de Thermoptim (figure 3.2), la structure interne du système peut être décrite sans aucune difficulté. On obtient ainsi une représentation qualitative très parlante, qu'il ne reste plus ensuite qu'à quantifier en paramétrant les propriétés thermodynamiques des différents composants puis en les calculant. Cette représentation qualitative présente de surcroît la particularité d'être dans une très large mesure indépendante des hypothèses que l'on retient pour le calcul des divers composants : il s'agit d'un invariant du système ;

- la mise en application du modèle RTM(E) : afin de contourner les difficultés auxquelles l'enseignement de la thermodynamique appliquée est traditionnellement confronté, les connaissances à enseigner ont été profondément restructurées conformément au modèle RTM(E). La présentation des méthodes et des exemples est désormais basée sur l'utilisation du simulateur ce qui permet d'éviter de commencer par noyer les élèves dans des équations et des calculs rébarbatifs. Dès lors que la question des calculs est très largement résolue grâce à l'emploi d'outils logiciels, la présentation aux élèves de la réalité technologique devient la principale difficulté résiduelle : plus de 50 % du temps passé en cours est consacré à la description des machines, de leurs principes de fonctionnement et des contraintes technologiques rencontrées ;
- l'utilisation des modules Diapason, dont l'intérêt principal est leur excellente efficacité pédagogique, notamment pour la présentation de cette réalité technologique : lors de l'utilisation de ces modules, les élèves sont plus actifs qu'en salle de cours, en ce sens qu'ils règlent eux-mêmes leur rythme d'écoute, mais surtout ils choisissent eux-mêmes les moments où ils étudient, et sont donc disponibles lorsqu'ils le font ; ils apprennent mieux, d'autant plus qu'ils ont tout loisir de revenir en arrière ou de compléter les informations qui leur sont présentées en recourant aux documents écrits. Les bandes-son ayant une durée moyenne de moins d'une minute, leur attention peut être soutenue lorsqu'ils étudient une étape, et ils ne passent à la suivante qu'après un temps de repos. Lorsqu'ils travaillent, les élèves disposent de l'ensemble des ressources pédagogiques dont ils ont besoin ; en cas de doute ou s'ils ont été absents, ils peuvent se référer sans aucune difficulté aux explications orales de l'enseignant ;
- une approche progressive à trois niveaux et un suivi détaillé des élèves. Nous pensons que l'apprentissage est un processus itératif qui se prête bien à une pédagogie progressive, allant du simple (mais toujours réaliste, c'est fondamental) au compliqué. Pour des raisons à la fois cognitives et psychologiques, il vaut mieux, et c'est particulièrement vrai de la thermodynamique appliquée, commencer par montrer aux élèves comment le savoir qu'on leur présente peut concrètement être mis en application, en limitant au maximum les difficultés conceptuelles. Rappelons qu'ils doivent avant tout se familiariser avec une Réalité nouvelle, qu'ils ne connaissent quasiment pas, et que cet apprentissage se traduit déjà par une charge cognitive élevée. Au début, il nous semble préférable de leur montrer qu'existent des environnements comme Thermoptim avec lesquels ils peuvent "faire de la thermo sans peine" et obtenir des résultats très précis sans écrire une seule équation. Une fois que leurs réticences initiales sont vaincues et qu'ils ont assimilé le vocabulaire et les concepts de base, il devient possible de franchir une nouvelle étape et d'introduire davantage d'équations. L'expérience accumulée depuis quinze ans confirme que, une

fois qu'ils ont réalisé qu'existent aujourd'hui des Méthodes très performantes pour passer à l'application, des élèves initialement très réticents vis à vis de la Théorie demandent souvent des approfondissements : dès que sont tombés les blocages psychologiques mis en place par des présentations de la discipline trop axiomatiques et très peu applicables, les élèves deviennent beaucoup plus réceptifs vis à vis des équations, sans doute parce qu'ils ne craignent plus de se retrouver incapables de les mettre en pratique. Nombreux sont ceux qui souhaitent alors en savoir plus et bien comprendre comment les calculs sont effectués.

Même si nous l'illustrons dans ce document en nous appuyons sur les solutions technologiques que nous avons développées, dont les principales sont le simulateur Thermoptim et les séances Diapason, ce nouveau paradigme pédagogique est dans une très large mesure indépendant d'elles : il peut être mis en œuvre avec n'importe quel simulateur, aussi bien dans le cadre d'un cours en présentiel pur qu'en ayant recours à des modules de formation en ligne. Nous verrons d'ailleurs que l'utilisation d'un calculateur de propriétés des fluides présenté section 3.3.2 peut suffire pour traiter les cycles de base.

## D. 3 Ressources numériques proposées dans le portail Thermoptim-UNIT

Nous présenterons d'abord Thermoptim et les modules Diapason, puis les autres ressources du portail.

### 3.1 THERMOPTIM

---

Un outil comme Thermoptim permet de compléter un enseignement classique de la thermodynamique par une grande diversité d'activités pédagogiques, qui peuvent être regroupées en deux principales catégories : celles de découverte et initiation, notamment par exploration de modèles prédéfinis, et celles de construction de modèles, qui concernent des élèves cherchant à apprendre à modéliser par eux-mêmes des systèmes énergétiques. Selon les objectifs visés et surtout le temps disponible, l'enseignant peut privilégier l'une ou l'autre d'entre elles.

L'écran de la figure ci-dessous montre les 22 principales équations qu'il faut introduire pour étudier avec une précision raisonnable les performances de la plus simple des turbines à gaz dans le cadre d'un cursus classique. Il est bien sûr possible de simplifier, mais le modèle devient alors caricatural.

Les équations décrivant la compression apparaissent en haut à gauche en marron, et celles pour la détente en haut à droite en bleu. Ce sont les plus simples.

Les plus compliquées sont celles, en rouge en bas à gauche, qui permettent de déterminer la composition des gaz brûlés en sortie de chambre de combustion.

# TURBINE A GAZ

**Compression**

$$\beta_1 = \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1} = \frac{c_{p1} - c_{v1}}{c_{p1}}$$

$$r = \frac{P_2}{P_1}$$

$$h_2 - h_1 = c_{p1} T_1 (r^{\beta_1} - 1)$$

$$h_2' - h_1 = \frac{h_2 - h_1}{\eta_c}$$

**Combustion**

$$C H_4 + \lambda (1 + \frac{a}{4}) (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow (1 - k_1) CO_2 + k_1 CO + (1 - k_2) \frac{a}{2} H_2O + k_2 \frac{a}{2} H_2$$

$$+ ((\lambda - 1) (1 + \frac{a}{4}) + \frac{k_1}{2} + k_2 \frac{a}{4}) O_2 + 3,76 \lambda (1 + \frac{a}{4}) N_2$$

**Propriétés des gaz**

$$g(k) = - \frac{k_p (1 - k)}{k + k_p (1 - k)} \frac{a}{4}$$

- (1)  $[CO_2] = \frac{1 - k}{\Sigma}$
- (2)  $[CO] = \frac{k}{\Sigma}$
- (3)  $[N_2] = \frac{3,76 \lambda (1 + \frac{a}{4})}{\Sigma}$
- (4)  $[O_2] = \frac{\lambda (1 + \frac{a}{4}) + \frac{k}{2} - 1 + g(k)}{\Sigma}$
- (5)  $[H_2] = \frac{k a}{2 (k + k_p (1 - k)) \Sigma}$
- (6)  $\Sigma = 4,76 \lambda (1 + \frac{a}{4}) + \frac{a}{2} + \frac{k}{2} + 3 g(k)$

**turbine à gaz simple**

**Détente**

$$\beta_3 = \frac{\gamma_3 - 1}{\gamma_3} = \frac{c_{p3} - c_{v3}}{c_{p3}}$$

$$\theta = \frac{T_3}{T_1}$$

$$h_3 - h_4 = c_{p3} T_3 (1 - r^{-\beta_3}) = c_{p3} T_1 \theta (1 - r^{-\beta_3})$$

$$h_3 - h_4' = \eta_h (h_3 - h_4)$$

**Cycle de Brayton réel**

Modélisation classique d'une turbine à gaz

Et encore, pour simplifier les choses, avons-nous d'une part considéré ici un combustible particulièrement simple, et d'autre part omis de donner l'équation permettant de calculer la température de fin de combustion, qui est une équation implicite comprenant une intégrale dont l'une des bornes est inconnue.

Dans tous les cas, les propriétés des gaz font appel aux équations présentées en noir en bas de la figure. Elles sont nécessaires pour calculer les propriétés énergétiques de chacun des fluides mis en jeu.

Tout bien considéré, c'est au moins une quarantaine d'équations qui doivent être prises en compte pour obtenir un modèle à peu près vraisemblable de la turbine à gaz.

Bien évidemment, même si chacune des équations est connue, les risques d'erreur sont très nombreux lors de l'élaboration du modèle et de sa résolution, notamment du fait qu'elles sont couplées entre elles et que la résolution de certaines d'entre elles doit être faite de manière itérative.

Construire un modèle de turbine à gaz avec Thermoptim relève d'une logique radicalement différente de celle qui était traditionnellement mise en œuvre : nous privilégions en effet une approche qualitative des phénomènes, les calculs nécessaires pour les études quantitatives étant réalisés par les outils logiciels de manière transparente pour les élèves, c'est-à-dire sans qu'ils aient besoin, au moins dans un premier temps, d'en connaître le détail.

Le recours aux équations est réduit au minimum lors de l'initiation à la discipline, l'effort cognitif portant alors essentiellement sur la compréhension des concepts et des technologies ainsi que sur leur mise en pratique, et ce n'est qu'une fois que l'élève a acquis une maîtrise suffisante de la discipline que nous considérons que la mise en équations devient possible et pertinente.

Concrètement, comme le montre la figure ci-dessous, le modèle est construit par assemblage d'icônes placées sur le plan de travail d'un éditeur de schémas, l'architecture de la machine étant très proche de son schéma physique.

Chaque composant est ensuite paramétré grâce à un tout petit nombre de grandeurs caractéristiques. Les propriétés thermodynamiques des fluides étant encapsulées dans le logiciel, le calcul des performances se fait sans aucune difficulté avec une précision beaucoup plus grande que dans l'approche classique.

# TURBINE A GAZ

**Compression**

$$\beta_1 = \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1} = \frac{c_{p1} \cdot \gamma_1}{c_{p1}}$$

$$r = \frac{P_2}{P_1}$$

$$h_2 - h_1 = c_{p1} T_1 (\beta_1 - 1)$$

$$h_2' - h_1 = \frac{h_2 - h_1}{\eta_c}$$

**turbine à gaz simple**

**Détente**

$$\beta_3 = \frac{\gamma_3 - 1}{\gamma_3} = \frac{c_{p3} \cdot \gamma_3}{c_{p3}}$$

$$\theta = \frac{T_3}{T_1}$$

Cycle de Brayton réel

*Modélisation d'une turbine à gaz avec ThermoOptim*

En utilisant un outil comme ThermoOptim, on divise par 5 ou 6 le temps nécessaire pour calculer un cycle thermodynamique, et une fois le modèle établi, il est possible d'effectuer des analyses de sensibilité et de résoudre en quelques minutes ce qui demanderait des heures par les méthodes classiques.

De plus, il n'y a aucun risque d'erreur de programmation ou de lecture des propriétés. Il en résulte un gain de temps considérable sur un aspect des choses non essentiel sur le plan pédagogique, à savoir la résolution des difficultés calculatoires. Outre le temps gagné, la pénibilité du travail est grandement réduite, ce qui se traduit par un gain important de motivation des élèves, qui ne sont plus rebutés par la lourdeur et le caractère fastidieux des calculs.

De surcroît, des gains considérables sont obtenus en précision et donc en vraisemblance des calculs : il n'est plus nécessaire de recourir à des hypothèses caricaturales dans le seul but de rendre possibles les calculs. L'exemple type est celui des études des moteurs à combustion interne, qui à notre connaissance sont in fine considérés comme traversés par de l'air supposé parfait dans la quasi-totalité des enseignements de premier et second cycle dispensés dans le monde. Comment avec de telles hypothèses espérer intéresser des élèves qui aujourd'hui se soucient de l'impact environnemental de ces technologies : un moteur à air parfait n'a jamais pollué et ne polluera jamais !

### 3.2 MODULES DIAPASON

Les réflexions didactiques accompagnant le développement de ThermoOptim ont fait apparaître l'intérêt de compléter le simulateur par d'autres outils relevant des TICE

afin notamment de présenter aux élèves la réalité technologique, qu'ils méconnaissent très largement au début de leur apprentissage.

Ainsi, depuis septembre 2004, Thermooptim est complété par les modules de formation à distance sonorisés Diapason (figure 3.3). Ces modules permettent aux étudiants de travailler par eux-mêmes, à leur rythme, seuls ou en groupe, et d'avoir accès en ligne à tout moment :

- aux explications orales données par l'enseignant en complément des supports écrits dont ils disposent ;
- à des exercices utilisant le simulateur qui leur donnent la possibilité de se familiariser avec les différents cycles et leurs méthodes d'analyse.

Modules Diapason

Structurés en étapes, séances, parcours et cursus, les modules Diapason sont un environnement générique utilisable dans de nombreux contextes pédagogiques. Leur spécificité est d'associer une bande son à un écran, permettant aux élèves d'obtenir des explications orales contextuelles. Des hyperliens permettent d'accéder à des documents divers comme des tableurs ou des documents de référence au format pdf.

Ces modules, qui permettent de faire aussi bien des présentations théoriques, méthodologiques que technologiques, utilisent comme visualisateur un environnement d'exécution Flash supporté par la quasi-totalité des navigateurs Web, qui permet de synchroniser des ressources multimédia variées, comme des images, des bandes-son, des documents pdf, des animations swf, des tableurs, des liens hypertexte...

### 3.3 AUTRES RESSOURCES PEDAGOGIQUES

L'ensemble des ressources numériques que nous avons développées au cours des dix dernières années a été regroupé dans ce portail qui a été conçu pour que leur accès soit le plus facile possible (cf. note de présentation du portail).

L'ensemble des utilisateurs non identifiés a accès à une palette de ressources complémentaires permettant de définir de multiples scénarios d'usage, et structurées en quelques grandes rubriques :

- Bases de thermodynamique, qui présente comme son nom l'indique les

fondements de la discipline ;

- Guides méthodologiques, qui regroupe diverses recommandations méthodologiques destinées à faciliter le calcul des systèmes énergétiques, des plus simples aux complexes. Son principal objectif est de sensibiliser le lecteur aux diverses problématiques abordées et de suggérer quelques pistes pour trouver des solutions appropriées, sans chercher à les traiter de manière exhaustive ;
- Technologies, qui regroupe des fiches thématiques synthétiques présentant les principales technologies énergétiques, en distinguant d'une part les composants (compresseurs, turbines, chambres de combustion...) et d'autre part les systèmes complets (turbines à gaz, moteurs alternatifs, centrales à vapeur...) ;
- Problèmes globaux, qui aborde les grands problèmes de l'énergie : énergie au niveau macro-économique (filiales énergétiques, comptabilité économique et énergétique), et les aspects géopolitiques (situation énergétique mondiale, problèmes énergétiques des pays en développement, réserves et ressources, marchés de l'énergie) ;
- Enseignement, qui comporte deux grands volets, le premier consacré à la pédagogie de la thermodynamique appliquée que nous préconisons et aux communautés d'enseignants qui participent au développement des ressources, et le second qui regroupe toutes les ressources mises en ligne, en particulier l'ensemble des séances Diapason utilisables pour la formation à distance ;
- Logiciel, qui est principalement consacrée d'une part au progiciel ThermoOptim, et d'autre part aux outils permettant de concevoir et de déployer des séances Diapason. Ces deux sous-rubriques comportent chacune une présentation des outils, de la documentation, et des ressources diverses.

Une cinquantaine d'utilisateurs qui doivent s'identifier ont en outre accès à d'autres rubriques spécifiques, comme par exemple les sites des communautés d'enseignants, ou bien un espace contenant des documents réservés aux enseignants (corrigés des fiches-guides de TD et des exercices). Pour disposer de cet accès, il suffit d'en faire la demande sur le portail et de pouvoir justifier de sa qualité d'enseignant.

Les principales ressources du portail sont les suivantes :

- les fiches thématiques synthétiques d'une part constituent une introduction sommaire à la discipline, et d'autre part renvoient sur différentes activités pédagogiques (cours en ligne, exercices...). Placées dans les rubriques du portail (notamment dans Technologies), elles permettent de passer en revue l'ensemble du cours, un peu comme à partir du sommaire d'un livre, en ayant en plus accès à un bref panorama des sujets abordés. Une trentaine de fiches sur les composants et les systèmes a déjà été publiée. Un utilisateur intéressé par une technologie donnée, par exemple les turbines à gaz (figure 3.5), dispose de quelques explications succinctes, de références bibliographiques, notamment vers les chapitres du manuel, et de liens directs vers les séances Diapason pertinentes et vers des activités personnelles comme des sujets d'exercices ou de projets. Si ces activités font appel à des modèles spécifiques, des liens permettent d'y accéder ;
- au nombre d'une cinquantaine, les séances Diapason représentent un ensemble d'environ 1000 écrans sonorisés à 85 % (11 h de bandes-son) ;
- les supports écrits, la plupart extraits du livre Systèmes Energétiques publié aux Presses de l'Ecole des Mines de Paris, sont téléchargeables à partir soit des fiches thématiques synthétiques, soit des séances Diapason ;
- les fiches-guides de TD (une vingtaine est déjà disponible) constituent un

type de ressource pédagogique particulièrement intéressant à double titre, car d'une part elles permettent de proposer aux élèves des activités personnelles de travaux dirigés, exercices ou projets, et d'autre part elles constituent un moyen particulièrement souple de réappropriation et personnalisation par les enseignants de ressources déjà développées, étant donné leur structure et leur contenu, qui est indicatif plus que normatif ;

- les guides méthodologiques, déjà évoqués ci-dessus ;
- la modélothèque de ThermoOptim comporte une vingtaine de modèles développés sous forme de classes externes, qui permettent de représenter soit des corps ou des composants non disponibles dans le noyau de ThermoOptim, soit des pilotes destinés à contrôler le déroulement des calculs, ceci afin de simuler des systèmes énergétiques novateurs, notamment à faible impact environnemental, comme des piles à combustible, des centrales solaires à concentration ;
- enfin, les notes relatives à la pédagogie de la thermodynamique appliquée sont proposées pour nourrir la réflexion des enseignants qui désirent compléter leur formation sur ce sujet.

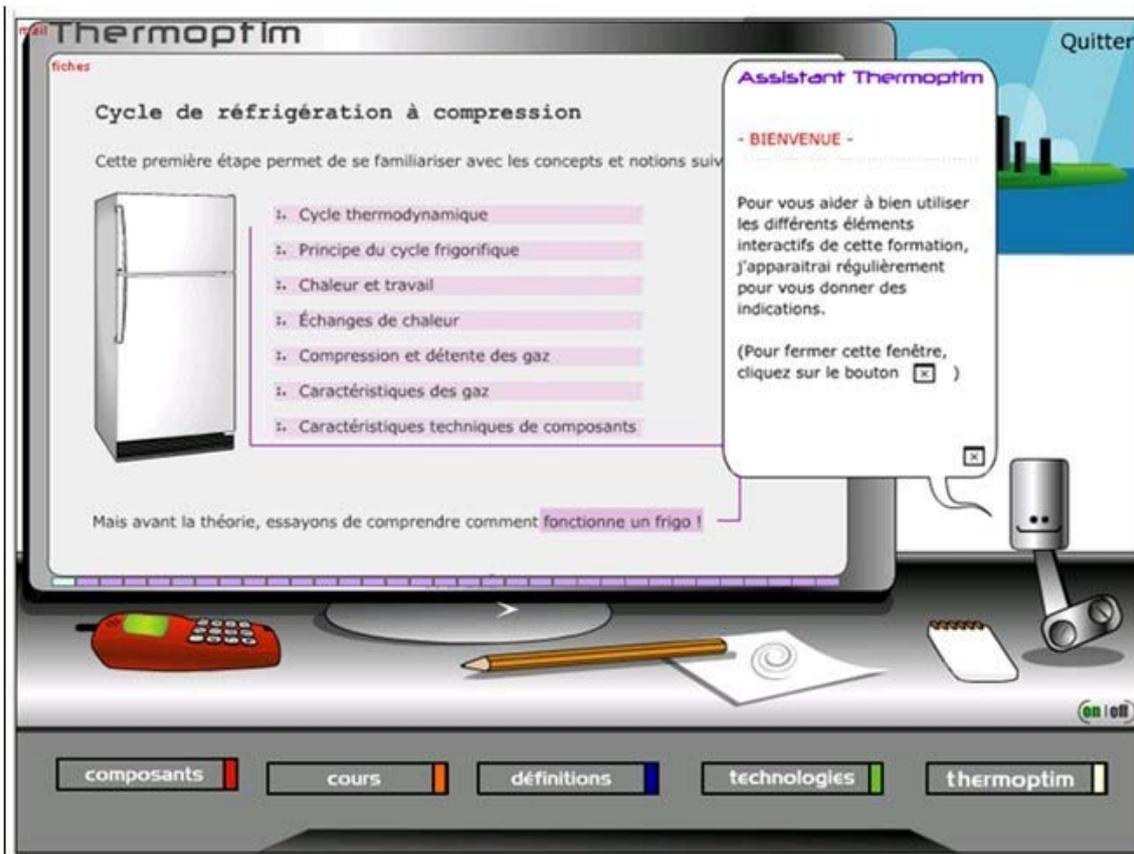
De plus, un module de formation à distance appelé ExPliSite et des applets sont proposés aux utilisateurs, ainsi qu'un *utilitaire de digitalisation de courbes*<sup>3</sup> que nous ne présenterons pas ici .

### 3.3.1 EXPLISITE

En 2003-2004, un financement apporté par le projet Grande Ecole Virtuelle (GEV) du Groupe des Ecoles des Mines (GEM), a permis de commencer la réalisation, par la cellule TICE de l'Ecole des Mines de Paris, d'un premier module de formation à distance, appelé **ExPliSite**<sup>4</sup> pour Exploration Pédagogique en Ligne avec Simulation de Technologies Energétiques (figure ci-dessous).

3 - <http://www.thermooptim.org/sections/logiciels/thermooptim/ressources/utilitaire>

4 - <http://www.thermooptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/module-explisite/module-fad-explisite>



Bureau du module ExpliSite

Il s'agit d'un superbe environnement développé sous Flash proposant un scénario principal, des ressources pédagogiques transversales, un assistant de navigation, et des liaisons avec ThermoOptim, avec plusieurs niveaux d'investigation. Trois des exemples de base de l'énergétique y sont traités : la turbine à gaz, la centrale à vapeur et la machine de réfrigération.

Sa mise au point a nécessité un très important effort de scénarisation et la réalisation de nombreux clips sous Flash puis leur insertion dans le module complet. Il est toutefois non sonorisé et il serait très difficile de lui ajouter de nouvelles fonctionnalités. Les parcours proposés aux élèves sont figés, du fait d'un parti pris initial assez normatif.

Son intérêt est de proposer aux élèves une progression scénarisée sur trois niveaux de complexité croissante, comprenant des explications technologiques et méthodologiques, des QCM, des comparaisons avec le cycle de Carnot...

Les scénarios comportent des liens vers les référentiels horizontaux portant notamment sur les bases et les composants, qui sont activés pour des compléments d'information ou en cas de difficultés. L'intégration du simulateur dans la scénarisation correspond à une des originalités et un des atouts de ces modules. L'évaluation en ligne des progrès effectués se fait essentiellement sous forme de QCM, portant sur des questions de compréhension, des bilans à compléter à partir des résultats fournis par le simulateur...

### 3.3.2 CALCULATEUR DES PROPRIETES DES FLUIDES

En complément de ThermoOptim et des diagrammes interactifs, nous avons développé des petites applets Java comme le *calculateur de propriétés thermodynamiques des corps*<sup>5</sup> présenté figure ci-dessous.

Bien que ses fonctionnalités soient limitées, il permet d'obtenir rapidement les propriétés de divers gaz idéaux et fluides réels condensables. Il offre la possibilité

5 - <http://www.thermoOptim.org/sections/logiciels/thermoOptim/ressources/applet-calculateur>

de choisir les jeux suivants de variables indépendantes : pression, température (en K ou °C) et titre, pression et enthalpie massique ou bien encore pression et entropie massique.

L'ensemble des résultats d'un calcul est écrit dans le champ de texte situé à gauche du bouton « Calculer » qui est sélectionnable, ce qui permet de recopier ces valeurs dans un tableur pour faciliter l'utilisation de cet outil.

On peut ainsi l'utiliser pour calculer sans difficulté les compressions et détente adiabatiques, ou encore les laminages isenthalpiques.

## CALCULATEUR INVERSEUR THERMOPTIM

En utilisant ce progiciel, vous acceptez les termes de la licence (Consultez le fichier licence.pdf).

M (kg/kmol)	18,015	T (°C)	19,746
Pc (bar)	221,2	h (kJ/kg)	82,837
Tc (°C)	374,15	u (kJ/kg)	82,834
Vc (m3/kg)	0,00317	s (kJ/kg/k)	0,29282
titre x	0	v (m3/kg)	0,00100167

- 1) sélectionnez le type de fluide que vous voulez calculer (gaz idéal ou vapeur condensable)
- 2) choisissez le nom du fluide
- 3) choisissez le mode de calcul, puis entrez les valeurs des variables indépendantes : toujours la pression et soit la température et le titre si la température de saturation est imposée (P,T,x), soit l'enthalpie (P,h), soit l'entropie (P,s).
- 4) double-cliquez sur le nom du fluide ou cliquez sur "Calculer" pour obtenir les propriétés.
- 5) copiez les résultats dans un tableur en utilisant le champ en milieu d'écran sous la table des fluides

*Calculateur de propriétés thermodynamiques des corps*

### 3.3.3 CALCULATEUR DE COMBUSTIONS

Un second calculateur est disponible (figure ci-dessous). Il permet d'effectuer des *calculs de combustion*<sup>6</sup> relativement simples mais qu'il serait déjà très laborieux de faire à la main.

6 - <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/ressources/applet-calc-comb>

### Applet Calculs de combustions

Créé par Renaud Gicquel. Dernière modification le 17/10/2008. Statut publié Version 2 Langue

Cette applet permet de vous initier aux calculs des combustions

#### INITIATION A LA COMBUSTION

En utilisant ce progiciel, vous acceptez les termes de la licence (Consultez le

comburant

air  
O2

p (bar) 1

T (K) 300

combustible info

Gaz naturel  
gaz pauvre  
essence  
CH4 ` méthane  
C2H6 ` éthane

débit 0,02997637

afficher le tableau de synthèse

Calculer lambda lambda 2

Calculer T T (K) 1 490,32

rendement chambre 1

dissociation temp. figeage 1 400

rendt. combustion 1 taux dissociation 0,1

Calculateur de combustions

Le tableau de synthèse fournit de nombreux résultats sur la combustion.

comburant			air		PCI kJ/kg	0
composant	fract. molaire	fract. massique				
O2	0,21	0,232053				
N2	0,781	0,75553				
Ar	0,009	0,0124164				

combustible			Gaz naturel		PCI kJ/kg	48 713,22
composant	fract. molaire	fract. massique				
CH4 ` méthane	0,871	0,758966				
C2H6 ` éthane	0,088	0,143728				
C3H8 ` propane	0,025	0,0598776				
C4H10 ` n-butane	0,008	0,025256				
N2	0,008	0,0121725				

gaz brûlés			gaz de combustion		PCI kJ/kg	0
composant	fract. molaire	fract. massique				
CO2	0,0517709	0,0802846				
H2O	0,0962741	0,061115				
O2	0,0999079	0,11265				
N2	0,743484	0,733896				
Ar	0,00856354	0,012055				

lambda : 2      T produits (K) : 1 490,32

nombre de moles du comburant : 21,21

nombre de moles de O2 dans le comburant : 4,454

C disponible dans le combustible (moles) : 1,154

H2 disponible dans le combustible (moles) : 2,146

S disponible dans le combustible (moles) : 0

O2 disponible dans le combustible (moles) : 0

nombre total de moles des produits : 22,291

nombre de moles de CO2 : 1,154

nombre de moles de CO : 0

nombre de moles de H2O : 2,146

nombre de moles de H2 : 0

nombre de moles de SO2 : 0

nombre de moles de O2 : 2,227

Tableau de synthèse sur la combustion

## E. 4 Scénarios COMPETICE

Sous le vocable de « scénarios », COMPETICE identifie les cinq principales catégories d'utilisation des TICE suivantes, graduées en fonction du degré de travail en auto-formation des élèves :

- présentiel enrichi par l'usage de supports multimédias
- présentiel "amélioré" en amont et en aval
- présentiel allège
- présentiel réduit
- présentiel quasi inexistant

Nous verrons que les ressources du portail peuvent être utilisées à des degrés divers avec ces 5 scénarios.

### 4.1 Scénario S1

#### ***PRESENTIEL ENRICHIS PAR L'USAGE DE SUPPORTS MULTIMEDIAS<sup>7</sup> (S1)***

Les salles de cours étant équipées d'un ordinateur, d'un outil de projection et de sonorisation, les enseignants enrichissent leurs cours par la projection :

- de ressources textuelles, graphiques, audio et vidéo extraites de CD, DVD ou sites Internet ;
- d'expérimentations en direct (par exemple une expérience de chimie) ou de télé-expérimentations ;
- de simulation ou de micro-mondes ;
- de téléconférences visio ou audio.

Stratégie :

Il s'agit d'une stratégie éditoriale. Le décideur incite les enseignants à la formalisation de leurs supports de cours, leur capitalisation et leur mutualisation.

### 4.2 Scénario S2

#### ***PRESENTIEL "AMELIORE" EN AMONT ET EN AVAL<sup>8</sup> (S2)***

Tous les enseignants et les étudiants ont une boîte à lettre électronique. Avant et après le cours, l'enseignant met à la disposition des étudiants un certain nombre de ressources qu'ils peuvent atteindre à distance.

A titre d'exemple, ils peuvent avoir accès, avant le cours, à son syllabus, à des exercices, fiches méthodologiques, conseils pour la préparation des TP et des TD, au planning de la formation..

Après le cours, ils ont accès aux supports pédagogiques utilisés, à des dispositifs d'autoévaluation ou d'autoformation, et peuvent échanger à distance avec les enseignants et entre eux.

Stratégie :

Il s'agit d'une stratégie documentaire et de communication. Le décideur incite et donne les moyens de mettre à disposition les supports et la documentation des cours et d'instaurer une communication entre enseignants et étudiants en dehors des heures de cours.

### 4.3 Scénario S3

#### ***PRESENTIEL ALLEGE<sup>9</sup> (S3)***

L'essentiel de la formation se réalise en présence des enseignants. Quelques heures de cours ou de TD sont remplacées par des activités d'autoformation multimédia

7 - <http://www.educnet.education.fr/bd/competice/superieur/competice/libre/scenarios/sd1.php?ID=2>

8 - <http://www.educnet.education.fr/bd/competice/superieur/competice/libre/scenarios/sd1.php?ID=3>

9 - <http://www.educnet.education.fr/bd/competice/superieur/competice/libre/scenarios/sd1.php?ID=4>

(ou non) qui sont planifiées par l'enseignant mais peuvent être tutorées par d'autres personnes (tuteurs, accompagnateurs d'entreprises, anciens...).

Stratégie :

Le décideur incite au remplacement d'enseignement en face à face par des temps d'autoformation tutorée, pour améliorer la flexibilité des dispositifs et prendre en compte les disponibilités des étudiants.

#### 4.4 Scénario S4

---

##### **PRESENTIEL REDUIT<sup>10</sup> (S4)**

L'essentiel de la formation se fait en dehors de la présence de l'enseignant. Celui-ci :

- contractualise les objectifs en début de formation avec l'étudiant ;
- intervient de façon synchrone ou asynchrone, en présence ou à distance, essentiellement pour préciser ou ré-expliquer différemment des notions, animer des temps de partage et d'échanges... ;
- intervient de façon synchrone et en présence pour évaluer l'étudiant ;
- suit les étudiants en entretenant leur motivation grâce à des outils de pilotage.

Stratégie :

Il s'agit d'une stratégie de création d'un environnement pédagogique soit de type physique (centre de ressources), soit virtuel (environnement d'apprentissage). Le décideur incite à la désynchronisation des activités et donc à leur organisation avec des ressources variées.

#### 4.5 Scénario S5

---

##### **PRESENTIEL "QUASI INEXISTANT"<sup>11</sup> (S5)**

C'est la formation ouverte et à distance ou à longue distance. L'essentiel de la formation se fait en dehors de la présence de l'enseignant. Celui-ci se déplace à longue distance pour aller rencontrer les étudiants sur leur terrain. Les étudiants ne se déplacent que pour l'évaluation finale. Une plate-forme permet le suivi des étudiants et offre à distance les potentialités habituelles d'un campus.

Stratégie :

Il s'agit d'une stratégie d'ouverture de la formation. Le décideur incite à proposer une offre de formation diplômante en direction de publics contraints : disponibilité en temps, distance, accessibilité aux ressources...etc. La " valeur ajoutée " est dans la communication et les hommes, plus que dans les technologies.

#### 4.6 UTILISATION DANS CES SCENARIOS DES RESSOURCES DU PORTAIL

---

##### **4.6 UTILISATION DANS CES SCENARIOS DES RESSOURCES DU PORTAIL**

En fonction des contextes pédagogiques et des choix des enseignants, les ressources du portail peuvent être utilisées selon les scénarios S1 à S5.

A titre d'exemple, les *cours d'auto-formation*<sup>12</sup> proposés sur le portail relèvent du scénario S5, tandis que les cours dispensés à MINES ParisTech sont du type S4. L'organisation et la conduite d'une telle formation induisent notamment une évolution du rôle de l'enseignant vers davantage de tutorat.

Dans un cursus académique caractéristique de l'enseignement supérieur, où l'approche disciplinaire est la règle habituelle, l'enchaînement proposé aux élèves correspond souvent à un panachage de séances Diapason portant sur la Réalité, la

10 - <http://www.educnet.education.fr/bd/competice/superieur/competice/libre/scenarios/sd1.php?ID=5>

11 - <http://www.educnet.education.fr/bd/competice/superieur/competice/libre/scenarios/sd1.php?ID=6>

12 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/modules-d-auto-formation/modules-d-auto-formation>

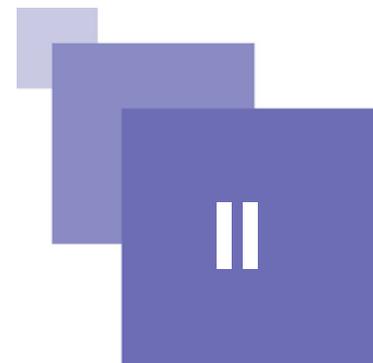
Théorie et les Méthodes. Pour les cycles de base, il y a moyen soit d'utiliser directement Thermoptim, soit, si l'enseignant souhaite bien expliciter les Séquences de Règles de Calcul, de travailler avec l'applet de calcul des propriétés des fluides présenté section 3.3.2 comme nous le montrerons section 2.2 de la deuxième partie.

Dans un cursus de formation professionnelle plus finalisé, ou dans le cadre d'une pédagogie du type **Apprentissage Par Projets (APP)**, l'élève est généralement intéressé par une technologie précise, et son utilisation des ressources du portail vise à trouver un parcours personnalisé lui permettant d'accéder au seul savoir qui lui manque, en fonction de ses connaissances initiales. L'ensemble des séances Diapason constitue alors une bibliothèque de cours et TD sonorisés auquel il peut accéder en fonction de ses besoins, et les fiches thématiques et les guides méthodologiques lui permettent d'identifier les ressources pertinentes par rapport à ses objectifs. Le moteur de recherche du portail constitue une aide supplémentaire dans sa navigation. La préparation d'un TIPE est un exemple d'une telle pédagogie.

Bien que le simulateur et les modules Diapason soient utilisés de manière différenciée selon les établissements de formation, leur mise en œuvre se traduit généralement par l'adoption d'un mode de formation hybride alternant séances en présentiel et autoformation en ligne, et donc correspondant aux scénarios S2 ou S3, mais il arrive aussi, par exemple dans les classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE), que l'enseignant n'utilise Thermoptim que pour illustrer son cours, selon le scénario S1. Dans tous les cas, seule une partie des ressources disponibles est utilisée, les enseignants sélectionnant celles qui leur conviennent le mieux parmi l'offre existante.



# Seconde partie : Activités pédagogiques d'initiation



Présentation générale de la seconde partie	27
1 Fonctionnement des composants	29
2 Etude d'une centrale électrique à vapeur	33
3 Etude d'une turbine à gaz	52
4 Etude d'un réfrigérateur domestique	74

## A. Présentation générale de la seconde partie

### Introduction

La seconde partie de ce guide est consacrée à la présentation d'une série d'activités pédagogiques d'initiation à la thermodynamique appliquée pouvant être réalisées en utilisant ces ressources, l'objectif étant l'acquisition par l'élève des concepts et des outils. Il s'agit principalement de petits scénarios à l'attention des enseignants, les diverses activités portant sur les exemples de base (centrales électriques à vapeur, turbines à gaz, réfrigérateur domestique), avec illustration des tracés des cycles dans les diagrammes thermodynamiques.

Ces activités seront situées dans la typologie des cinq principaux scénarios identifiés par Competice.

Les exemples de base qui sont traités ici correspondent à des systèmes énergétiques simples, mettant en jeu un petit nombre de composants dont il importe de commencer par bien comprendre d'une part le fonctionnement sur le plan phénoménologique, et d'autre part la modélisation au sens du premier principe, ce qui sera effectué dans la première section.

La prise en main du simulateur Thermoptim par les élèves se fait généralement sans aucune difficulté, mais elle est facilitée s'ils commencent par étudier la *séance Diapason S07\_init*<sup>13</sup>, qui introduit les concepts mis en œuvre dans le progiciel, ou si l'enseignant leur fait lui-même cette présentation.

### Pré-requis pour les élèves en formation initiale

Comme pour tout enseignement, la question des pré-requis est essentielle, en ce sens qu'elle permet de distinguer les connaissances nouvelles que les apprenants doivent acquérir de celles qu'ils sont supposés maîtriser au début de leur formation.

Compte tenu de la mission d'UNIT, la population d'élèves à laquelle s'adressent en premier lieu nos ressources est celle des **universités et des écoles d'ingénieur**,

13 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s07-init>

dont la formation repose essentiellement sur un classique découpage disciplinaire des sciences, même si nos méthodes pédagogiques sont novatrices.

Dans ce contexte, un enseignement de thermodynamique appliquée ou d'énergétique s'adresse à des élèves qui ont déjà suivi des cours de base de thermodynamique et sont donc supposés connaître les notions élémentaires de la discipline, notamment les deux premiers principes, les propriétés des fluides et les trois diagrammes (P, v), (T, s) et (h, ln(P)). Le chapitre 2 du premier tome du livre Systèmes Energétiques [1] présente ces notions.

C'est pourquoi, sauf indication contraire, nous considérons dans ce guide d'usage que les élèves doivent commencer par effectuer un certain nombre de ce qui constitue pour eux des **rappels des bases de thermodynamique**, et en particulier des propriétés des fluides, qui doivent être connues avant de pouvoir étudier les systèmes énergétiques. Trois séances Diapason ( *S02*<sup>14</sup> , *S03*<sup>15</sup> et *S04a*<sup>16</sup> ) et les fiches thématiques de la rubrique *Bases de thermodynamique*<sup>17</sup> permettent d'effectuer ces rappels et de présenter les diagrammes entropique (T, s) et des frigoristes (h, ln(P)), qui sont les plus utilisés en pratique.

Ensuite, il est souhaitable de présenter aux élèves un certain nombre de généralités sur les cycles, ce que permet de faire la *séance Diapason S09*<sup>18</sup> : notion de cycle moteur, récepteur, énergie payante, utile, rendement de cycle....

### Pré-requis pour les élèves en formation professionnelle

Il existe cependant d'autres populations d'élèves que ceux des universités et des écoles d'ingénieur qui peuvent tirer un grand parti de nos ressources, mais qui ne disposent pas des mêmes pré-requis, ou qui les ont oubliés car ils ont terminé leurs études depuis longtemps. Il s'agit notamment des **apprenants en formation professionnelle** dont l'objectif est d'acquérir des compétences opérationnelles pour exercer leur métier, et pour qui une approche disciplinaire va beaucoup moins de soi.

Pour ces apprenants, l'objectif est avant tout d'acquérir une compréhension qualitative et phénoménologique du fonctionnement des technologies qu'ils auront à conduire, et le savoir théorique doit être aussi réduit que possible.

Certaines notions comme l'entropie ne font pas nécessairement partie de leur bagage conceptuel, et certains d'entre eux ne disposent que d'un niveau mathématique relativement bas, notamment ceux qui se destinent à un métier de technicien d'exploitation.

Sur la base de réflexions approfondies menées en partenariat avec la Marine Nationale et Electrabel, nous avons défini une présentation allégée des cycles thermodynamiques élémentaires qui est présentée dans la **cinquième partie de ce guide**. Elle propose une introduction très graduelle des notions essentielles, qui permet ensuite d'utiliser nos ressources dans un contexte professionnalisant.

### Démarches d'analyse des exemples de base

Pour étudier les exemples de base, deux grandes manières d'opérer peuvent être retenues :

- calculer pas à pas les évolutions subies par le fluide dans chaque composant, en décomposant les différentes étapes suivies, ceci grâce au calculateur inverseur ou directement à partir des écrans des points de Thermoptim ;
- effectuer directement ces calculs à partir des transfos de Thermoptim.

14 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s02-premier>

15 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s03-deuxieme>

16 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s04a-proprietes>

17 - <http://www.thermoptim.org/sections/bases-thermodynamique>

18 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s09-generalites>

La première approche correspond au parti-pris pédagogique d'un enseignant qui souhaite que ses élèves commencent par bien comprendre les lois thermodynamiques qui gouvernent le fonctionnement des divers composants, alors que dans la seconde l'enseignant privilégie un raisonnement systémique où l'accent est mis sur les couplages entre composants, ceux-ci se comportant comme des boîtes noires.

Un enseignant désirant intéresser rapidement ses élèves aux architectures des différents systèmes énergétiques pourra commencer par une description très sommaire du comportement interne des composants, quitte à approfondir cette question dans un deuxième temps, lorsque ses élèves auront maîtrisé la construction des cycles élémentaires et que leur motivation pour s'investir en thermodynamique sera renforcée par cet apprentissage initial.

Si le temps disponible le permet, le premier mode de calcul peut être préférable pour des débutants, car il permet aux élèves de mieux comprendre la thermodynamique sous-jacente. Nous montrerons comment il peut être mis en pratique concrètement. Si le temps est compté, l'utilisation directe de ThermoOptim évite d'entrer dans le détail des calculs, mais il y a un risque que les élèves utilisent le simulateur comme un logiciel presse-bouton, sans trop comprendre ce qu'il fait.

Le choix entre ces deux approches dépendra donc du contexte, et notamment de la durée de la formation et du niveau des élèves. Il par ailleurs est clair qu'elles sont complémentaires et peuvent être présentées dans un ordre ou dans l'autre.

Dans ces deux approches, les diagrammes thermodynamiques servent à visualiser les évolutions subies par les fluides une fois que l'état des différents points a été déterminé.

Nous aurions aussi pu parler d'une troisième approche qui consiste à construire directement les cycles sur diagramme en y représentant les évolutions de référence. Cette manière de faire est tout à fait pertinente, surtout si l'enseignant se satisfait d'une étude qualitative des cycles.

C'est celle que nous avons retenue dans la présentation allégée destinée aux apprenants en formation professionnelle qui fait l'objet de la cinquième partie.

## B. 1 Fonctionnement des composants

### Introduction

Dans un premier temps, tant que les élèves n'ont pas acquis une culture suffisante du domaine, il nous semble préférable :

- d'une part de privilégier une compréhension des performances globales des composants, en s'attachant à mettre en évidence les expressions des grandeurs caractéristiques représentatives de leur fonctionnement d'ensemble, ce qui permet d'éviter les difficultés auxquelles conduirait une modélisation détaillée ;
- d'autre part de ne pas trop insister sur la démarche systémique qui sous-tend la modélisation avec ThermoOptim. Les notions correspondantes seront plus faciles à comprendre lorsque les élèves auront acquis une certaine expérience de la modélisation, lors des activités de consolidation (cf. troisième partie).

### 1.1 Evolutions de référence et application du premier principe en système ouvert

Pour commencer, un rappel de l'expression enthalpique du premier principe est souhaitable, en expliquant bien aux élèves que les cycles qui seront considérés ici, bien que **globalement fermés**, sont formés de plusieurs transformations réalisées

pour chacune d'elles en **système ouvert**.

Les notations sont celles de la référence [1].

C étant la vitesse du fluide, le premier principe appliqué à un composant traversé par un débit unitaire de fluide s'exprime, en unités massiques, sous la forme :

$$\tau + Q = h_2 - h_1 + \Delta K + g \Delta z = h_2 - h_1 + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2}$$

*Premier principe appliqué aux processus industriels*

Pour la plupart des machines thermiques, le terme  $g \Delta z$  est négligeable. Dans de nombreux cas, la variation d'énergie cinétique  $\Delta K$  reste faible vis à vis des autres variations (sauf bien entendu dans des cas spéciaux tels que les réacteurs d'avion, certains aubages de turbomachines ou organes de détente).

Dans ces conditions, la somme du travail reçu ou fourni et de la chaleur échangée avec l'extérieur par le composant est égale à la variation d'enthalpie du fluide qui le traverse.

Cette relation fondamentale explique pourquoi, dans les appareils industriels, il est pratiquement impossible de mettre en œuvre à la fois une forte puissance mécanique et un flux calorifique important.

Pour le calcul des transformations, les implications de ce constat sont très importantes en pratique puisqu'elles indiquent que dans la plupart des composants des machines industrielles, **les échanges thermiques et mécaniques sont découplés**. Elles expliquent aussi pourquoi l'enthalpie est une fonction d'état très utilisée dans les transformations en système ouvert : la variation d'enthalpie du fluide correspond selon les cas à l'énergie mécanique ou thermique mise en jeu.

### 1.1.1 ECHANGEURS DE CHALEUR

Les composants appelés à transférer de la chaleur d'un fluide à un autre nécessitent de grandes surfaces d'échange, les flux thermiques leur étant proportionnels. Des considérations techniques et économiques amènent à adopter des dispositifs purement statiques. Par exemple, de grands faisceaux de tubes en parallèle, parcourus intérieurement par un fluide pendant que l'autre circule à l'extérieur.

$\tau$  est alors nul en raison de l'absence de parois mobiles.

En première approximation, ces échangeurs peuvent être supposés isobares.

Dans un échangeur de chaleur, la chaleur  $Q$  cédée ou fournie par un fluide à l'autre est égale à sa variation d'enthalpie  $\Delta h$ .

### 1.1.2 CHAMBRES DE COMBUSTION, CHAUDIERES

Le même raisonnement s'applique aux chambres de combustion ou aux chaudières, qui peuvent généralement être considérées comme isobares. La combustion a donc lieu à pression constante, ce qui surprend toujours un certain nombre d'élèves, convaincus que la combustion élève la pression, même en système ouvert.

Dans une chambre de combustion ou une chaudière, la chaleur  $Q$  cédée au fluide qui la traverse est égale à sa variation d'enthalpie  $\Delta h$ .

### 1.1.3 COMPRESSEURS ET TURBINES

Les machines réalisant la compression ou la détente d'un fluide ont une conception très compacte pour des raisons de poids, d'encombrement et de coût. Pour les mêmes raisons, elles tournent très vite (plusieurs milliers de tours par minute). Chaque parcelle de fluide y séjourne très peu de temps.

Par ailleurs les coefficients d'échange thermique des gaz ont des valeurs faibles.

Les courts temps de séjour, les petites surfaces de contact fluide-paroi, et les faibles coefficients d'échange font que l'échange de chaleur est minime et que le fonctionnement de ces machines est pratiquement adiabatique.

Dans une machine adiabatique de compression ou détente, le travail utile  $\tau$  est égal à la variation d'enthalpie du fluide  $\Delta h$ .

Il faut bien insister auprès des élèves sur le fait que, bien que la machine puisse être considérée comme adiabatique, des irréversibilités y prennent généralement place, de telle sorte que son fonctionnement n'est pas isentropique. L'isentropique constitue la référence par rapport à laquelle se calcule le fonctionnement de la machine réelle.

#### 1.1.4 VANNES, FILTRES

Il existe une classe d'appareils où  $\tau$  et  $Q$  sont nuls tous les deux : ce sont les détendeurs statiques tels que vannes, filtres... La transformation correspondante s'appelle un "laminage" isenthalpique.

Un laminage conserve l'enthalpie ( $\Delta h = 0$ ).

## 1.2 Modélisation des composants élémentaires

### 1.2.1 ECHANGEURS DE CHALEUR

Précisons tout d'abord que, dans Thermoptim, un échangeur de chaleur est constitué de deux transfos échange couplées correspondant à chacun des deux fluides, manière de faire qui présente toute une série d'avantages.

Les échangeurs de chaleur pouvant être considérés comme isobares, comme nous l'avons vu, la pression de chacun des deux fluides est la même en entrée et en sortie de la transfo échange qui le représente. Ils peuvent aussi généralement être considérés comme globalement adiabatiques, ce qui signifie que la chaleur cédée par un fluide est égale, en valeur absolue, à celle reçue par l'autre.

Une modélisation très simple d'un échangeur se limitera à cette équation, étant bien entendu que les niveaux de température dans l'échangeur doivent être tels qu'il n'y ait pas de croisement de température et que le deuxième principe soit toujours vérifié. Il faut en particulier être très vigilant lorsque l'un des fluides change d'état. Dans ce cas il est préférable de décomposer l'échangeur en sous-échangeurs connectés entre eux, les modules élémentaires étant monophasiques, sauf pour les évaporateurs et condenseurs.

Une modélisation plus poussée demande l'introduction des notions d'efficacité ou de Différence de Température Moyenne Logarithmique (DTML), relativement difficiles à bien comprendre. Elle ne sera effectuée que lors de l'étape de consolidation des connaissances (cf. troisième partie).

### 1.2.2 CHAMBRES DE COMBUSTION, CHAUDIERES

Même s'ils ne sont pas très compliqués, les calculs de combustion deviennent rapidement laborieux. Ce qu'il importe de bien faire comprendre aux élèves, c'est qu'ils sont basés sur la conservation des espèces et sur celle de l'enthalpie, et que la température de fin de combustion dépend de la quantité de gaz qui ne participent pas à la réaction, et notamment des inertes.

Les parois étant fixes, il n'y a pas de travail échangé avec l'extérieur ( $\tau = 0$ ), et le bilan enthalpique devrait s'écrire  $\sum \Delta H_i = Q$ , la sommation étant effectuée sur toutes les espèces présentes, supposées être des gaz idéaux. Une première difficulté existe ici, car cette équation suppose que le calcul de l'énergie interne des gaz présents dans la chambre soit fait en tenant compte de l'avancement de la réaction de combustion, c'est-à-dire en considérant l'évolution des variables chimiques. Cependant il est très rare dans la pratique industrielle que l'on opère ainsi : l'enthalpie d'un gaz idéal est généralement définie par rapport à la référence standard de 1 bar et 298 K, pour une composition donnée.

Pour tourner cette difficulté, on a coutume, bien que cela soit formellement en contradiction avec le premier principe, de réintroduire un peu artificiellement dans les équations de bilan un terme de génération d'énergie dans le volume, qui correspond à la chaleur  $Q_r$  libérée par la réaction de combustion. Cette manière de faire permet de ne pas tenir compte des variables chimiques, et donc de sensiblement simplifier le formalisme.

La chaleur libérée est ainsi égale au produit du débit de combustible par son Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI), sauf dans le cas où l'eau contenue dans les fumées peut être entièrement condensée, auquel cas c'est le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) qu'il faut considérer.

Les notions de facteur d'air, d'excès d'air et de richesse sont facilement compréhensibles, et les équations qui les lient sont très simples. Celles de dissociation, de température de figeage et de rendement de combustion sont plus complexes.

Le calculateur de combustions présenté section 3.3.2 de la première partie peut être utilisé pour faire faire des exercices pratiques aux élèves.

### 1.2.3 COMPRESSEURS ET TURBINES

Une approche simplifiée de la thermodynamique des compressions et des détente, lorsqu'on dispose d'un accès à un simulateur, consiste à faire bien prendre conscience aux élèves que, pour un gaz parfait le travail de compression (de détente) est proportionnel à la température absolue à l'entrée de la machine, et qu'il est une fonction croissante du rapport de compression (de détente). Il est en effet inutile d'explicitier les expressions donnant ce travail, qui ne sont valables que pour les gaz parfaits.

Il importe en revanche d'introduire les notions de rendement isentropique et, si le temps disponible le permet, de rendement polytropique, en indiquant bien qu'elles sont empiriques, et que l'approche polytropique correspond à l'hypothèse que les irréversibilités sont uniformément réparties, le rendement isentropique élémentaire étant égal au rendement polytropique.

L'approche pédagogique que nous préconisons permet d'introduire progressivement dans la formation des élèves (et notamment des ingénieurs) les outils de modélisation qu'ils rencontreront de plus en plus dans l'exercice de leur métier, et de les amener ainsi à les utiliser en étant capable de les critiquer et d'en connaître les limites.

Lors de l'apprentissage de la discipline, il est ainsi possible de privilégier une approche qualitative des choses, un certain nombre de calculs nécessaires pour les études quantitatives étant réalisés par les outils logiciels de manière transparente pour les étudiants, c'est-à-dire sans qu'ils aient besoin, au moins dans un premier temps, de savoir comment ils opèrent.

Un tri doit alors être fait entre ce qu'il est fondamental de bien maîtriser au niveau quantitatif (comme par exemple les grandes lois de conservation des variables extensives et les approches simplifiées permettant une résolution analytique), et ce qui ne l'est pas.

Il ne s'agit pas de minimiser l'importance du calcul pour l'étudiant, mais simplement de tirer le meilleur parti des outils disponibles et éviter de reprogrammer ce qui existe déjà. À titre d'exemple, considérons les calculs permettant d'étudier la compression d'une vapeur dans un compresseur centrifuge ou à piston non refroidi. On sait que la transformation peut presque toujours être considérée comme adiabatique, les échanges de chaleur avec l'extérieur de la machine étant négligeables. Connaissant le rendement isentropique  $\eta_c$  du compresseur, les conditions d'aspiration  $P_a$ ,  $T_a$  et la pression de refoulement  $P_r$ , le déroulement des calculs est alors le suivant :

1. on commence par calculer l'entropie à l'aspiration  $s(P_a, T_a)$  ;
2. on cherche la température  $T_s$  correspondant à la compression adiabatique

- réversible, c'est-à-dire isentropique, qui est donnée par l'équation  $s(\text{Pr}, \text{Ts}) = s(\text{Pa}, \text{Ta})$ , qu'il faut inverser en  $\text{Ts}$  ;
3. on calcule ensuite l'écart d'enthalpie entre le refoulement isentropique et l'aspiration, donné par la relation  $\Delta h_s = h(\text{Pr}, \text{Ts}) - h(\text{Pa}, \text{Ta})$  ;
  4. on en déduit l'enthalpie de fin de détente réelle  $h_r = h(\text{Pa}, \text{Ta}) + \Delta h_s / \eta_c$  ;
  5. on cherche enfin la température de refoulement  $\text{Tr}$  donnée par l'équation  $h(\text{Pr}, \text{Tr}) = h_r$  qu'il faut inverser en  $\text{Tr}$ .

Alors qu'il semble fondamental que les étudiants comprennent bien (et retiennent) les cinq étapes de cette séquence de calcul et leur justification physique, il paraît moins utile qu'ils sachent par eux-mêmes calculer avec toute la précision requise les fonctions d'état enthalpie et entropie de la vapeur considérée, et a fortiori inutile qu'ils écrivent les algorithmes permettant d'inverser ces fonctions pour trouver les températures  $\text{Ts}$  et  $\text{Tr}$ . Ces calculs, qui leur prendraient beaucoup de temps, sont aussi bien sinon mieux effectués par un outil informatisé.

#### 1.2.4 VANNES, FILTRES

La modélisation de ces composants est particulièrement simple : l'enthalpie du fluide est la même en sortie qu'en entrée.

## C. 2 Etude d'une centrale électrique à vapeur

Le cycle de Hirn (ou de Rankine avec surchauffe) utilise un fluide condensable, qui est refroidi à une pression et une température suffisantes pour qu'il soit entièrement liquéfié avant compression. Dans ces conditions, le travail de compression devient quasiment négligeable devant le travail de détente (alors qu'il en représente environ 60 % dans une turbine à gaz). Le liquide comprimé est vaporisé et surchauffé dans la chaudière par échange thermique avec la source chaude, puis détendu et condensé. L'état diphasique du fluide lors des phases de condensation et de vaporisation est très favorable pour les échanges de chaleur.

Il est bien évidemment possible de modéliser directement ce cycle dans Thermoptim. Nous ne détaillerons pas ici complètement cette manière d'opérer, qui est bien documentée dans le *guide de prise en mains*<sup>19</sup> relatif à la centrale à vapeur ou bien dans la *séance Diapason S26*<sup>20</sup>.

Nous en donnerons seulement un bref aperçu, après avoir présenté une manière de faire plus progressive qui peut bien convenir à des élèves débutants si l'enseignant souhaite qu'ils comprennent bien la manière dont les calculs sont effectués. Nous montrerons comment les élèves peuvent calculer le cycle pas à pas en procédant de deux manières différentes : tout d'abord en utilisant le calculateur-inverseur des propriétés des fluides, qui permet de ne pas faire appel à Thermoptim dans un premier temps, et ensuite en créant des points dans le progiciel. Une fois les points du cycle déterminés, ils peuvent être tracés dans les diagrammes thermodynamiques interactifs.

Cette manière de faire, qui diffère de la modélisation directe dans Thermoptim, présente sur le plan pédagogique l'intérêt que la démarche méthodologique de calcul d'un cycle doit être suivie de manière plus détaillée.

### 2.1 Présentation du cycle

1. le principe consiste à condenser l'eau à basse pression (et donc basse température), dans un échangeur en contact avec la source froide (généralement l'eau d'un fleuve ou l'air extérieur) : évolution (4-1). Au point 1, l'eau est à l'état liquide, à une température d'environ 20 °C, sous une

19 - <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/documentation/guide-prise-en-mains2897>

20 - <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/documentation/guide-prise-en-mains2897>

- faible pression (0,023 bar) ;
2. l'eau (à l'état liquide) est ensuite comprimée à une pression comprise entre 80 et 300 bars, selon les technologies utilisées : évolution (1-2). Pour une centrale électrique à flamme classique, la haute pression est voisine de 165 bars, ce qui représente un rapport de compression considérable (de l'ordre de 7 000). Cette compression peut en première approximation être supposée adiabatique, pour les raisons évoquées section 1.1.3, et même isentropique, les irréversibilités qui prennent place dans la pompe étant faibles ;
  3. l'eau sous pression est ensuite chauffée à pression constante dans une chaudière à flamme (fuel, charbon, gaz naturel). L'échauffement comporte trois étapes :
    - chauffage du liquide dans l'économiseur, de près de 20 °C jusqu'à la température de début d'ébullition à la pression considérée (environ 355 °C pour 165 bars) : évolution (2-3a) ;
    - vaporisation à température constante dans le vaporiseur : évolution (3a-3b) ;
    - surchauffe jusqu'à la température maximale du cycle (560 °C) dans le surchauffeur : évolution (3b-3).
  4. La vapeur est ensuite détendue dans une turbine de rendement isentropique voisin de 0,85, jusqu'à la pression de condensation évolution (3-4). L'évolution (3-4) est une détente adiabatique de 165 bars à 0,023 bar. Dans le cycle idéal, obtenu sans irréversibilités et donc à entropie constante, le point s'appelle 4s se trouve dans la zone mixte d'équilibre liquide-vapeur, son titre étant ici  $x = 0,74$ . Le point 4 correspondant au cycle réel est à la même pression que le point 4s mais son entropie est différente du fait des irréversibilités (plus grande d'après le second principe, ou bien en remarquant que ces irréversibilités ont pour effet d'augmenter l'enthalpie du fluide). Son enthalpie peut être déterminée si l'on connaît le rendement isentropique de la turbine.

Le mélange liquide-vapeur est enfin condensé jusqu'à l'état liquide dans un condenseur, échangeur entre le cycle et la source froide, par exemple ici l'eau d'un fleuve. Le cycle est ainsi refermé. Le schéma de la machine (figure ci-dessous) se déduit de ces considérations.

### Schéma d'une centrale à vapeur

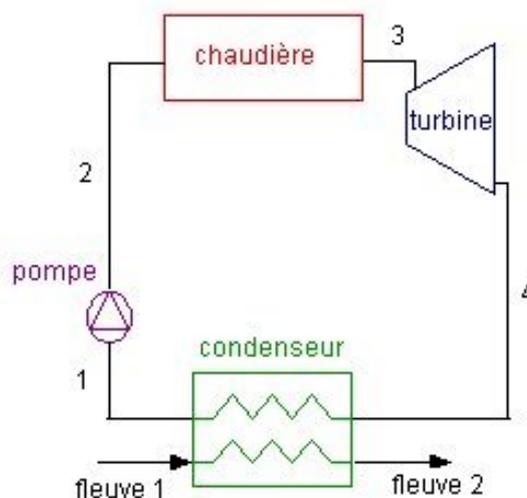


Schéma d'une centrale à vapeur

## 2.2 Technologie des composants

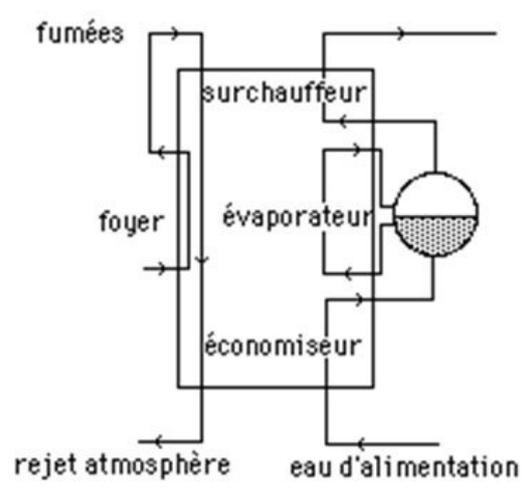
Une fois le schéma de principe de la machine ainsi défini, la discussion peut porter sur les technologies des divers composants. Les valeurs numériques qui ont été données dans la section précédente correspondent à un cycle de centrale thermique à flamme classique. Une telle centrale comprend quatre composants : une pompe, une chaudière, une turbine et un condenseur, traversés par le même débit d'eau. Pour les raisons exposées section 1.1.3, la pompe et la turbine peuvent être supposées adiabatiques. Quant à la chaudière et au condenseur, on peut en première approximation faire l'hypothèse qu'ils sont isobares (cf. sections 1.1.1 et 1.1.2).

La pompe est généralement du type centrifuge, multiétagée compte tenu du très haut rapport de compression à réaliser.

La chaudière remplit trois fonctions successives :

- chauffer l'eau d'alimentation pressurisée jusqu'à la température de vaporisation à la pression correspondante ;
- vaporiser l'eau ;
- et enfin la surchauffer à la température désirée.

Elle se comporte donc comme un triple échangeur, et peut être représentée du point de vue des échanges thermiques par le schéma de la figure ci-dessous.



*Schéma de la chaudière*

Les turbines à vapeur sont pour la plupart des turbines axiales multiétagées, qui peuvent être regroupées en deux grandes classes, selon la manière dont la détente se répartit entre le stator et le rotor :

- les turbines à action, dans lesquelles toute la détente du fluide est alors réalisée dans les aubages fixes ou tuyères, en amont de la roue, et les pressions en amont et en aval du rotor sont égales ;
- les turbines à réaction, dans lesquelles la détente est alors également répartie entre les tuyères du stator et la roue.

Chacun de ces deux types de turbine présente des avantages et des inconvénients qui lui sont propres : les turbines à action sont généralement utilisées pour les étages de tête des turbines multiétagées ou pour les unités de petite puissance, tandis que les turbines à réaction se révèlent bien adaptées pour les parties basse pression des turbines.

Le condenseur est un échangeur dont la particularité est de travailler en dépression par rapport à l'atmosphère, compte tenu de la faible tension de vapeur de l'eau à la température ambiante. La condensation à 20 °C implique que l'on maintienne dans le condenseur un vide assez poussé (0,023 bar), ce qui suppose un dispositif

d'extraction de l'air complexe compte tenu des fuites inévitables, d'autant plus qu'il faut recourir à des turbines basse pression gigantesques compte tenu du très faible volume spécifique de la vapeur d'eau à 20 °C, qui impose de très grands débits-volumes, et donc des sections de passage et des vitesses très élevées. La *fiche-guide de TD n°21*<sup>21</sup> traite de ce sujet un peu difficile. Elle sera proposée dans les activités d'approfondissement présentées dans la quatrième partie.

### 2.3 Calcul du cycle pas à pas avec le calculateur-inverseur

Pour calculer ce cycle pas à pas, nous commencerons par utiliser le calculateur inverseur, sachant que le principal intérêt qu'il y a à procéder ainsi est d'une part de bien décomposer les différentes étapes et d'autre part de ne pas avoir dans un premier temps à introduire Thermoptim.

#### 2.3.1 ETAT DU POINT 1

L'état du point 1 correspond au paramétrage du calculateur conformément à la figure du calculateur donnée ci-dessous. Le fluide sélectionné est l'eau, parmi les vapeurs condensables. Le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression étant égale à 0,023 bar, et la température de saturation imposée. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes (p et Pc sont en bar, h et u en kJ/kg, s en kJ/kg/K, v et Vc en m3/kg, M en kg et Tc en K) :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
0,023	19,746	0	82,837	82,834	0,29282	0,00100167	18,015	221,2	374,15	0,00317

Tableau 1 Etat du point 1

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
M (kg/kmol)	18,015	T (°C)	19,746
Pc (bar)	221,2	h (kJ/kg)	82,837
Tc (°C)	374,15	u (kJ/kg)	82,834
Vc (m3/kg)	0,00317	s (kJ/kg/K)	0,29282
titre x	0	v (m3/kg)	0,00100167

Etat du point 1

#### 2.3.2 ETAT DU POINT 2

Pour connaître l'état du point 2, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,s) la nouvelle pression étant égale à 165 bars, et l'entropie étant celle du point 1. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

21 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-fg21>

Vapeurs condensables

**H2O**

eau  
ammoniac  
butane  
méthane  
propane  
R11  
R12  
R13  
R134a  
R22

p (bar) 165

s (kJ/kg/K) 0,29282

p,T,x  
p,h  
p,s

°C

température de saturation imposée

221,2 374,15 0,00317

Calculer info

M (kg/kmol) 18,015 T (°C) 19,996

Pc (bar) 221,2 h (kJ/kg) 99,297

Tc (°C) 374,15 u (kJ/kg) 82,89

Vc (m3/kg) 0,00317 s (kJ/kg/K) 0,29281

titre x 0 v (m3/kg) 0,000994375

Etat du point 2

La température du point a à peine augmenté, et le travail mis en jeu, égal à la variation d'enthalpie entre les points 1 et 2, vaut  $99,297 - 82,837 = 16,46$  kJ/kg.

On peut vérifier facilement qu'il est à peu près égal à  $v \Delta P$ , égal à  $0,001 (16\ 500 - 2,3) = 16,5$  kJ/kg, P étant exprimé en Pa.

Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
165	19,99 6	0	99,29 7	82,89	0,2928 2	0,000994 38	18,01 5	221, 2	374,1 5	0,003 2

Tableau 2 Etat du point 2

### 2.3.3 ETATS DES POINTS 3a ET 3b

Pour connaître l'état des points 3a et 3b, le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression restant égale à 165 bars, et la température de saturation étant imposée, x valant successivement 0 puis 1. Des copier-coller depuis le champ des résultats fournissent les valeurs suivantes pour les deux points :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
165	349,82 7	0	1670,5 2	1641,8 3	3,778	0,001739 03	18,01 5	221, 2	374,1 5	0,003 2

Tableau 3 Etat du point 3a

et

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
165	349,82 7	1	2568,7 9	2423,0 7	5,2202	0,008831 63	18,01 5	221, 2	374,1 5	0,003 2

Tableau 4 Etat du point 3b

### 2.3.4 ETAT DU POINT 3

Pour connaître l'état du point 3, le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la

pression restant égale à 165 bars, et la température valant 560 °C. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
165	560	1	3459,6 2	3113,5 2	6,4955	0,020975 7	18,01 5	221, 2	374,1 5	0,003 2

Tableau 5 Etat du point 3

La chaleur Q à fournir par la chaudière est égale à la variation d'enthalpie entre les points 2 et 3 :  $Q = 3360,32 \text{ kJ/kg}$ .

**2.3.5 ETAT DU POINT 4s**

Pour connaître l'état du points 4s, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,s) la nouvelle pression étant celle de condensation, égale à 0,023 bar, et l'entropie étant celle du point 3. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
0,02 3	19,74 6	0,7 4	1899, 6	1799,6 8	6,4955	43,4468	18,01 5	221, 2	374,1 5	0,003 2

Tableau 6 Etat du point 4s

La variation d'enthalpie correspondant à la détente réversible est égale à  $h_{4s} - h_3$ , soit  $\Delta h_s = -1560 \text{ kJ/kg}$ . Sa valeur négative provient des conventions utilisées en thermodynamique, le travail étant fourni à l'extérieur du système considéré.

La valeur du travail de détente réel  $\Delta h$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\eta_s \Delta h_s$  soit :

$$\Delta h = 0,85 (-1560) \text{ kJ/kg} = -1326 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 4 est donc égale à celle du point 3 plus  $\Delta h$  (en valeur algébrique), soit 2133,61 kJ/kg

**2.3.6 ETAT DU POINT 4**

Pour connaître l'état du points 4, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,h) la pression restant égale à 0,023 bar, et l'enthalpie étant celle du point 4'. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

Vapeurs condensables

**H2O**

eau  
ammoniac  
butane  
méthane  
propane  
R11  
R12  
R13  
R134a

p (bar) 0,023

h (kJ/kg) 2133,60565

p,T,x  
p,h  
p,s

°C

température de saturation imposée

Calculer info

221,2 374,15 0,00317

M (kg/kmol) 18,015 T (°C) 19,746

Pc (bar) 221,2 h (kJ/kg) 2133,606

Tc (°C) 374,15 u (kJ/kg) 2020,808

Vc (m3/kg) 0,00317 s (kJ/kg/k) 7,2944

titre x 0,83537 v (m3/kg) 49,04266

Etat du point 4

Le titre en sortie de turbine vaut 0,835.

Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
0,023	19,746	0,835	2133,606	2020,808	7,2944	49,04266	18,015	221,2	374,15	0,00317

Tableau 7 Etat du point 4

### 2.3.7 BILAN GLOBAL DU CYCLE

Les calculs précédents ont permis d'estimer la chaleur  $Q$  fournie par la chaudière (3360,32 kJ/kg), et le travail net est égal en valeur absolue à la différence entre celui produit par la turbine (1326 kJ/kg) et celui consommé par la pompe (16,4 kJ/kg), soit 1309,55 kJ/kg.

Le rendement du cycle est égal au rapport de ces deux valeurs. Il vaut donc  $\eta = 1309,55/3360,32 = 38,97\%$ .

## 2.4 Calcul du cycle pas à pas avec les points de ThermoOptim

Les écrans des points de ThermoOptim permettent de faire les mêmes calculs que ceux que nous venons d'effectuer. Comme nous allons le voir, les résultats sont identiques, mais cela suppose de tout de suite initier les élèves à une partie des fonctionnalités du simulateur.

Tant que l'on ne définit pas les transfos, l'éditeur de schémas ne doit pas être utilisé. Les points peuvent en effet être directement créés depuis l'écran du simulateur, en double-cliquant sur le bandeau de la table des points. Une fois qu'un point existe, le bouton « Dupliquer » permet d'en générer un autre sans avoir à entrer le corps.

### 2.4.1 ETAT DU POINT 1

L'état du point 1 est donné figure ci-dessous. La pression est entrée, l'option « imposer la température de saturation » sélectionnée, avec un titre égal à 0.

point	1	liens		
corps	eau	afficher	Dupliquer	Sauver
	<input type="checkbox"/> mélange externe	Supprimer	Fermer	
<b>Système ouvert (T,P,h)   Système fermé (T,v,u)   Mélanges humides</b>				
P (bar)	0,023	<input checked="" type="radio"/> P et T connus		
<input type="checkbox"/> pression contrôlée	h (kJ/kg)	82,83661159	<input type="radio"/> P et h connus	
	s (kJ/kgK)	0,292821436	<input type="radio"/> P et s connus	
	exergie (kJ/kg)	-1,5399		
T (°C)	19,74562	<input type="radio"/> non contraint		
T (K)	292,9	<input type="radio"/> imposer la pression de saturation		
titre	0	<input checked="" type="radio"/> imposer la température de saturation		
u (kJ/kg)	82,83430774	écart Tsat	0	
s (kJ/kgK)	0,292821436			
V (m3/kg)	0,00100167242	Calculer		

Etat du point 1

### 2.4.2 ETAT DU POINT 2

Pour connaître l'état du point 2, le point doit être paramétré en mode de calcul « P et s connus », la nouvelle pression étant égale à 165 bars, et l'entropie étant celle du point 1. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

point	2	liens		
corps	eau	afficher	Dupliquer	Sauver
	<input type="checkbox"/> mélange externe	Supprimer	Fermer	
<b>Système ouvert (T,P,h)   Système fermé (T,v,u)   Mélanges humides</b>				
P (bar)	165	<input type="radio"/> P et T connus		
<input type="checkbox"/> pression contrôlée	h (kJ/kg)	99,29742504	<input type="radio"/> P et h connus	
	s (kJ/kgK)	0,292808673	<input checked="" type="radio"/> P et s connus	
	exergie (kJ/kg)	14,9246		
T (°C)	19,99591382	<input checked="" type="radio"/> non contraint		
T (K)	293,15	<input type="radio"/> imposer la pression de saturation		
titre	0	<input type="radio"/> imposer la température de saturation		
u (kJ/kg)	82,89023433			
s (kJ/kgK)	0,292808673			
V (m3/kg)	0,000994375195	Calculer		

Etat du point 2

La température du point a à peine augmenté, et le travail mis en jeu, égal à la variation d'enthalpie entre les points 1 et 2, vaut  $99,297 - 82,837 = 16,46$  kJ/kg.

On peut vérifier facilement qu'il est à peu près égal à  $v \Delta P$ , égal à  $0,001 (16\ 500 - 0,23) = 16,5$  kJ/kg, P étant exprimé en Pa.

### 2.4.3 ETATS DES POINTS 3a ET 3b

Pour connaître l'état des points 3a et 3b, le paramétrage doit être « P et T connus », la pression restant égale à 165 bars, et la température de saturation étant

imposée,  $x$  valant successivement 0 puis 1.

#### 2.4.4 ETAT DU POINT 3

Pour connaître l'état du point 3, le paramétrage doit être « P et T connus », la pression restant égale à 165 bars, et la température valant 560 °C.

La chaleur  $Q$  à fournir par la chaudière est égale à la variation d'enthalpie entre les points 2 et 3 :  $Q = 3360,32$  kJ/kg.

#### 2.4.5 ETAT DU POINT 4s

Pour connaître l'état du point 4s, le paramétrage doit être « P et s connus », la nouvelle pression étant celle de condensation, égale à 0,023 bar, et l'entropie étant celle du point 3.

La variation d'enthalpie correspondant à la détente réversible est égale à  $h_{4s} - h_3$ , soit  $\Delta h_s = -1560$  kJ/kg. Sa valeur négative provient des conventions utilisées en thermodynamique, le travail étant fourni à l'extérieur du système considéré.

La valeur du travail de détente réel  $\Delta h$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\eta_s \Delta h_s$  soit :

$$\Delta h = 0,85 (-1560) \text{ kJ/kg} = -1326 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 4 est donc égale à celle du point 3 plus  $\Delta h$  (en valeur algébrique), soit 2133,61 kJ/kg

#### 2.4.6 ETAT DU POINT 4

Pour connaître l'état du point 4, le paramétrage doit être « P et s connus », la pression restant égale à 0,023 bar, et l'enthalpie étant celle du point 4. Le calcul conduit à la figure ci-dessous. Le titre en sortie de turbine vaut 0,835.

point	4		
corps	eau	afficher	Dupliquer Sauver
			Supprimer Fermer
Système ouvert (T,P,h) Système fermé (T,v,u) Mélanges humides			
P (bar)	0,023		<input type="radio"/> P et T connus
h (kJ/kg)	2 133,61000039		<input checked="" type="radio"/> P et h connus
s (kJ/kg·K)	7,29442624		<input type="radio"/> P et s connus
exergie (kJ/kg)	31,7211		
T (°C)	19,74562077	<input checked="" type="radio"/> non contraint	
T (K)	292,9	<input type="radio"/> imposer la pression de saturation	
titre	0,835372108	<input type="radio"/> imposer la température de saturation	
u (kJ/kg)	2 020,81163586		
s (kJ/kg·K)	7,29442624		
V (m <sup>3</sup> /kg)	49,04276719		Calculer

Etat du point 4

#### 2.4.7 BILAN GLOBAL DU CYCLE

Les calculs précédents ont permis d'estimer la chaleur  $Q$  fournie par la chaudière (3360,32 kJ/kg), et le travail net est égal en valeur absolue à la différence entre celui produit par la turbine (1326 kJ/kg) et celui consommé par la pompe (16,4 kJ/kg), soit 1309,55 kJ/kg.

Le rendement du cycle est égal au rapport de ces deux valeurs. Il vaut donc  $\eta =$

1309,55/3360,32 = 38,97 %.

## 2.5 Modélisation directe dans ThermoOptim

La modélisation directe du cycle dans ThermoOptim est celle qui est présentée de manière détaillée dans le guide de prise en mains relatif à la centrale à vapeur et dans la séance Diapason S26. Nous nous contenterons ici d'en rappeler les grandes lignes.

### 2.5.1 CREATION DU SCHEMA

Dans cette approche, l'élève commence par travailler avec l'éditeur de schémas, plaçant les différents composants sur la palette et saisissant pour chacun d'eux un tout petit nombre d'informations. Il aboutit ainsi à un schéma du type de celui présenté figure ci-dessous, qu'il transfère dans le simulateur : la seule différence avec le schéma-bloc est l'apparition des trois parties de la chaudière, préalablement non distinguées.

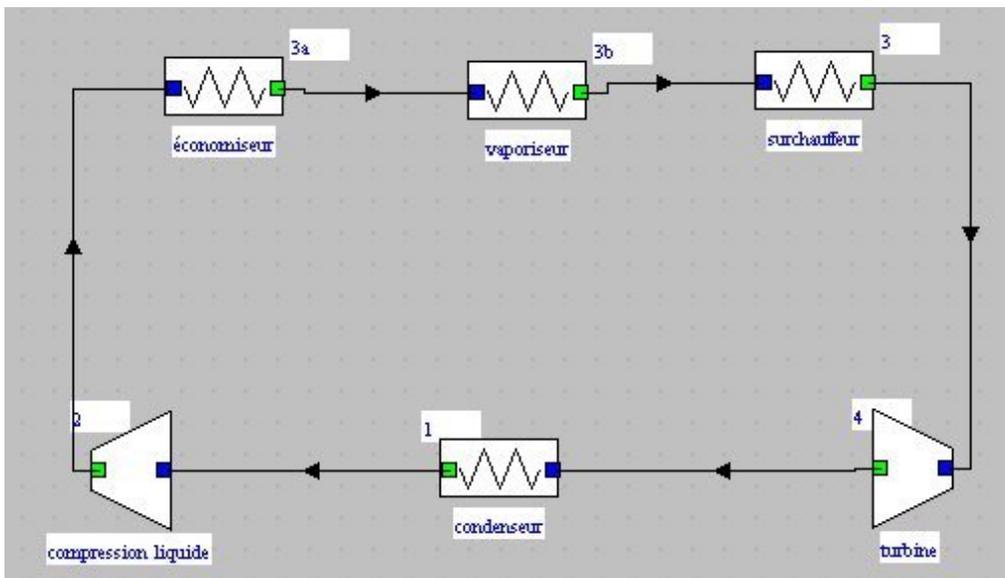


Schéma du cycle à vapeur

### 2.5.2 PARAMETRAGE DU CYCLE

Dans un second temps, l'élève paramètre sur le plan thermodynamique les points dont l'état est parfaitement connu (1, 3a, 3b, 3), et les transfos compression et détente, ce qui permet de calculer les deux autres points.

### 2.5.3 COMPARAISON DES DEUX APPROCHES PEDAGOGIQUES

L'intérêt de la modélisation directe dans ThermoOptim est qu'elle se fait dans un premier temps dans l'éditeur de schémas, l'architecture du cycle étant très proche de celle du schéma-bloc.

L'élève commence donc par réfléchir à la structure globale du cycle, sans avoir à se préoccuper de la manière dont les calculs sont effectués dans chaque composant. La modélisation est grandement facilitée, ce qui est un atout sur le plan psychologique, car l'élève est vraiment convaincu que le simulateur lui permet de « faire de la thermo sans peine ». Il est donc encouragé à continuer, ses appréhensions initiales vis à vis de la discipline s'estompant.

Le risque est qu'il ait tendance à utiliser le logiciel de façon « presse-bouton », sans bien comprendre la méthodologie sous-jacente. Le parti pris pédagogique est donc un peu différent de celui qui a été retenu dans les sections 2.3 et 2.4, où l'enseignant considère fondamental que l'élève ait pleinement conscience de l'enchaînement des calculs.

Dans tous les cas, les calculs sont effectués par un logiciel, ce qui correspond bien

au même paradigme global, celui de la réduction des difficultés calculatoires, mais le degré d'implication de l'élève n'est pas le même. Les deux approches pédagogiques constituent donc des variantes entre lesquelles l'enseignant choisira, en fonction du contexte auquel il est confronté.

## 2.6 Représentation dans les diagrammes

Une fois les points du cycle déterminés, il est possible de le tracer dans les diagrammes usuels, notamment les diagrammes entropique, des frigoristes et de Mollier.

Dans ce qui précède, nous avons introduit les points 4s et 4, le premier étant un intermédiaire qui n'a pas besoin d'être représenté. Dans ce qui suit, pour simplifier les notations, nous n'afficherons que le point 4.

Si le cycle a été calculé en créant des points dans Thermoptim, comme expliqué dans les sections 2.3 ou 2.5, leur tracé dans les diagrammes peut être directement effectué en utilisant l'interface entre le simulateur et les diagrammes. S'il a été calculé avec le calculateur-inverseur, il faut commencer par créer les points dans le simulateur.

### 2.6.1 SAISIE DIRECTE DES POINTS DANS L'ÉDITEUR DE CYCLES

Il est possible d'entrer directement les points dans l'éditeur de cycles du diagramme, en opérant de la manière suivante.

Une fois le diagramme des vapeurs de l'eau ouvert, l'éditeur de cycles est accessible à partir du menu Cycle ou en tapant Ctrl C (figure ci-dessous).

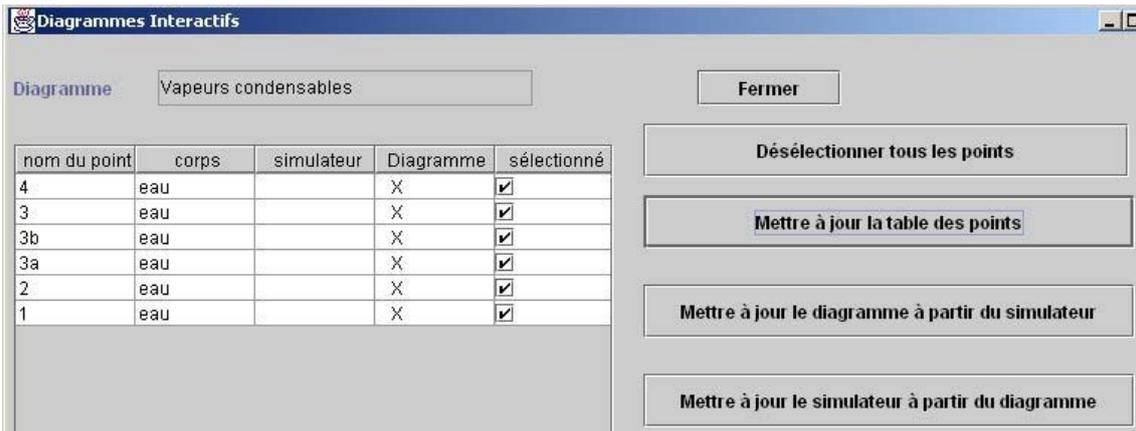
nom du point	température T (°C)	pression P	enthalpie h	entropie s	volume v	titre x
4	19,746	0,023	2 133,61	7,2944	0	0,835
3	560	165	3 459,62	6,4955	0	1
3b	349,827	165	2 568,79	5,2202	0	1
3a	349,827	165	1 670,52	3,778	0	0
2	19,996	165	82,89	0,29282	0	0
1	19,746	0,023	82,837	0,29282	0	0

*Saisie directe des points dans l'éditeur de cycles*

En utilisant le bouton Insérer, il est alors possible d'entrer les différents points un par un. La seule contrainte est que, le bouton de recalcul n'étant pas disponible dans la version Education Salle de cours de Thermoptim, il faut entrer à la main toutes les valeurs des variables (T, P, x, s et h) pour que le cycle soit correctement construit.

Notons qu'une fois ces points créés dans l'environnement des diagrammes, il est possible de les transférer dans le simulateur en utilisant l'interface qui les relie.

Dans l'écran de l'interface (figure ci-dessous), il faut commencer par mettre à jour la table des points, puis mettre à jour le simulateur à partir du diagramme.



Interface diagramme - simulateur

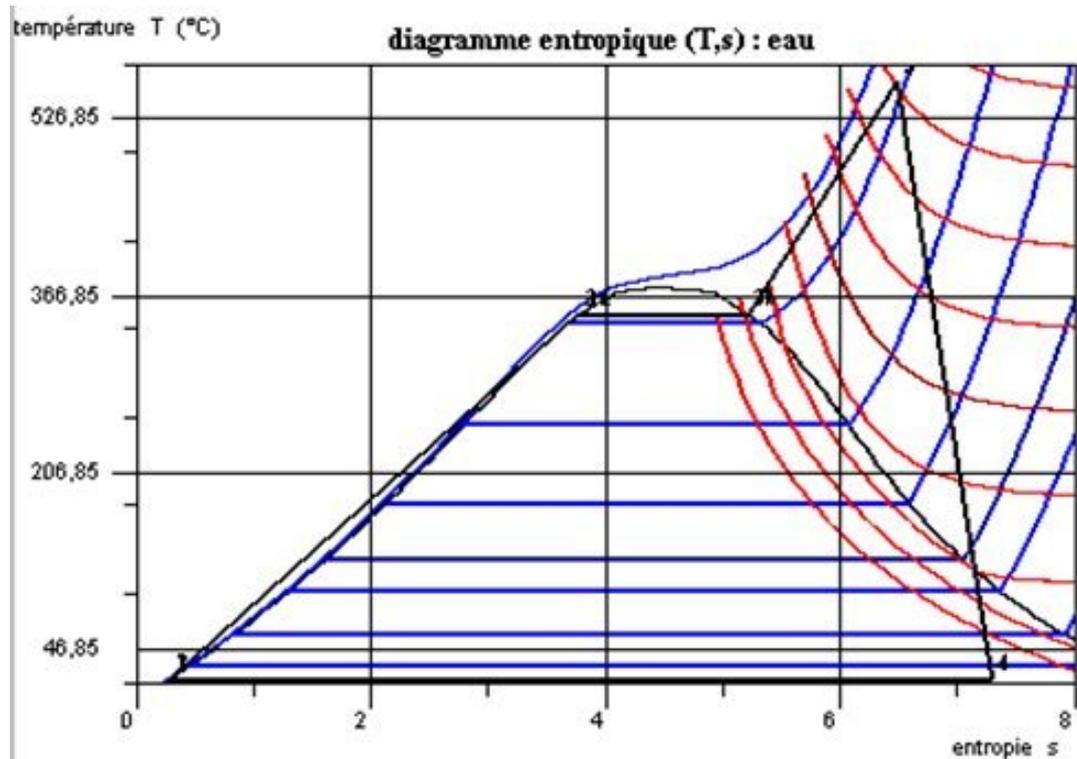
Les points sont alors créés dans le simulateur. Une fois ce transfert effectué, il est toutefois préférable de reprendre les paramétrages des points un par un, notamment pour imposer la température de saturation lorsque nécessaire.

### 2.6.2 TRACE DANS LE DIAGRAMME ENTROPIQUE

Sur le diagramme entropique (figure ci-dessous), pour augmenter la lisibilité, on n'a fait apparaître que les isobares (en bleu), et les isenthalpes (en rouge). Les points 1 et 2 représentant la compression à l'état liquide sont quasiment superposés, et l'échauffement à l'état liquide presque confondu avec la courbe de saturation liquide. La vaporisation se fait selon un segment de droite horizontale.

Les trois étapes de l'échauffement sont bien visibles :

- chauffage du liquide dans l'économiseur, de près de 20 °C jusqu'à la température de début d'ébullition à la pression considérée (environ 355 °C pour 165 bars) : évolution (2-3a) ;
- vaporisation à température constante dans le vaporiseur : évolution (3a-3b). La vaporisation s'effectuant à pression et température constantes, elle se traduit sur le diagramme entropique par un segment horizontal 3a-3b. Le point 3b se trouve donc sur la branche descendante de la courbe de vaporisation, ou courbe de rosée, à son intersection avec la droite horizontale de température 355 °C, toujours à la pression P2 de 165 bars ;
- surchauffe jusqu'à la température maximale du cycle (560 °C) dans le surchauffeur : évolution (3b-3). Le point 3 se trouve donc à l'intersection de l'isobare P = 165 bars et de l'horizontale d'ordonnée T = 560 °C.



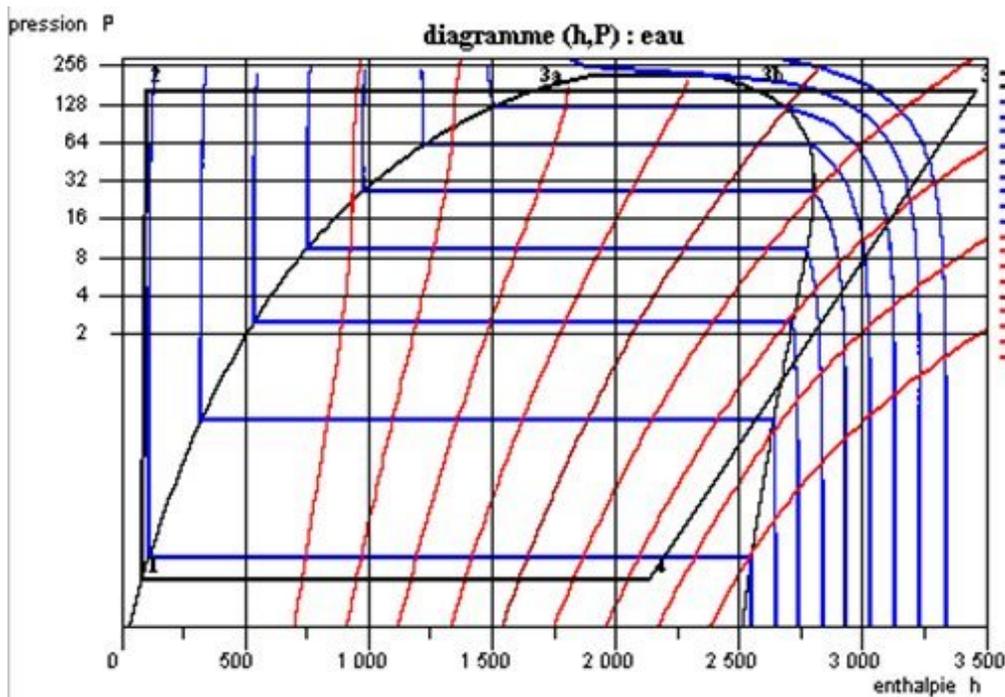
*Cycle vapeur dans le diagramme entropique*

La surchauffe isobare correspond à la pointe maximale du cycle, et la détente irréversible se traduit par une augmentation de l'entropie, le point 4 étant situé dans la zone d'équilibre liquide-vapeur (titre égal à 0,835).

La forme de ce cycle s'écarte assez sensiblement de celle de celui de Carnot, compte tenu de l'allure des isobares. Il est possible de l'améliorer en procédant à des resurchauffes qui conduisent à une détente dite para-isotherme, et à des prélèvements qui permettent d'effectuer une régénération partielle. De telles variantes seront proposées aux élèves dans l'étape de consolidation de leurs connaissances (cf. troisième partie).

### 2.6.3 TRACE DANS LE DIAGRAMME DES FRIGORISTES

Sur le diagramme des frigoristes ( $h, \log P$ ) (figure ci-dessous), pour augmenter la lisibilité, on n'a fait apparaître que les isothermes (en bleu), et les isentropes (en rouge). La compression à l'état liquide est ici représentée par le segment (1 - 2) quasiment vertical très visible.



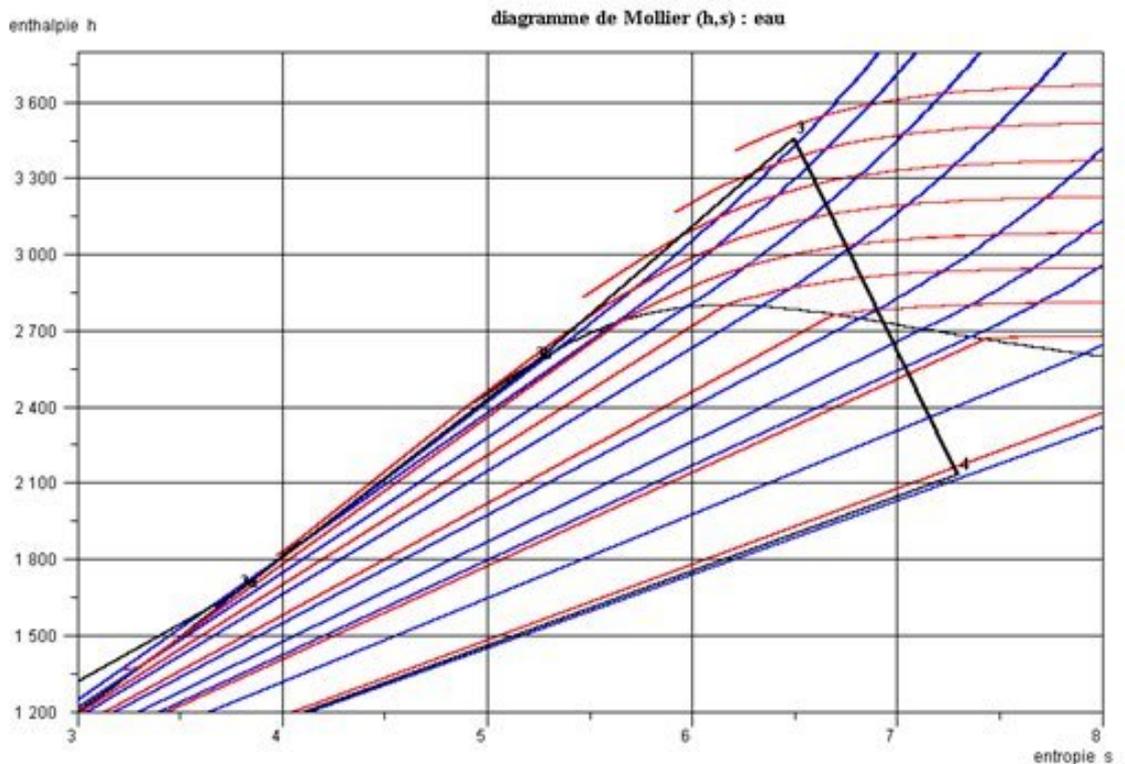
Cycle vapeur dans le diagramme des frigoristes

Si l'on néglige les pertes de charge dans le générateur de vapeur ou la chaudière, l'ensemble de l'échauffement correspond à l'horizontale (2-3), les trois parties représentant l'économiseur, le vaporiseur et le surchauffeur apparaissant très distinctement. La détente irréversible se traduit par une augmentation de l'entropie, le point 4 étant situé dans la zone d'équilibre liquide-vapeur.

Comme on le voit sur cet exemple, la représentation du cycle dans le diagramme  $(h, \log P)$  est très parlante sur le plan physique : les échanges de chaleur, quasiment isobares, correspondent aux segments horizontaux, et les compressions et les détentes sont proches des isentropes, d'autant moins pentues que l'on s'écarte de la zone liquide.

#### 2.6.4 TRACE DANS LE DIAGRAMME DE MOLLIER

Sur le diagramme de Mollier (figure ci-dessous), dont on n'a fait, pour des raisons de lisibilité, apparaître que la partie droite et seulement les isobares (en bleu) et les isothermes (en rouge), les points 1 et 2 (hors figure) représentant la compression à l'état liquide sont quasiment superposés, et l'échauffement à l'état liquide presque confondu avec la courbe de saturation liquide. La vaporisation se fait selon un segment de droite de pente T.



Cycle vapeur dans le diagramme de Mollier

La surchauffe isobare correspond à la pointe maximale du cycle, et la détente irréversible se traduit par une augmentation de l'entropie, le point 4 étant situé dans la zone d'équilibre liquide-vapeur (titre égal à 0,835).

### 2.7 Création dans Thermoptim des transfos à partir des points

Si le cycle a été modélisé sans utiliser l'éditeur de schémas de Thermoptim, (cf. sections 2.3 et 2.4), et que les points du cycle ont été créés ou transférés dans le simulateur afin de pouvoir les représenter dans les diagrammes, le projet se présente comme indiqué figure ci-dessous.

Nom du projet : test Schéma associé :

6 POINTS

nom du point	corps	P (bar)	T (°C)
1	eau	0,023	19,74562
2	eau	165	19,98524
3a	eau	165	349,82707
3b	eau	165	349,82707
3	eau	165	560
4	eau	0,023	19,74562

0 TRANSFOS

nom transfo	point amont	point aval	type transfo

**Bilan**

efficacité

énergie utile

énergie payante

**Recalculer**

Cycle à vapeur dans le simulateur

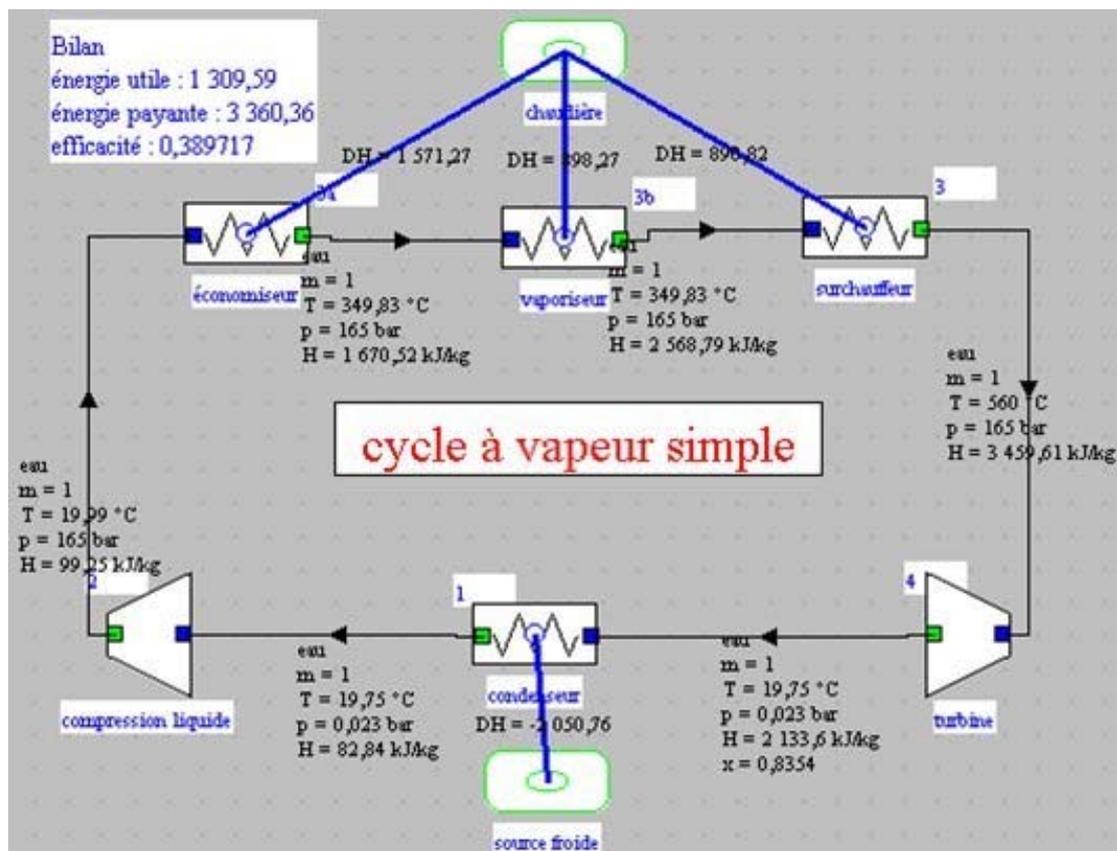
Pour finir de représenter le cycle dans Thermoptim, il faut maintenant relier ces points par des transfos, ce qui peut être fait très simplement à partir de l'éditeur de schémas. Il suffit pour cela de sélectionner dans la palette les différents

composants, en entrant dans les champs définissant les ports d'entrée et de sortie leurs différents noms et leur corps (de l'eau).

Les points étant tous connus, les transfos doivent être initialement paramétrées en conséquence. En particulier la pompe et la turbine doivent recalculer la valeur du rendement, le point aval étant connu.

Une fois ces valeurs déterminées, le paramétrage peut être changé si l'on désire pouvoir simuler d'autres cas.

Le synoptique de l'installation se déduit des remarques précédentes (figure ci-dessous). Il correspond bien sûr au schéma de la figure de la section 2.5.1, auquel on a ajouté les sources de chaleur externes pour montrer que la machine interagit avec son environnement. On a aussi fait apparaître le cartouche avec le bilan du cycle, et on retrouve bien les valeurs qui avaient été déterminés par le calcul pas à pas.



Synoptique du cycle à vapeur

Ce cycle peut être directement obtenu en chargeant dans ThermoOptim l'exemple intitulé « t1\_6.1 cycle à vapeur simple » à partir du catalogue d'exemples.

## 2.8 Activités pédagogiques connexes avec les élèves

### 2.8.1 Diagrammes thermodynamiques

L'utilisation des seuls diagrammes thermodynamiques permet déjà de faire effectuer aux élèves de nombreuses activités intéressantes relatives aux fluides, préalables à l'étude des composants et des systèmes :

- en premier lieu, bien évidemment, discuter de l'intérêt des différents types de diagrammes et de leur construction. Les explications données dans le portail permettent de le faire dans une très large mesure ;
- l'enseignant peut demander aux élèves de construire pas à pas les diagrammes, en affichant successivement les différentes courbes

d'isovaleurs, et en cherchant à chaque fois une explication à la forme qu'elles prennent : pourquoi y a-t-il ou non changement de pente au niveau de la courbe de saturation...

- il est aussi intéressant de visualiser la zone des gaz parfaits, qui est très limitée sur les diagrammes des vapeurs : il s'agit de leur partie inférieure droite, où par exemple, dans le diagramme entropique, les isenthalpes se rapprochent de l'horizontale, et dans le diagramme des frigoristes, les isothermes de la verticale. Il est alors clair que les transformations ne peuvent pas être calculées avec précision si l'on fait l'hypothèse des gaz parfaits ;
- dans la zone d'équilibre liquide-vapeur, on peut remarquer que les isobares et les isothermes sont des segments horizontaux confondus, étant donné que la pression et la température sont liées par la loi de pression saturante ;
- tracer les évolutions typiques dans les diagrammes (on crée pour cela deux points dans le simulateur, que l'on calcule, puis transfère dans les diagrammes) ;
- illustrer, dans le diagramme des gaz idéaux, la relation  $C_p > C_v$  en étudiant les pentes des isobares et des isochores ;
- les diagrammes permettent aussi aux élèves de réfléchir au nombre de variables indépendantes nécessaires pour calculer l'état d'un fluide, aux notions de grandeurs intensives et extensives...

### 2.8.2 Cycle de centrale à vapeur

Autour du cycle de centrale à vapeur, de nombreuses activités intéressant les élèves peuvent prendre place :

- en premier lieu, bien évidemment, discuter de l'intérêt des différents types de diagrammes (l'enseignant qui le désire pourra pour cela se référer à la section 2.6.6.1 de [1]).
- réfléchir sur la notion d'efficacité du cycle, égale au rapport de l'énergie utile (ici essentiellement le travail de détente) à l'énergie payante (ici la chaleur fournie par la chaudière) ;
- comparer cette valeur avec celle du cycle de Carnot fonctionnant entre 20 °C (source froide) et 560 °C (température maximale du cycle), pour se faire une idée de l'écart du cycle réel (0,39) par rapport au cycle idéal (0,65). D'une manière plus générale, discuter des écarts entre le cycle réel et celui de Carnot ;
- étudier l'évolution de l'efficacité du cycle et de la puissance produite lorsque la pression et la température du cycle varient ;
- comparer qualitativement ce cycle par rapport au cycle de Carnot, en identifiant les écarts qui existent entre eux.

Des études de variantes peuvent ensuite être proposées. On pourra en particulier se référer au chapitre 6 de la référence [2], où sont proposés divers exemples, qui seront aussi repris dans les activités de la deuxième étape de formation des élèves :

- une première idée pour améliorer le cycle de Hirn consiste à se rapprocher du cycle de Carnot en effectuant des resurchauffes (ou réchauffes). Dans ce cas, on commence par détendre partiellement le fluide, puis on le refait passer dans la chaudière, où il est réchauffé, à la nouvelle pression, jusqu'à la température maximale du cycle. Cette opération peut le cas échéant être répétée plusieurs fois, générant ce que l'on appelle une para-isotherme ;
- une autre manière d'améliorer le cycle consiste à effectuer une régénération au moins partielle, en utilisant une partie de l'enthalpie disponible en fin de détente pour préchauffer l'eau comprimée à l'état liquide ;
- le cycle à prélèvement et réchauffe (avec par exemple un taux de

prélèvement égal à 15 %, et une température de réchauffe identique à celle de surchauffe initiale) correspond à la combinaison de ces deux améliorations ;

- un cycle à vapeur supercritique avancé à deux réchauffes, étudié comme cas limite compte tenu des niveaux de pression et de température choisis : pressions égales à 0,023, 6,5, 76 et 415 bars, et température de surchauffe et de réchauffe de 704 °C ;
- un cycle de centrale nucléaire du type Réacteur à Eau Pressurisée (REP), dont la pression dans le générateur est voisine de 60 bars, et la température de la vapeur 275 °C.

## 2.9 Exploration de cycles existants

---

Dans ce qui précède, nous avons montré comment calculer pas à pas le cycle de la centrale à vapeur, puis comment le modéliser dans Thermoptim, en partant du principe que l'objectif pédagogique visé était d'apprendre aux élèves à acquérir ce savoir-faire tout en assimilant des connaissances déclaratives suffisantes pour comprendre les fondements de ces opérations.

Il existe cependant des contextes pédagogiques où cette manière de procéder ne peut pas être adoptée, essentiellement par manque de temps, et où cependant l'enseignant souhaite que ses élèves puissent utiliser Thermoptim et les diagrammes interactifs, sans construire par eux-mêmes les modèles.

C'est par exemple le cas dans certaines Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles (CPGE) où le volume horaire est insuffisant pour opérer comme nous l'avons fait dans les sections précédentes. Pourtant, de nombreux enseignants considèrent pédagogiquement pertinent d'utiliser Thermoptim, car cela permet aux élèves de voir comment les équations qu'ils étudient peuvent être mises en application. Leur programme acquiert ainsi dans leur esprit davantage de sens : il correspond à un savoir qui peut être vraiment utilisé.

Dans de tels cas, une alternative pédagogique à celles que nous avons présentées jusqu'ici consiste à faire travailler les élèves sur des exemples déjà modélisés, en leur demandant de les explorer et de les comprendre. Ils peuvent aussi modifier les paramètres et réaliser quelques études de sensibilité.

S'il souhaite faire étudier la centrale à vapeur simple de cette manière, l'enseignant sélectionne alors dans le catalogue d'exemples de Thermoptim l'exemple intitulé « t1\_6.1 cycle à vapeur simple » à partir du catalogue d'exemples et demande à ses élèves de le charger.

Le projet étant chargé, il commence par passer en revue les différents composants, en fournissant à ses élèves des explications technologiques et thermodynamiques. Ensuite, il peut leur demander de procéder à des changements de paramétrage et d'en étudier l'impact sur les performances globales du cycle.

Même si elle peut paraître un peu limitée, cette approche pédagogique peut se révéler très féconde, les élèves s'impliquant souvent beaucoup plus lorsqu'ils ont un simulateur à leur disposition que devant une feuille de papier ou un tableau. Elle est en particulier souvent appropriée en formation professionnelle, les élèves étant généralement assez réticents devant les approches disciplinaires académiques. Ils préfèrent avoir l'outil logiciel entre leurs mains pour pouvoir l'explorer à leur guise et poser des questions aux enseignants qui les encadrent.

## D. 3 Etude d'une turbine à gaz

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois éléments :

- un compresseur, généralement centrifuge ou axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars environ ;
- une chambre de combustion, dans laquelle du combustible injecté sous pression est brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement ;
- une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion.

Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un moteur à combustion interne à flux continu. On notera que le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide de travail, qui reste toujours gazeux, et non du combustible utilisé, qui peut être aussi bien gazeux que liquide (les turbines à gaz utilisent généralement du gaz naturel ou du fuel oil domestique). Il existe aussi des turbines à gaz à cycle fermé, utilisées pour des applications particulières. Bien évidemment, il s'agit alors de moteurs à combustion externe.

L'étude thermodynamique d'un tel cycle, appelé **cycle de Brayton**, peut être effectuée de différentes manières, selon le niveau des élèves et le parti-pris pédagogique de l'enseignant.

Il est bien évidemment possible de modéliser directement ce cycle dans Thermoptim en faisant très peu d'hypothèses simplificatrices. Nous ne détaillerons pas ici complètement cette manière d'opérer, qui est bien documentée dans le *guide de prise en mains*<sup>22</sup> relatif à la turbine à gaz ou bien dans la *séance Diapason S24*<sup>23</sup>.

Une question importante est de savoir s'il faut commencer par **prendre en compte la réaction de combustion**. Dans ce qui suit, nous considérerons que, ce chapitre étant destiné à présenter les activités d'initiation, il est préférable de ne pas le faire, afin de simplifier la modélisation. Dans ce cas, la chambre de combustion est remplacée par un échangeur qui permet de chauffer l'air à la température d'entrée turbine désirée.

Il est alors possible d'opérer progressivement, en opérant comme suit :

- on commence par faire l'hypothèse que la machine est traversée par un gaz unique, l'air, modélisé dans un premier temps comme un gaz parfait, et dans un deuxième temps comme un gaz idéal. Le modèle qui en résulte est bien évidemment simpliste, mais il reste intéressant sur le plan didactique, car il permet de faire le lien entre les calculs théoriques analytiques et leur résolution précise ;
- on ne tient compte qu'ensuite de la réaction de combustion qui prend place dans les machines industrielles, ce qui permet d'élaborer un modèle beaucoup plus réaliste. La comparaison avec le modèle analytique permet d'en analyser les limites.

Les séances Diapason *S21*<sup>24</sup> et *S22*<sup>25</sup> correspondent à des modélisations directes dans Thermoptim retenant précisément cette approche.

Nous en donnerons seulement ici un bref aperçu, après avoir présenté une manière de faire qui peut convenir à des élèves débutants si l'enseignant souhaite qu'ils comprennent bien la manière dont les calculs sont effectués. Nous montrerons comment les élèves peuvent calculer le cycle pas à pas en procédant de deux manières différentes : tout d'abord en utilisant le calculateur-inverseur des propriétés des fluides, qui permet de ne pas faire appel à Thermoptim dans un premier temps, et ensuite en créant des points dans le progiciel. Une fois les points du cycle déterminés, ils peuvent être tracés dans le diagramme entropique.

22 - <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/documentation/guide-prise-en-mains>

23 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s24-modele-tag-reelle>

24 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s21-modele-tag-air>

25 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s22-modele-tag>

Cette manière de faire, qui diffère de la modélisation directe dans Thermoptim, présente sur le plan pédagogique l'intérêt que la démarche méthodologique de calcul d'un cycle doit être suivie de manière plus détaillée. Sa limite est que la combustion ne peut être prise en compte correctement.

### 3.1 Présentation du cycle

1. l'air est aspiré à la pression et à la température ambiantes, puis comprimé à une pression comprise entre 10 et 30 bars : évolution (1-2). Cette compression peut en première approximation être supposée adiabatique, pour les raisons évoquées dans l'introduction, mais pas isentropique, compte tenu des irréversibilités qui prennent place dans le compresseur. A la différence du cycle de Hirn ou de Rankine, utilisé dans les centrales à vapeur et dans lequel le travail de compression est faible devant le travail de détente, une partie significative (60 à 70 %) du travail récupéré sur l'arbre de la turbine sert ici à entraîner le compresseur ;
2. l'air sous pression est ensuite dirigé vers la chambre de combustion (évolution 2-3), où il brûle avec un combustible (distillat léger, gaz naturel). Il faut aussi bien noter que la machine met en jeu plusieurs fluides : de l'air, dont le débit-masse est pris égal à l'unité, un combustible, dont le débit-masse est calculé par la chambre de combustion, et les gaz brûlés, dont on déduit le débit-masse par bilan conservatif. La chambre de combustion est un dispositif fixe. Les pertes de charge  $\gamma$  étant très faibles, elle est en première approximation isobare ;
3. les gaz brûlés sont ensuite détendus dans une turbine de rendement isentropique voisin de 0,9, jusqu'à la pression atmosphérique : évolution (3-4).

Le schéma de la machine (figure ci-dessous) se déduit de ces considérations.

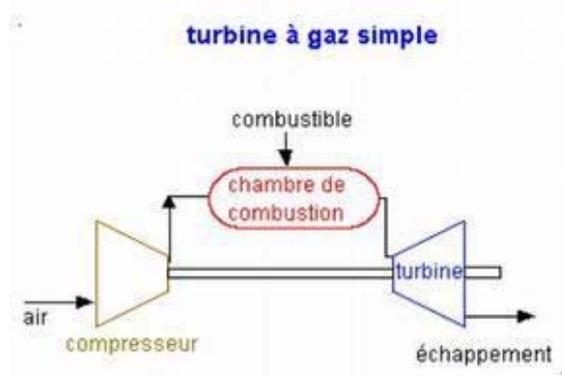


Schéma d'une turbine à gaz

L'exemple proposé ici correspond à l'énoncé suivant : une turbine à gaz brûlant du gaz naturel sans dissociation aspire de l'air à 15 °C et 1 bar et le comprime à 16 bars dans un compresseur de **rendement polytropique** 0,85, puis les gaz brûlés sont détendus dans une turbine de rendement polytropique 0,85. La température d'entrée dans la turbine est de 1150 °C.

Si l'enseignant préfère ne pas introduire tout de suite la notion de rendement polytropique, il peut être reformulé sous la forme : une turbine à gaz brûlant du gaz naturel sans dissociation aspire de l'air à 15 °C et 1 bar et le comprime à 16 bars dans un compresseur de **rendement isentropique** 0,787, puis les gaz brûlés sont détendus dans une turbine de rendement isentropique 0,89. La température d'entrée dans la turbine est de 1150 °C.

### 3.2 Technologie des composants

Une fois le schéma de principe de la machine ainsi défini, la discussion peut porter

sur les technologies des divers composants.

Pour atteindre des taux de compression  $r$  de 20 ou 30, le compresseur est multiétagé, avec parfois une réfrigération intermédiaire destinée à réduire le travail consommé. Les rotors axiaux sont constitués d'un empilage de disques, soit montés sur un moyeu central, soit assemblés en tambour sur leur périphérie. Les matériaux utilisés vont des alliages d'aluminium ou de titane pour les premiers étages aux alliages d'acier et aux alliages réfractaires pour les derniers étages, qui peuvent supporter des températures atteignant 500 °C.

La chambre de combustion est normalement construite en alliage réfractaire. Elle doit satisfaire des contraintes sévères :

- assurer une combustion complète du combustible ;
- réduire les émissions de polluants ;
- minimiser la perte de charge (qui représente un surcroît de compression) ;
- assurer une bonne stabilité de la température d'entrée turbine ;
- occuper un volume aussi réduit que possible tout en permettant un bon refroidissement des parois.

Dans les turbines à gaz à cycle ouvert, les principales contraintes technologiques se situent au niveau des premiers étages de la turbine de détente, qui sont soumis au flux des gaz d'échappement à très haute température. Les pièces les plus exposées sont en particulier les aubages du rotor, qui sont très difficiles à refroidir et, de plus, particulièrement sensibles à l'abrasion. Il importe donc d'utiliser un combustible très propre (absence de particules et de composants chimiques susceptibles de former des acides), et de limiter la température en fonction des caractéristiques mécaniques des aubages.

Les matériaux utilisés pour les aubages de la turbine sont des alliages réfractaires à base de nickel ou de cobalt, et on envisage de recourir à des céramiques dans l'avenir.

Comme le rendement du cycle est lui-même une fonction croissante de la température, d'importants développements technologiques ont été consacrés à la mise au point, d'une part de systèmes de refroidissement efficaces des aubages, et d'autre part de matériaux résistant aux températures élevées. Depuis un demi-siècle, on a ainsi pu relever progressivement (d'environ 20 °C par an) le niveau de température d'entrée dans la turbine, pour atteindre aujourd'hui 1300 à 1500 °C.

Deux grandes catégories de turbines à gaz sont généralement distinguées : les turbines à gaz industrielles, lourdes et robustes, mais de performances moyennes (rendement  $\eta$  entre 28 et 38 %), et les turbines à gaz "dérivées de l'aviation" ou "aérodérivées", beaucoup plus légères et performantes ( $\eta$  entre 35 et 42 %), mais aussi plus chères (figure ci-dessous).



*Turbine à gaz GT 24/26 d'Alstom Power*

Les puissances des premières vont de quelques dizaines de kW (microturbines) à quelques centaines de MW, alors que celles des machines aérodérivées sont généralement comprises entre quelques centaines de kW et quelques dizaines de MW, correspondant à celles des moteurs aéronautiques. La plupart des turboréacteurs utilisés aujourd'hui dans l'aviation ne sont en fait que des variantes de la turbine à gaz à cycle ouvert. Le marché de l'aviation a ainsi permis de financer d'importants programmes de développement technologique sur ces moteurs, qui ont abouti à la mise au point de turbines à gaz extrêmement performantes, susceptibles de supplanter les turbines à gaz industrielles, ou de permettre la conception de turbines composées, de rendements améliorés et à faible coût, comprenant des composants de turboréacteurs existants pour les sections haute pression du compresseur et de la turbine, et des pièces industrielles pour les sections basse pression.

### 3.3 Calcul du cycle pas à pas avec le calculateur-inverseur

Pour calculer ce cycle pas à pas, nous commencerons par utiliser le calculateur inverseur, sachant que le principal intérêt qu'il y a à procéder ainsi est d'une part de bien décomposer les différentes étapes et d'autre part de ne pas avoir dans un premier temps à introduire ThermoOptim. Comme nous l'avons indiqué, nous retiendrons une approche progressive où nous commencerons par étudier le cycle à air parfait, puis celui à air idéal.

#### 3.3.1 ETAT DU POINT 1

L'état du point 1 correspond au paramétrage du calculateur conformément à la figure donnée ci-dessous. Le fluide sélectionné est **l'air parfait**, parmi les gaz idéaux. Précisons qu'il s'agit d'un corps fictif, qui présente la particularité d'avoir la même masse molaire que l'eau et une valeur de  $\gamma$  égale à 1,4. Le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression étant égale à 1 bar, et la température à 15 °C. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes (p est en bar, h, u, r et Cv en kJ/kg, s en kJ/kg/K, v en m3/kg, M en kg :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
1	15	-9,903	-7,075	-0,033795	0,827301	28,958	718,322	287,108	1,4

Tableau 8 Etat du point 1

Gaz idéaux

air  
air parfait  
Ar  
C3H8 ` propane  
C4H10 ` n-butane  
CH4 ` méthane  
CO  
CO2  
H2

718,322 287,108 1,4

Calculer info

air parfait

p (bar) 1

T (°C) 15

p,T,x  
p,h  
p,s

° C

M (kg/kmol) 28,958 T (°C) 15

Cv (kJ/kg/K) 718,322 h (kJ/kg) -9,903

Tc (°C) 287,108 u (kJ/kg) -7,075

gamma 1,4 s (kJ/kg/k) -0,033795

v (m3/kg) 0,827301

Calculateur point 1

### 3.3.2 ETAT DU POINT 2s

Pour connaître l'état du point 2s, correspondant à la compression isentropique, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,s) la nouvelle pression étant égale à 16 bars, et l'entropie étant celle du point 1. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

Gaz idéaux

air  
air parfait  
Ar  
C3H8 ` propane  
C4H10 ` n-butane  
CH4 ` méthane  
CO  
CO2  
H2

718,322 287,108 1,4

Calculer info

air parfait

p (bar) 16

s (kJ/kg/K) -0,033795

p,T,x  
p,h  
p,s

° C

M (kg/kmol) 28,958 T (°C) 362,861

Cv (kJ/kg/K) 718,322 h (kJ/kg) 339,846

Tc (°C) 287,108 u (kJ/kg) 242,801

gamma 1,4 s (kJ/kg/k) -0,033793

v (m3/kg) 0,114127

Etat du point 2s

Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes, la valeur de l'entropie différant très légèrement du fait de la précision d'inversion des calculs.

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
16	362,8 61	339,8 46	242,8 01	- 0,03379 3	0,114127	28,95 8	718,3 22	287,1 08	1,4

Tableau 9 Etat du point 2s

La variation d'enthalpie correspondant à la détente réversible est égale à  $h_{2s} - h_1$ , soit  $\Delta h_s = 349,749$  kJ/kg. Sa valeur positive provient des conventions utilisées en thermodynamique, le travail étant reçu de l'extérieur du système considéré.

La valeur du travail de compression réel  $\tau$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\Delta h_s / \eta_s$  soit :

$$\Delta h = 349,749 / 0,787 \text{ kJ/kg} = 444,4079 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 2 est donc égale à celle du point 1 plus  $\Delta h$ , soit 434,505 kJ/kg

### 3.3.3 ETAT DU POINT 2

Pour connaître l'état du points 2, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,h) la pression restant égale à 16 bars, et l'enthalpie étant 436,8025. Le calcul conduit à la figure ci-dessous, et un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
16	457,0 08	434,5 05	310,4 29	0,105	0,131021	28,95 8	718,3 22	287,1 08	1,4

Tableau 10 Etat du point 2

air parfait

p (bar) 16

h (kJ/kg) 434,504878

Calculer info

M (kg/kmol)	28,958	T (°C)	457,008
Cv (kJ/kg/K)	718,322	h (kJ/kg)	434,505
Tc (°C)	287,108	u (kJ/kg)	310,429
gamma	1,4	s (kJ/kg/k)	0,105
		v (m3/kg)	0,131021

Etat du point 2

### 3.3.4 ETAT DU POINT 3

Pour connaître l'état du point 3, le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression restant égale à 16 bars, et la température valant 1150 °C. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
16	1150	1131,2 59	808,2 2	0,77599	0,255373	28,95 8	718,3 22	287,1 08	1,4

Tableau 11 Etat du point 3

La chaleur  $Q$  à fournir par la chambre de combustion est égale à la variation d'enthalpie entre les points 2 et 3 :  $Q = 696,754$  kJ/kg.

### 3.3.5 ETAT DU POINT 4s

Pour connaître l'état du points 4s, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,s) la nouvelle pression étant celle d'échappement, égale à 1 bar, et l'entropie étant celle du point 3. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
1	371,6 18	348,65 1	249,0 91	0,77599	1,85118	28,95 8	718,3 22	287,1 08	1,4

Tableau 12 Etat du point 4s

La valeur du travail de détente réel  $\Delta h$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\eta_s \Delta h_s$  soit :

$$\Delta h = 0,89 (- 782,608) \text{ kJ/kg} = - 696,52112 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 4 est donc égale à celle du point 3 plus  $\Delta h$  (en valeur algébrique), soit  $434,73788$  kJ/kg

### 3.3.6 ETAT DU POINT 4

Pour connaître l'état du points 4, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,h) la pression restant égale à 1 bar, et l'enthalpie étant celle du point 4s. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

The screenshot shows a software interface for calculating the state of a perfect gas. The gas is set to 'air parfait'. The input parameters are pressure  $p = 1$  bar and enthalpy  $h = 434,73788$  kJ/kg. The output parameters are:

M (kg/kmol)	28,958	T (°C)	457,24
Cv (kJ/kg/K)	718,322	h (kJ/kg)	434,738
Tc (°C)	287,108	u (kJ/kg)	310,595
gamma	1,4	s (kJ/kg/K)	0,90135
		v (m3/kg)	2,09701

Etat du point 4

Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
1	457,24	434,738	310,595	0,90135	2,09701	28,958	718,322	287,108	1,4

Tableau 13 Etat du point 4

### 3.3.7 BILAN GLOBAL DU CYCLE

Les calculs précédents ont permis d'estimer la chaleur Q fournie par la chaudière (696,754 kJ/kg), et le travail net est égal en valeur absolue à la différence entre celui produit par la turbine (696,52 kJ/kg) et celui consommé par le compresseur (444,41 kJ/kg), soit 252,11 kJ/kg.

Le rendement du cycle est égal au rapport de ces deux valeurs. Il vaut donc  $\eta = 252,11/696,75 = 36,18 \%$ .

### 3.3.8 COMPARAISON AVEC LES CALCULS ANALYTIQUES

A ce stade, il peut être intéressant de proposer aux élèves de comparer les résultats obtenus avec ceux auxquels conduisent les calculs analytiques de la compression et de la détente isentropiques (figure ci-dessous). Le document joint intitulé [CalculsAnalytiquesTAG.pdf<sup>26</sup>](#) montre que les résultats obtenus sont bien les mêmes.

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma - 1) / \gamma}$$

Equation de la compression isentropique

L'intérêt de cette comparaison est que les élèves peuvent constater par eux-mêmes que le calculateur-inverseur fournit bien les mêmes résultats que les équations qui lui ont été enseignées pour les calculs simples qui peuvent être menés analytiquement.

### 3.3.9 PRISE EN COMPTE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE Cp DE L'AIR

Dans les calculs qui ont été effectués jusqu'ici, l'air a été supposé parfait, alors qu'en fait sa capacité thermique massique Cp varie avec la température. Pour pouvoir estimer l'influence de cette dépendance, il est possible de recalculer l'ensemble du cycle en considérant que le corps est maintenant de l'air et non de l'air parfait.

#### 3.3.9.1 ETAT DU POINT 1

L'état du point 1 correspond au paramétrage du calculateur conformément à la figure du calculateur donnée ci-dessous. Le fluide sélectionné est l'air, parmi les gaz idéaux. Le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression étant égale à 1 bar (on néglige la différence avec une atmosphère), et la température égale à 15 °C. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
1	15	-9,87	-7,042	0,12801	0,827301	28,958	714,773	287,108	1,402

Tableau 14 Etat du point 1

26 - <http://www.thermoptim.org/ThoptExterne/tmp/CalculsAnalytiquesTAG.pdf>

Gaz idéaux

air

air parfait  
Ar  
C3H8 ` propane  
C4H10 ` n-butane  
CH4 ` méthane  
CO  
CO2  
H2  
H2O

p (bar) 1

h (kJ/kg) 15

p,T,x  
p,h  
p,s

° C

Calculer info

M (kg/kmol) 28,958 T (°C) 15

Cv (kJ/kg/K) 714,773 h (kJ/kg) -9,87

Tc (°C) 287,108 u (kJ/kg) -7,042

gamma 1,402 s (kJ/kg/K) 0,12801

v (m3/kg) 0,827301

Calculateur point 1 (gaz idéal)

### 3.3.9.2 ETAT DU POINT 2s

Pour connaître l'état du point 2s, correspondant à la compression isentropique, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,s) la nouvelle pression étant égale à 16 bars, et l'entropie étant celle du point 1. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	γ
16	354,571	338,602	243,937	0,12801	0,11264	28,958	773,27	287,108	1,371

Tableau 15 Etat du point 2s

La variation d'enthalpie correspondant à la détente réversible est égale à  $h_{2s} - h_1$ , soit  $\Delta h_s = 348,472$  kJ/kg.

La valeur du travail de compression réel  $\tau$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\Delta h_s / \eta_s$  soit :

$$\Delta h = 348,472 / 0,787 \text{ kJ/kg} = 442,7852605 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 2 est donc égale à celle du point 1 plus  $\Delta h$ , soit 432,915 kJ/kg

### 3.3.9.3 ETAT DU POINT 2

Pour connaître l'état du points 2, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,h) la pression restant égale à 16 bars, et l'enthalpie étant 432,915. Le calcul conduit à la figure ci-dessous, et un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
16	442,6 88	432,9 15	312,9 51	0,26858	0,128452	28,95 8	793,1 02	287,1 08	1,362

Tableau 16 Etat du point 2

### 3.3.9.4 ETAT DU POINT 3

Pour connaître l'état du point 3, le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression restant égale à 16 bars, et la température valant 1150 °C. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
16	1150	1245,2 04	922,1 64	1,0528	0,255373	28,95 8	916,3 14	287,1 08	1,313

Tableau 17 Etat du point 3

La chaleur Q à fournir par la chambre de combustion est égale à la variation d'enthalpie entre les points 2 et 3 :  $Q = 812,2894$  kJ/kg.

### 3.3.9.5 ETAT DU POINT 4s

Pour connaître l'état du points 4s, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,s) la nouvelle pression étant celle d'échappement, égale à 1 bar, et l'entropie étant celle du point 3. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
1	434,8 99	424,50 8	306,7 8	1,0528	2,03286	28,95 8	791,3 59	287,1 08	1,363

Tableau 18 Etat du point 4s

La valeur du travail de détente réel  $\Delta h$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\eta_s \Delta h_s$  soit :

$$\Delta h = 0,89 (- 820,696) \text{ kJ/kg} = - 730,41944 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 4 est donc égale à celle du point 3 plus  $\Delta h$  (en valeur algébrique), soit 514,78456 kJ/kg

### 3.3.9.6 ETAT DU POINT 4

Pour connaître l'état du points 4, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,h) la pression restant égale à 1 bar, et l'enthalpie étant celle du point 4s. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	h	u	s	v	M	Cv	r	$\gamma$
1	517,8 98	514,78 5	373,2 27	1,1733	2,27116	28,95 8	809,6 89	287,1 08	1,355

Tableau 19 Etat du point 4

### 3.3.9.7 BILAN GLOBAL DU CYCLE

Les calculs précédents ont permis d'estimer la chaleur Q fournie par la chaudière (812,2894 kJ/kg), et le travail net est égal en valeur absolue à la différence entre celui produit par la turbine (730,419 kJ/kg) et celui consommé par le compresseur (442,785 kJ/kg), soit 287,634 kJ/kg.

Le rendement du cycle est égal au rapport de ces deux valeurs. Il vaut donc  $\eta = 287,634/812,28945 = 35,41 \%$ .

Entre les deux modèles, la différence est assez faible en terme de rendement, mais beaucoup plus importante en terme de température d'échappement des gaz, 518 °C au lieu de 457 °C, ou de puissance de la machine 287 kW au lieu de 252.

### 3.4 Calcul du cycle pas à pas avec les points de ThermoOptim

Les écrans des points de ThermoOptim permettent de faire les mêmes calculs que ceux que nous venons d'effectuer. Comme nous allons le voir, les résultats sont identiques, mais cela suppose de tout de suite initier les élèves à une partie des fonctionnalités du simulateur.

Tant que l'on ne définit pas les transfos, l'éditeur de schémas ne doit pas être utilisé. Les points peuvent en effet être directement créés depuis l'écran du simulateur, en double-cliquant sur le bandeau de la table des points. Une fois qu'un point existe, le bouton « Dupliquer » permet d'en générer un autre sans avoir à entrer le corps.

Dans ce qui suit, nous travaillerons directement avec de l'air, sans traiter le cas de l'air parfait, afin d'éviter des redites.

#### 3.4.1 ETAT DU POINT 1

L'état du point 1 est donné figure ci-dessous. La pression et la température doivent être entrées.

point	1			
corps	air	afficher	Dupliquer	Sauver
			Supprimer	Fermer
Système ouvert (T,P,h)    Système fermé (T,v,u)    Mélanges humides				
P (bar)	1		<input checked="" type="radio"/> P et T connus	
		h (kJ/kg)	-9,87037072	<input type="radio"/> P et h connus
		s (kJ/kg/K)	0,128011156	<input type="radio"/> P et s connus
		exergie (kJ/kg)	-46,7568	
T (°C)	15			
T (K)	288,15			
u (kJ/kg)	-7,0423588			
s (kJ/kg/K)	0,128011156			
V (m <sup>3</sup> /kg)	0,827301151			
Cp (J/kg/K)	1 001,88			
Cv (J/kg/K)	714,77			
gamma	1,40168			
				Calculer

Etat du point 1

#### 3.4.2 ETAT DU POINT 2s

Pour connaître l'état du point 2s, le point doit être paramétré en mode de calcul « P et s connus », la nouvelle pression étant égale à 16 bars, et l'entropie étant celle du

point 1. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

The screenshot shows a software interface for calculating thermodynamic properties. At the top, 'point' is set to '2s' and 'corps' is 'air'. There are buttons for 'Dupliquer', 'Sauver', 'Supprimer', and 'Fermer'. Below this, there are tabs for 'Système ouvert (T,P,h)', 'Système fermé (T,v,u)', and 'Mélanges humides'. The 'Système ouvert (T,P,h)' tab is active. It shows input fields for 'P (bar)' (16), 'h (kJ/kg)' (338,61689358), 's (kJ/kg/K)' (0,128036276), and 'exergie (kJ/kg)' (301,7232). There are radio buttons for 'P et T connus', 'P et h connus', and 'P et s connus', with 'P et s connus' selected. Below these are fields for 'T (°C)' (354,584375) and 'T (K)' (627,73). A table of properties is shown: u (kJ/kg) = 243,94757966, s (kJ/kg/K) = 0,128036276, V (m3/kg) = 0,112642151, Cp (J/kg/K) = 1 060,38, Cv (J/kg/K) = 773,27, and gamma = 1,37129. A 'Calculer' button is visible on the right side of the table.

Etat du point 2s

La variation d'enthalpie correspondant à la détente réversible est égale à  $h_{2s} - h_1$ , soit  $\Delta h_s = 348,472$  kJ/kg. La valeur du travail de compression réel  $\tau$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\Delta h_s / \eta_s$  soit :

$$\Delta h = 348,472 / 0,787 \text{ kJ/kg} = 442,7852605 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 2 est donc égale à celle du point 1 plus  $\Delta h$ , soit 432,915 kJ/kg

### 3.4.3 ETAT DU POINT 2

Pour connaître l'état du point 2, le point doit être paramétré en mode de calcul « P et h connus », la nouvelle pression étant égale à 16 bars, et l'enthalpie valant 432,915 kJ/kg. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

point	<input type="text" value="2"/>		
corps	<input type="text" value="air"/>	<input type="button" value="afficher"/>	<input type="button" value="Dupliquer"/>
			<input type="button" value="Sauver"/>
		<input type="button" value="Supprimer"/>	<input type="button" value="Fermer"/>
<input checked="" type="radio"/> <b>Système ouvert (T,P,h)</b> <input type="radio"/> <b>Système fermé (T,v,u)</b> <input type="radio"/> <b>Mélanges humides</b>			
P (bar)	<input type="text" value="16"/>	<input type="radio"/> P et T connus	
h (kJ/kg)	<input type="text" value="432,91498216"/>	<input checked="" type="radio"/> P et h connus	
s (kJ/kg.K)	<input type="text" value="0,268578677"/>	<input type="radio"/> P et s connus	
exergie (kJ/kg)	<input type="text" value="355,524"/>		
T (°C)	<input type="text" value="442,68800316"/>		
T (K)	715,84		
u (kJ/kg)	<input type="text" value="312,9504286"/>		
s (kJ/kg.K)	<input type="text" value="0,268578677"/>		
V (m <sup>3</sup> /kg)	<input type="text" value="0,128451675"/>	<input type="button" value="Calculer"/>	
Cp (J/kg.K)	<input type="text" value="1 080,21"/>		
Cv (J/kg.K)	<input type="text" value="793,1"/>		
gamma	<input type="text" value="1,36201"/>		

Etat du point 2

### 3.4.4 ETAT DU POINT 3

Pour connaître l'état du point 3, le paramétrage doit être « P et T connus », la pression restant égale à 16 bars, et la température valant 1150 °C.

La chaleur  $Q$  à fournir par la chambre de combustion est égale à la variation d'enthalpie entre les points 2 et 3 :  $Q = 812,2894$  kJ/kg.

point	<input type="text" value="3"/>		
corps	<input type="text" value="air"/>	<input type="button" value="afficher"/>	<input type="button" value="Dupliquer"/> <input type="button" value="Sauver"/>
			<input type="button" value="Supprimer"/> <input type="button" value="Fermer"/>
<input checked="" type="radio"/> <b>Système ouvert (T,P,h)</b> <input type="radio"/> <b>Système fermé (T,v,u)</b> <input type="radio"/> <b>Mélanges humides</b>			
P (bar)	<input type="text" value="16"/>	<input checked="" type="radio"/> <b>P et T connus</b>	
h (kJ/kg)	<input type="text" value="1 245,20361361"/>	<input type="radio"/> <b>P et h connus</b>	
s (kJ/kg/K)	<input type="text" value="1,05284074"/>	<input type="radio"/> <b>P et s connus</b>	
exergie (kJ/kg)	<input type="text" value="941,8276"/>		
T (°C)	<input type="text" value="1 150"/>		
T (K)	<input type="text" value="1 423,15"/>		
u (kJ/kg)	<input type="text" value="922,16426244"/>		
s (kJ/kg/K)	<input type="text" value="1,05284074"/>		
V (m <sup>3</sup> /kg)	<input type="text" value="0,255373424"/>	<input type="button" value="Calculer"/>	
Cp (J/kg/K)	<input type="text" value="1 203,42"/>		
Cv (J/kg/K)	<input type="text" value="916,31"/>		
gamma	<input type="text" value="1,31333"/>		

Etat du point 3

### 3.4.5 ETAT DU POINT 4s

Pour connaître l'état du points 4s, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,s) la nouvelle pression étant celle d'échappement, égale à 1 bar, et l'entropie étant celle du point 3.

La valeur du travail de détente réel  $\Delta h$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\eta_s \Delta h_s$  soit :

$$\Delta h = 0,89 (- 820,696) \text{ kJ/kg} = - 730,41944 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 4 est donc égale à celle du point 3 plus  $\Delta h$  (en valeur algébrique), soit 514,78456 kJ/kg

### 3.4.6 ETAT DU POINT 4

Pour connaître l'état du point 4, le paramétrage doit être « P et h connus », la pression restant égale à 1 bar, et l'enthalpie étant celle du point 4s. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

point	4		
corps	air	afficher	Dupliquer
		Supprimer	Sauver
			Fermer
<input checked="" type="radio"/> <b>Système ouvert (T,P,h)</b> <input type="radio"/> <b>Système fermé (T,v,u)</b> <input type="radio"/> <b>Mélanges humides</b>			
P (bar)	1		<input type="radio"/> P et T connus
h (kJ/kg)	514,78456309		<input checked="" type="radio"/> P et h connus
s (kJ/kg/K)	1,17334772		<input type="radio"/> P et s connus
exergie (kJ/kg)	176,6844		
T (°C)	517,89818106		
T (K)	791,05		
u (kJ/kg)	373,22658016		
s (kJ/kg/K)	1,17334772		
V (m <sup>3</sup> /kg)	2,2711611		
Cp (J/kg/K)	1 096,8		
Cv (J/kg/K)	809,69		
gamma	1,35459		
			Calculer

Etat du point 4

### 3.4.7 BILAN GLOBAL DU CYCLE

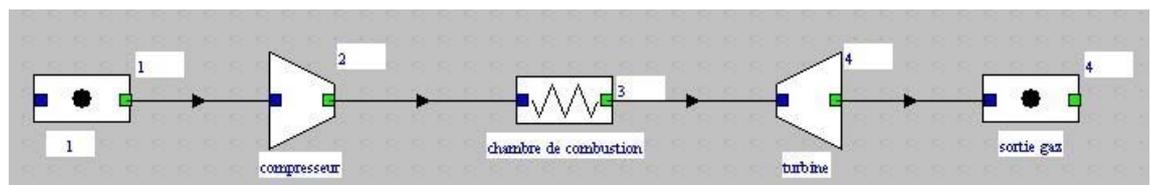
Les points étant les mêmes que ceux qui avaient été déterminés avec le modèle dont le corps était de l'air, le bilan du cycle est bien le même.

## 3.5 Modélisation directe dans ThermoOptim

La modélisation directe du cycle dans ThermoOptim est celle qui est présentée de manière détaillée dans la séance Diapason S21. Nous nous contenterons ici d'en rappeler les grandes lignes.

### 3.5.1 CREATION DU SCHEMA

Dans cette approche, l'élève commence par travailler avec l'éditeur de schémas, plaçant les différents composants sur la palette et saisissant pour chacun d'eux un tout petit nombre d'informations. Il aboutit ainsi à un schéma du type de celui présenté figure ci-dessous, qu'il transfère dans le simulateur : il ne diffère du schéma-bloc qu'au niveau de la chambre de combustion remplacée par une transfo-échange.



Turbine à gaz simplifiée

### 3.5.2 PARAMETRAGE DU CYCLE

Dans un second temps, l'élève paramètre sur le plan thermodynamique les points

dont l'état est parfaitement connu (1 et 3), et les transfos compression et détente, ce qui permet de calculer les deux autres points.

### 3.5.3 COMPARAISON DES DEUX APPROCHES PEDAGOGIQUES

L'intérêt de la modélisation directe dans ThermoOptim est qu'elle se fait dans un premier temps dans l'éditeur de schémas, l'architecture du cycle étant très proche de celle du schéma-bloc.

L'élève commence donc par réfléchir à la structure globale du cycle, sans avoir à se préoccuper de la manière dont les calculs sont effectués dans chaque composant. La modélisation est grandement facilitée, ce qui est un atout sur le plan psychologique, car l'élève est vraiment convaincu que le simulateur lui permet de « faire de la thermo sans peine ». Il est donc encouragé à continuer, ses appréhensions initiales vis à vis de la discipline s'estompant.

Le risque est qu'il ait tendance à utiliser le logiciel de façon « presse-bouton », sans bien comprendre la méthodologie sous-jacente. Le parti pris pédagogique est donc assez différent de celui qui a été retenu dans les sections 3.3 et 3.4, où l'enseignant considère fondamental que l'élève ait pleinement conscience de l'enchaînement des calculs.

Dans tous les cas, les calculs sont effectués par un logiciel, ce qui correspond bien au même paradigme global, celui de la réduction des difficultés calculatoires, mais le degré d'implication de l'élève n'est pas le même. Les deux approches pédagogiques constituent donc des variantes entre lesquelles l'enseignant choisira, en fonction du contexte auquel il est confronté.

### 3.5.4 PRISE EN COMPTE DE LA COMBUSTION

Jusqu'à présent, nous n'avons pas tenu compte de la combustion de manière précise, la chambre de combustion étant remplacée par un échauffement de l'air. Le calculateur-inverseur ne permet en effet pas de définir un gaz composé correspondant aux fumées.

La modélisation complète dans ThermoOptim est expliquée dans le guide de prise en mains et dans la séance Diapason S24. Elle suppose de remplacer la transfo échange de la figure ci-dessus par une chambre de combustion et une transfo-point représentant l'entrée de combustible, le schéma correspondant à la figure ci-dessous.

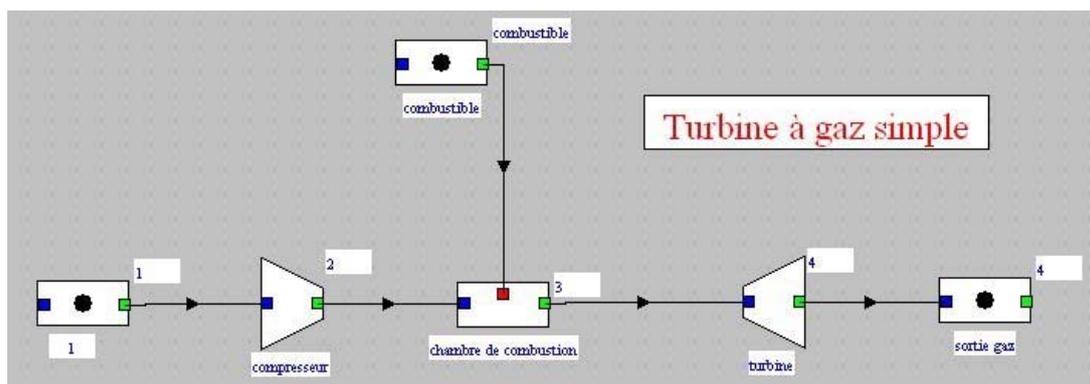


Schéma de turbine à gaz simple

Le modèle précis avec combustion conduit à une température de sortie turbine égale à 533 °C, une puissance thermique de 889 kW, une puissance mécanique nette de 318 kW et un rendement de 35,8 %, soit des valeurs dont l'écart avec celles du modèle à gaz idéal (respectivement 518 °C, 812 kW, 287 kW et 35,4 %) est plus réduit qu'entre ce dernier et le modèle où l'air était considéré comme un gaz parfait (respectivement 457 °C, 697 kW, 252 kW et 36,1 %).

### 3.6 Représentation dans le diagramme entropique

Une fois les points du cycle déterminés, il est possible de le tracer dans le diagramme entropique.

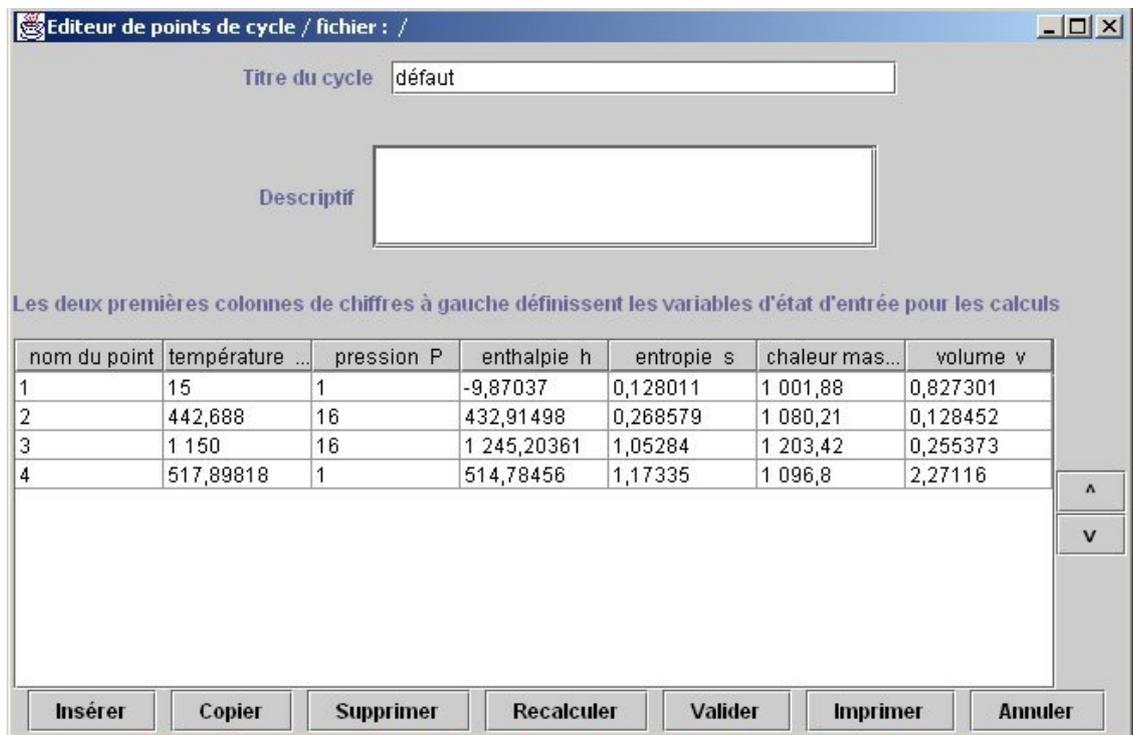
Dans ce qui précède, nous avons introduit les points 2s et 4s, intermédiaires qui n'ont pas besoin d'être représentés.

Si le cycle a été calculé en créant des points dans Thermoptim, comme expliqué dans les sections 3.3 ou 3.5, leur tracé dans les diagrammes peut être directement effectué en utilisant l'interface entre le simulateur et les diagrammes. S'il a été calculé avec le calculateur-inverseur, il faut commencer par créer les points dans le simulateur.

#### 3.6.1 SAISIE DIRECTE DES POINTS DANS L'ÉDITEUR DE CYCLES

Il est possible d'entrer directement les points dans l'éditeur de cycles du diagramme, en opérant de la manière suivante.

Une fois le diagramme des vapeurs de l'eau ouvert, l'éditeur de cycles est accessible à partir du menu Cycle ou en tapant Ctrl C (figure ci-dessous).

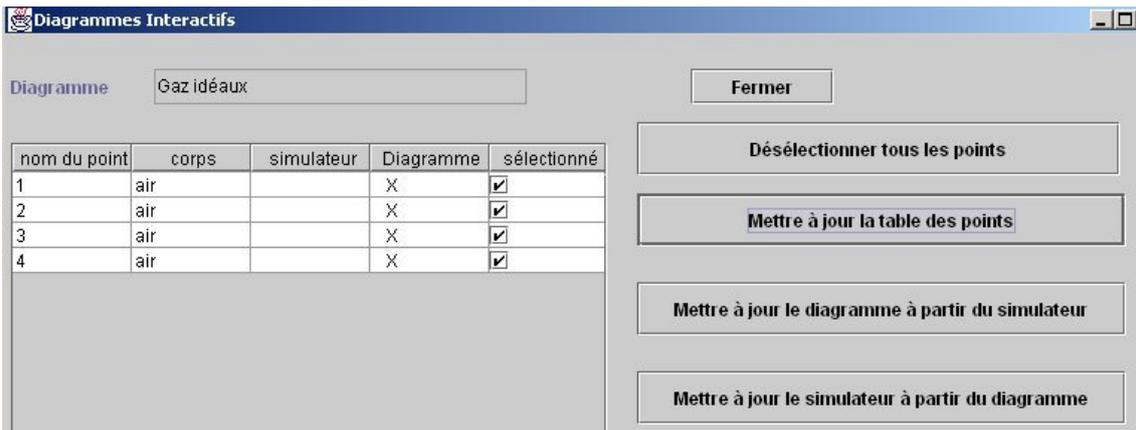


Saisie directe des points dans l'éditeur de cycles

En utilisant le bouton Insérer, il est alors possible d'entrer les différents points un par un. La seule contrainte est que, le bouton de recalcul n'étant pas disponible dans la version Education Salle de cours de Thermoptim, il faut entrer à la main toutes les valeurs des variables (T, P, s et h) pour que le cycle soit correctement construit.

Notons qu'une fois ces points créés dans l'environnement des diagrammes, il est possible de les transférer dans le simulateur en utilisant l'interface qui les relie.

Dans l'écran de l'interface (figure ci-dessous), il faut commencer par mettre à jour la table des points, puis mettre à jour le simulateur à partir du diagramme.

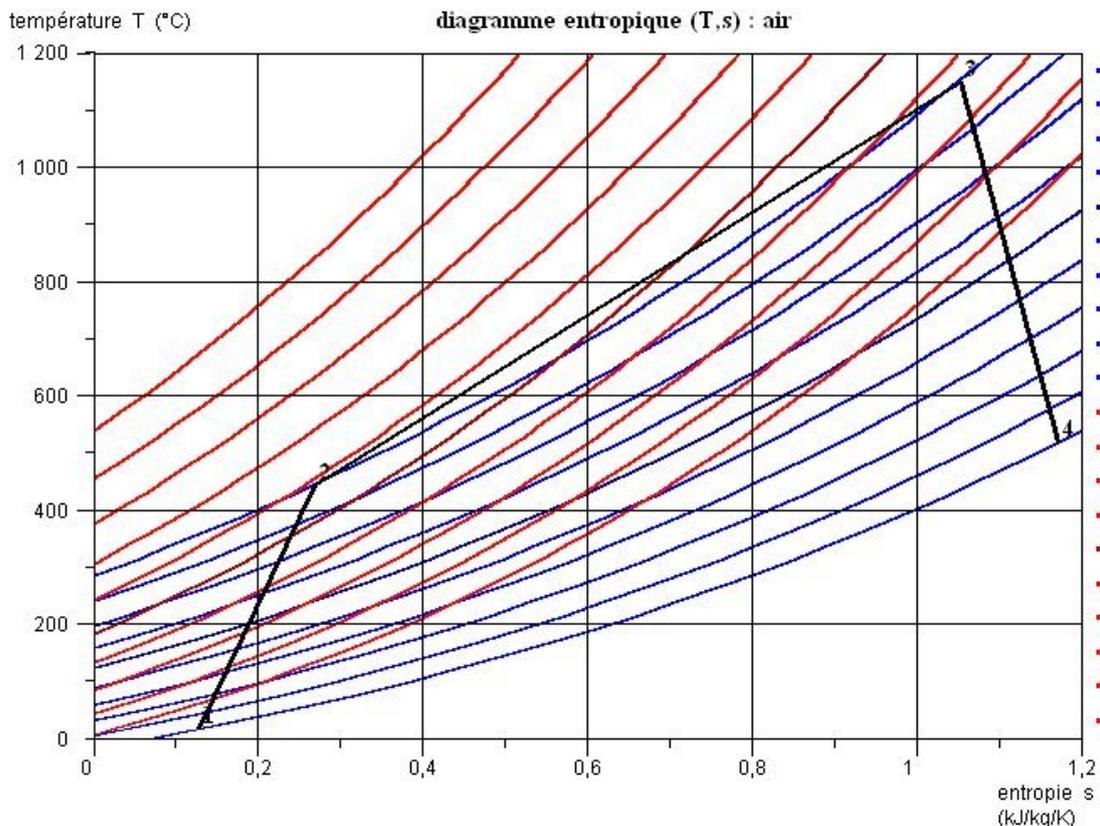


Interface diagramme - simulateur

Les points sont alors créés dans le simulateur. Une fois ce transfert effectué, il est toutefois préférable de reprendre les paramétrages des points un par un.

### 3.6.2 TRACE DANS LE DIAGRAMME ENTROPIQUE

Le tracé du cycle dans le diagramme entropique est donné dans la figure ci-dessous.



Tracé dans le diagramme entropique

Compte tenu de la forme des isobares dans le diagramme entropique (proches d'exponentielles), l'écart est important pour cette évolution par rapport au cycle de Carnot qui stipule que la machine thermique échange de la chaleur à température constante avec la source chaude.

Un autre point à bien souligner est que, dans la machine réelle, le fluide thermodynamique change de composition lors de cette évolution, de telle sorte qu'en toute rigueur le tracé du cycle ne peut être fait dans un seul diagramme. On pourra d'ailleurs faire vérifier aux élèves que le tracé dans le diagramme entropique

du cycle avec combustion conduit apparemment à une erreur en ce sens que les points 2 et 3 ne sont pas situés sur la même isobare. Cela vient de ce que l'entropie du point 3 est augmentée du fait de la réaction de combustion, et apparaît ainsi décalée dans le diagramme entropique.

### 3.7 Création dans Thermoptim des transfos à partir des points

Si le cycle a été modélisé sans utiliser l'éditeur de schémas de Thermoptim, (cf. sections 3.3 et 3.4), et que les points du cycle ont été créés ou transférés dans le simulateur afin de pouvoir les représenter dans les diagrammes, le projet se présente comme indiqué figure ci-dessous.

nom du point	corps	P (bar)	T (°C)
1	air	1	15
2	air	16	442,688
3	air	16	1 150
4	air	1	517,89818

nom transfo	point amont	point aval	type transfo

*Cycle de turbine à gaz simplifié dans le simulateur*

Pour finir de représenter le cycle dans Thermoptim, il faut maintenant relier ces points par des transfos, ce qui peut être fait très simplement à partir de l'éditeur de schémas. Il suffit pour cela de sélectionner dans la palette les différents composants, en entrant dans les champs définissant les ports d'entrée et de sortie leurs différents noms et leur corps (de l'air).

Les points étant tous connus, les transfos doivent être initialement paramétrées en conséquence. En particulier le compresseur et la turbine doivent recalculer la valeur du rendement, le point aval étant connu.

Une fois ces valeurs déterminées, le paramétrage peut être changé si l'on désire pouvoir simuler d'autres cas.

### 3.8 Activités pédagogiques connexes avec les élèves

Autour du cycle de turbine à gaz, de nombreuses activités intéressantes pour les élèves peuvent prendre place :

- comparer qualitativement ce cycle par rapport au cycle de Carnot, en identifiant les écarts qui existent entre eux ;
- réfléchir sur la notion d'efficacité du cycle, égale au rapport de l'énergie utile (ici la somme algébrique du travail de détente et du travail de compression) à l'énergie payante (ici la chaleur fournie dans la chambre de combustion) ;
- comparer cette valeur avec celle du cycle de Carnot fonctionnant entre 15 °C (source froide) et 1150 °C (température maximale du cycle), pour se faire une idée de l'écart du cycle réel (0,354) par rapport au cycle idéal (0,797) ;
- étudier l'évolution de l'efficacité du cycle et de la puissance produite lorsque la pression et la température maximales varient. En faisant varier la

pression du cycle, on obtient un abaque donnant l'évolution du rendement en fonction du travail utile. Le rendement maximum est obtenu, à température d'entrée turbine donnée, pour un certain rapport de compression, et la puissance maximale pour un autre ;

- la plupart des turbines à gaz travaillent en cycle ouvert et rejettent dans l'atmosphère des gaz à température élevée (500 - 600 °C). Il peut quelquefois être possible d'améliorer le cycle en ayant recours à la régénération, c'est-à-dire en valorisant les gaz d'échappement en préchauffant l'air en sortie du compresseur. Une discussion sur les limites de cette solution fournit l'occasion d'un échange fructueux avec les élèves ;
- une autre manière d'améliorer le cycle consiste à injecter de la vapeur formée en utilisant les gaz d'échappement pour vaporiser de l'eau comprimée à l'état liquide.

### 3.9 Exploration de cycles existants

---

Dans ce qui précède, nous avons montré comment calculer pas à pas le cycle de la turbine à gaz, puis comment le modéliser dans Thermoptim, en partant du principe que l'objectif pédagogique visé était d'apprendre aux élèves à acquérir ce savoir-faire tout en assimilant des connaissances déclaratives suffisantes pour comprendre les fondements de ces opérations.

Il existe cependant des contextes pédagogiques où cette manière de procéder ne peut pas être adoptée, essentiellement par manque de temps, et où cependant l'enseignant souhaite que ses élèves puissent utiliser Thermoptim et les diagrammes interactifs, sans construire par eux-mêmes les modèles.

C'est par exemple le cas dans certaines Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles (CPGE) où le volume horaire est insuffisant pour opérer comme nous l'avons fait dans les sections précédentes. Pourtant, de nombreux enseignants considèrent pédagogiquement pertinent d'utiliser Thermoptim, car cela permet aux élèves de voir comment les équations qu'ils étudient peuvent être mises en application. Leur programme acquiert ainsi dans leur esprit davantage de sens : il correspond à un savoir qui peut être vraiment utilisé.

Dans de tels cas, une alternative pédagogique à celles que nous avons présentées jusqu'ici consiste à faire travailler les élèves sur des exemples déjà modélisés, en leur demandant de les explorer et de les comprendre. Ils peuvent aussi modifier les paramètres et réaliser quelques études de sensibilité.

S'il souhaite faire étudier la turbine à gaz simple de cette manière, l'enseignant sélectionne alors dans le catalogue d'exemples de Thermoptim l'exemple intitulé « t1\_6.3 turbine à gaz simple » à partir du catalogue d'exemples et demande à ses élèves de le charger.

Le projet étant chargé, il commence par passer en revue les différents composants, en fournissant à ses élèves des explications technologiques et thermodynamiques. Ensuite, il peut leur demander de procéder à des changements de paramétrage et d'en étudier l'impact sur les performances globales du cycle.

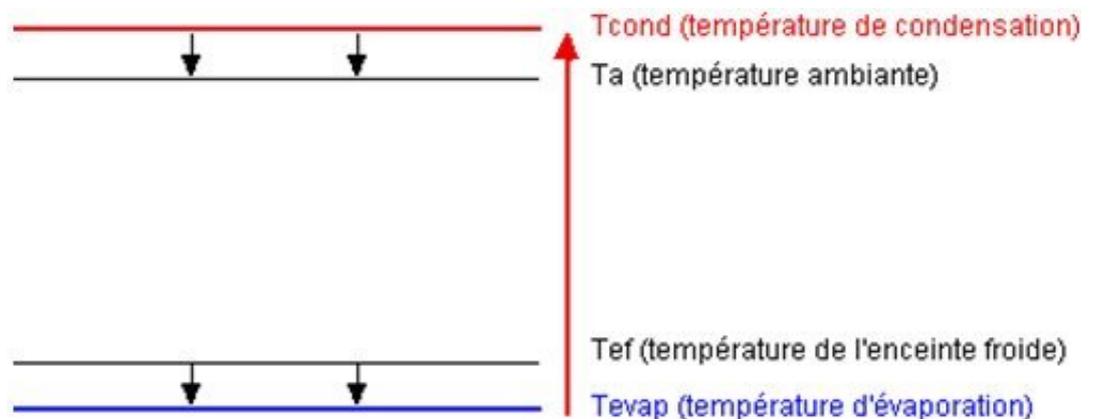
Même si elle peut paraître un peu limitée, cette approche pédagogique peut se révéler très féconde, les élèves s'impliquant souvent beaucoup plus lorsqu'ils ont un simulateur à leur disposition que devant une feuille de papier ou un tableau. Elle est en particulier souvent appropriée en formation professionnelle, les élèves étant généralement assez réticents devant les approches disciplinaires académiques. Ils préfèrent avoir l'outil logiciel entre leurs mains pour pouvoir l'explorer à leur guise et poser des questions aux enseignants qui les encadrent.

## E. 4 Etude d'un réfrigérateur domestique

Les élèves ont déjà utilisé un réfrigérateur domestique, mais peu savent comment il marche... Le problème peut leur être posé dans ces termes :

- on cherche à refroidir à  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (freezer) une enceinte située dans une pièce à la température ambiante de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  environ ;
- on leur demande de préciser tout d'abord comment on peut envisager d'opérer sachant que la chaleur ne s'écoule que dans le sens des températures décroissantes, puis de proposer un cycle qui permette de réaliser le transfert.

L'exercice peut être posé comme une situation-problème afin de susciter un débat scientifique dans la classe, ce qui permet de vérifier la manière dont les élèves raisonnent sur le plan de l'analyse physique des phénomènes. La figure ci-dessous permet de bien faire comprendre aux élèves que le deuxième principe de la thermodynamique est bien respecté : pour refroidir l'enceinte froide, on le met en contact avec un fluide qui est lui-même à température inférieure. Par une opération qui n'est pas encore précisée, ce fluide est porté à une température supérieure à celle du milieu environnant, dans lequel la chaleur est rejetée.



*Niveaux de température dans un cycle de réfrigération*

Cette figure illustre les transferts énergétiques qui prennent place dans le cycle. Les petites flèches dirigées vers le bas représentent les échanges thermiques, qui, comme on le voit, respectent bien le second principe de la thermodynamique : la chaleur s'écoule des températures chaudes vers les températures froides. La longue flèche ascendante représente l'apport enthalpique au compresseur, qui permet de relever le niveau de température du fluide (les énergies mises en jeu ne sont pas proportionnelles à la longueur des flèches).

Il est bien évidemment possible de modéliser directement ce cycle dans Thermoptim. Nous ne détaillerons pas ici complètement cette manière d'opérer, qui est bien documentée dans le *guide de prise en mains*<sup>27</sup> relatif à un cycle frigorifique simple ou bien dans la *séance Diapason S31*<sup>28</sup>.

Nous en donnerons seulement un bref aperçu, après avoir présenté une manière de faire plus progressive qui peut bien convenir à des élèves débutants si l'enseignant souhaite qu'ils comprennent bien la manière dont les calculs sont effectués. Nous montrerons comment les élèves peuvent calculer le cycle pas à pas en procédant de deux manières différentes : tout d'abord en utilisant le calculateur-inverseur des propriétés des fluides, qui permet de ne pas faire appel à Thermoptim dans un premier temps, et ensuite en créant des points dans le progiciel. Une fois les points du cycle déterminés, ils peuvent être tracés dans les diagrammes thermodynamiques interactifs.

Cette manière de faire, qui diffère de la modélisation directe dans Thermoptim,

27 - <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/documentation/guide-prise-en-mains4530>

28 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s31-cycle-frigo-simple>

présente sur le plan pédagogique l'intérêt que la démarche méthodologique de calcul d'un cycle doit être suivie de manière plus détaillée.

### 4.1 Présentation du cycle

1. le principe consiste à évaporer un fluide frigorigène à basse pression (et donc basse température), dans un échangeur en contact avec l'enceinte froide. Pour cela, il faut que la température  $T_{\text{evap}}$  (environ  $- 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) du fluide frigorigène soit inférieure à celle  $T_{\text{ef}}$  de l'enceinte froide ( $- 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Sur le plan technologique, l'échangeur de chaleur ayant une dimension finie, le fluide frigorigène ne peut en effet être à la même température que l'enceinte froide, mais on peut dans un premier temps considérer que l'échange de chaleur est bien isotherme ;
2. le fluide est ensuite comprimé à une pression telle que sa température de condensation  $T_{\text{cond}}$  ( $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ) soit supérieure à la température ambiante  $T_a$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Cette compression peut en première approximation être supposée adiabatique, pour les raisons évoquées dans l'introduction, mais non pas isentropique, compte tenu des irréversibilités qui prennent place dans le compresseur ;
3. il est alors possible de refroidir le fluide par échange thermique avec l'air ambiant, jusqu'à ce qu'il devienne liquide. Toutefois, le refroidissement ne peut généralement pas être isotherme, compte tenu des propriétés thermodynamiques des réfrigérants : il faut d'abord désurchauffer la vapeur, puis la condenser ;
4. le liquide est ensuite détendu à la basse pression, et dirigé dans l'évaporateur. Le cycle est ainsi refermé. En théorie, il serait possible de réaliser une détente proche de l'isentropique, mais la réalité technologique est autre, et ceci pour trois raisons : d'une part la détente d'un mélange diphasique se fait, sauf précautions particulières, avec un mauvais rendement isentropique, d'autre part le travail mis en jeu reste très faible, et enfin, surtout pour les machines frigorifiques de petite puissance, il n'existe pas de machine de détente appropriée et bon marché. C'est pourquoi en pratique on a recours à des détendeurs ou même à de simples capillaires, dispositifs statiques qui réalisent un laminage isenthalpique.

Le schéma de la machine (figure ci-dessous) se déduit de ces considérations.

Schéma d'un cycle frigorifique à compression

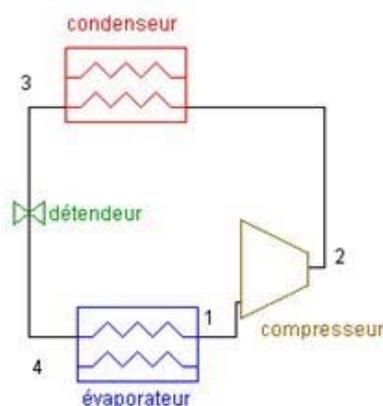


Schéma d'un machine de réfrigération

Dans l'exemple qui nous intéresse, les données du problème sont les suivantes : le fluide choisi est du R134a, hydrofluorocarbure de substitution aux CFC qui présente l'avantage d'avoir un potentiel de destruction de la couche d'ozone nul (c'est bien sûr l'occasion d'avoir une petite discussion sur ce sujet avec les élèves, et de faire le lien avec les préoccupations environnementales actuelles).

Compte tenu des températures d'évaporation et de condensation désirées, le cycle de réfrigération par compression de R134a fonctionne entre une pression d'évaporation de 2 bars et une pression de condenseur de 9 bars.

## 4.2 Technologie des composants

Une fois le schéma de principe de la machine défini (figure ci-dessus), la discussion peut porter sur les technologies des divers composants. Dans ce cas, cela revient à présenter les quatre éléments qui composent la machine. Si un réfrigérateur réel peut être montré aux élèves, c'est le mieux, sinon il est possible de leur demander, préalablement à l'exercice, d'avoir observé par eux-mêmes leur réfrigérateur familial.

Nous recommandons aussi de présenter aux élèves l'animation réalisée par Paraschool pour illustrer le fonctionnement d'un réfrigérateur domestique, intitulée : **Voyage au cœur d'un réfrigérateur** <sup>29</sup>.

L'**évaporateur** est généralement, dans un réfrigérateur domestique, formé de deux plaques corruguées soudées l'une contre l'autre, le fluide frigorigène circulant dans les canaux formés par les corrugations. Il tapisse le plus souvent le compartiment « congélation » du réfrigérateur (c'est sur lui que se forme la couche de givre). La plaque entre les canaux de passage du fluide sert d'ailette pour augmenter le contact thermique entre le fluide frigorigène et le compartiment froid. Cet évaporateur est relié au reste de la machine par deux canalisations qui traversent la paroi isolante. L'une d'entre elles est reliée à l'aspiration du compresseur, l'autre au détendeur.

Le **condenseur** est la grille noire située sur la face postérieure du réfrigérateur, constituée d'un tuyau enroulé en serpentins et étayé par des plaques métalliques qui d'une part augmentent les échanges thermiques avec l'air, et d'autre part renforcent la rigidité mécanique. Sur le plan thermique, il est en fait composé de deux parties : la première, appelée désurchauffeur, sert à refroidir le fluide à l'état de vapeur, et la seconde, le condenseur proprement dit, à le condenser à l'état liquide.

Ces trois éléments transfèrent de la chaleur entre la machine et l'extérieur. Ce sont des dispositifs fixes, traversés par le fluide. Les pertes de charge  $\gamma$  étant très faibles, leur comportement est en première approximation isobare. Les parois étant fixes, il n'y a pas de travail échangé avec l'extérieur, et l'application du premier principe en système ouvert ( $\Delta h = \tau + Q$ ) indique que la chaleur échangée est égale à la variation d'enthalpie du fluide entre l'entrée et la sortie :  $Q = \Delta h$ .

Le condenseur est relié à la sortie du compresseur et au détendeur.

Le plus souvent, le **compresseur** n'est pas directement visible car il est contenu dans un bloc métallique monté sur des coussins en caoutchouc, pour éviter les vibrations, d'où sortent un fil électrique et deux tuyaux d'entrée et sortie du fluide. Il s'agit d'un compresseur dit hermétique, à piston, qui présente l'avantage que le moteur est directement refroidi et lubrifié par le fluide thermodynamique, ce qui permet de se passer d'huile.

Pour éviter d'aspirer du liquide dans le compresseur, ce qui risquerait de le détruire car le liquide est incompressible, le gaz est surchauffé de 5 K au-dessus de la température de saturation avant d'entrer dans le compresseur. La surchauffe se fait pour partie par échange avec l'environnement.

Le compresseur est une machine compacte, traversée par le fluide à l'état gazeux. Les coefficients d'échange sont faibles, la surface d'échange réduite, de telle sorte que les échanges de chaleur sont en première approximation négligeables : le compresseur est adiabatique et l'application du premier principe indique que le travail de compression est égal à la variation d'enthalpie du fluide entre l'entrée et

la sortie :  $\tau = \Delta h$ . Si la machine était parfaite, l'évolution du fluide serait isentropique, de travail de compression  $\tau^s$ . En fait, il y a des irréversibilités, qui sont prises en compte par un rendement isentropique égal à 0,8. Cela signifie que le travail de compression réel est  $\tau = \tau^s / 0,8$ .

Le **détendeur** est généralement constitué d'un simple tube capillaire, et quelquefois il s'agit d'un détendeur thermostatique. Avant d'entrer dans le détendeur, le liquide est sous-refroidi de 5 K ; cela permet de s'assurer que cet organe n'est pas alimenté avec de la vapeur, et cela augmente les performances du réfrigérateur, comme on l'expliquera plus loin.

Le détendeur est un organe fixe, de petite taille, en première approximation adiabatique. Il n'y a donc ni chaleur ni travail échangé avec l'extérieur et l'application du premier principe indique que l'enthalpie du fluide est la même à l'entrée et à la sortie ( $\Delta h = 0$ ). Il s'agit d'un laminage isenthalpique.

### 4.3 Calcul du cycle pas à pas avec le calculateur-inverseur

Pour calculer ce cycle pas à pas, nous commencerons par utiliser le calculateur inverseur, sachant que le principal intérêt qu'il y a à procéder ainsi est d'une part de bien décomposer les différentes étapes et d'autre part de ne pas avoir dans un premier temps à introduire Thermoptim.

#### 4.3.1 ETAT DU POINT 1

Pour déterminer l'état du point 1, il faut commencer par paramétrer le calculateur conformément à la figure du calculateur donnée ci-dessous. Le fluide sélectionné est le R134a, parmi les vapeurs condensables. Le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression étant égale à 2 bars, et la température de saturation imposée. Ce premier calcul permet de déterminer la température de saturation, égale ici à -10,079 °C. Le point 1 correspondant à une surchauffe de 5 K, sa température, qui vaut -5,079 °C, peut être entrée dans le calculateur ce qui permet, en décochant l'option "température de saturation imposée", de déterminer son état. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes (p et Pc sont en bar, h et u en kJ/kg, s en kJ/kg/K, v et Vc en m3/kg, M en kg et Tc en K) :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
2	-5,079	1	397,005	376,403	1,7499	0,103012	102,031	40,593	101,06	0,00195351

Tableau 20 Etat du point 1

Vapeurs condensables

**1,1,1,2-tetrafluoroethane C2H2F4**

p (bar)      
 T (°C)      
 titre x   

température de saturation imposée

Calculer    info

M (kg/kmol)	<input type="text" value="102,031"/>	T (°C)	<input type="text" value="-10,079"/>
Pc (bar)	<input type="text" value="40,593"/>	h (kJ/kg)	<input type="text" value="392,449"/>
Tc (°C)	<input type="text" value="101,06"/>	u (kJ/kg)	<input type="text" value="372,305"/>
Vc (m3/kg)	<input type="text" value="0,00195351"/>	s (kJ/kg/k)	<input type="text" value="1,7327"/>
titre x	<input type="text" value="1"/>	v (m3/kg)	<input type="text" value="0,100721"/>

Etat saturation évaporateur

#### 4.3.2 ETAT DU POINT 2s

Pour connaître l'état du point 2s, correspondant à la compression isentropique, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,s) la nouvelle pression étant égale à 9 bars, et l'entropie étant celle du point 1. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

Vapeurs condensables

**1,1,1,2-tetrafluoroethane C2H2F4**

p (bar)      
 s (kJ/kg/K)   

température de saturation imposée

Calculer    info

M (kg/kmol)	<input type="text" value="102,031"/>	T (°C)	<input type="text" value="45,707"/>
Pc (bar)	<input type="text" value="40,593"/>	h (kJ/kg)	<input type="text" value="428,843"/>
Tc (°C)	<input type="text" value="101,06"/>	u (kJ/kg)	<input type="text" value="407,063"/>
Vc (m3/kg)	<input type="text" value="0,00195351"/>	s (kJ/kg/k)	<input type="text" value="1,7492"/>
titre x	<input type="text" value="1"/>	v (m3/kg)	<input type="text" value="0,024201"/>

Etat du point 2s

Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes, la valeur de l'entropie différant très légèrement du fait de la précision d'inversion des calculs.

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
9	45,70 7	1	428,8 43	407,0 63	1,749 2	0,024201	102,0 31	40,59 3	101,0 6	0,001953 51

Tableau 21 Etat du point 2s

La variation d'enthalpie correspondant à la détente réversible est égale à  $h_{2s} - h_1$ , soit  $\Delta h_s = 31,838 \text{ kJ/kg}$ . Sa valeur positive provient des conventions utilisées en thermodynamique, le travail étant reçu de l'extérieur du système considéré.

La valeur du travail de compression réel  $\tau$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta_s$ , égal à  $\Delta h_s / \eta_s$  soit :

$$\Delta h = 31,838 / 0,8 \text{ kJ/kg} = 39,7975 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 2 est donc égale à celle du point 1 plus  $\Delta h$ , soit 436,8025 kJ/kg

#### 4.3.3 ETAT DU POINT 2

Pour connaître l'état du points 2, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,h) la pression restant égale à 9 bars, et l'enthalpie étant celle du point 436,8025. Le calcul conduit à la figure ci-dessous, et un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
9	53,21 5	1	436,8 02	414,1 4	1,774	0,025179 5	102,0 31	40,59 3	101,0 6	0,001953 51

Tableau 22 Etat du point 2

Vapeurs condensables ▼

**1,1,1,2-tetrafluoroethane C2H2F4**

p (bar)  p,T,x  
p,h  
p,s  
 h (kJ/kg)  °C ▼

température de saturation imposée

M (kg/kmol)	<input type="text" value="102,031"/>	T (°C)	<input type="text" value="53,215"/>
Pc (bar)	<input type="text" value="40,593"/>	h (kJ/kg)	<input type="text" value="436,802"/>
Tc (°C)	<input type="text" value="101,06"/>	u (kJ/kg)	<input type="text" value="414,14"/>
Vc (m3/kg)	<input type="text" value="0,00195351"/>	s (kJ/kg/K)	<input type="text" value="1,774"/>
titre x	<input type="text" value="1"/>	v (m3/kg)	<input type="text" value="0,0251795"/>

Etat du point 2

#### 4.3.4 ETATS DES POINTS 3a ET 3

En sortie du compresseur, le fluide est condensé. Pour cela, il commence par être désurchauffé de la température T2 à la température de saturation à la pression de 9 bars (point 3a).

Pour connaître l'état du points 3a, le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression restant égale à 9 bars, et la température de saturation étant imposée, x valant 1. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
9	35,54 6	1	417,5 69	397,0 29	1,713 1	0,022822 2	102,0 31	40,59 3	101,0 6	0,001953 51

Tableau 23 Etat du point 3a

#### 4.3.5 ETAT DU POINT 3

Pour connaître l'état du point 3, le calculateur doit être en mode de calcul (p,T,x) la pression restant égale à 9 bars, et la température de saturation n'étant plus imposée, et T étant égale à T3a - 5K. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
9	30,54 6	0	242,5 98	241,8 38	1,146 1	0,000844 166	102,0 31	40,59 3	101,0 6	0,001953 51

Tableau 24 Etat du point 3

### 4.3.6 ETAT DU POINT 4

Pour connaître l'état du points 4, le calculateur doit être paramétré en mode de calcul (p,h) la nouvelle pression étant celle d'évaporation, égale à 2 bars, et l'enthalpie étant celle du point 3. Un copier-coller depuis le champ des résultats fournit les valeurs suivantes :

P	T (°C)	x	h	u	s	v	M	Pc	Tc	Vc
2	-10,079	0,27176	242,598	237,014	1,1631	0,02792	102,031	40,593	101,06	0,00195351

Tableau 25 Etat du point 4

La valeur de la chaleur Q extraite à l'évaporateur vaut :

$$\Delta h = h_1 - h_4 = 397 - 242,6 \text{ kJ/kg} = 154,4 \text{ kJ/kg}$$

### 4.3.7 BILAN GLOBAL DU CYCLE

Les calculs précédents ont permis d'estimer la chaleur Q extraite à l'évaporateur (154,4 kJ/kg), et le travail de compression  $\tau$  (39,8 kJ/kg).

Le COefficient de Performance COP du cycle est égal au rapport de ces deux valeurs. Il vaut donc  $154,4/39,8 = 3,89$ .

## 4.4 Calcul du cycle pas à pas avec les points de Thermoptim

Les écrans des points de Thermoptim permettent de faire les mêmes calculs que ceux que nous venons d'effectuer. Comme nous allons le voir, les résultats sont identiques, mais cela suppose de tout de suite initier les élèves à une partie des fonctionnalités du simulateur.

Tant que l'on ne définit pas les transfos, l'éditeur de schémas ne doit pas être utilisé. Les points peuvent en effet être directement créés depuis l'écran du simulateur, en double-cliquant sur le bandeau de la table des points. Une fois qu'un point existe, le bouton « Dupliquer » permet d'en générer un autre sans avoir à entrer le corps.

### 4.4.1 ETAT DU POINT 1

L'état du point 1 est donné figure ci-dessous. La pression est entrée, l'option « imposer la température de saturation » sélectionnée, avec un écart à la saturation égal à 5 K.

point	1			
corps	R134a	afficher	Dupliquer	Sauver
			Supprimer	Fermer
Système ouvert (T,P,h)		Système fermé (T,v,u)		Mélanges humides
P (bar)	2		<input checked="" type="radio"/> P et T connus	
h (kJ/kg)	397,00588422		<input type="radio"/> P et h connus	
s (kJ/kg/K)	1,74991382		<input type="radio"/> P et s connus	
exergie (kJ/kg)	-107,2318			
T (°C)	-5,07855		<input type="radio"/> non contraint	
T (K)	268,07		<input type="radio"/> imposer la pression de saturation	
titre	1		<input checked="" type="radio"/> imposer la température de saturation	
u (kJ/kg)	376,4033937	écart Tsat	5	
s (kJ/kg/K)	1,74991382			
V (m <sup>3</sup> /kg)	0,103012453			Calculer

Etat du point 1

#### 4.4.2 ETAT DU POINT 2s

Pour connaître l'état du point 2s, le point doit être paramétré en mode de calcul « P et s connus », la nouvelle pression étant égale à 9 bars, et l'entropie étant celle du point 1. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

point	2s			
corps	R134a	afficher	Dupliquer	Sauver
			Supprimer	Fermer
Système ouvert (T,P,h)		Système fermé (T,v,u)		Mélanges humides
P (bar)	9		<input type="radio"/> P et T connus	
h (kJ/kg)	428,84344045		<input type="radio"/> P et h connus	
s (kJ/kg/K)	1,74921137		<input checked="" type="radio"/> P et s connus	
exergie (kJ/kg)	-75,1918			
T (°C)	45,70672911		<input checked="" type="radio"/> non contraint	
T (K)	318,86		<input type="radio"/> imposer la pression de saturation	
titre	1		<input type="radio"/> imposer la température de saturation	
u (kJ/kg)	407,06255417			
s (kJ/kg/K)	1,74921137			
V (m <sup>3</sup> /kg)	0,0242009847			Calculer

Etat du point 2s

La valeur du travail de compression réel  $\tau$  est, par définition du rendement isentropique  $\eta^s$ , égal à  $\Delta h_s / \eta^s$  soit :

$$\Delta h = 31,838 / 0,8 \text{ kJ/kg} = 39,7975 \text{ kJ/kg}$$

L'enthalpie du point 2 est donc égale à celle du point 1 plus  $\Delta h$ , soit 436,8025 kJ/kg.

#### 4.4.3 ETAT DU POINT 2

Pour connaître l'état du point 2, le point doit être paramétré en mode de calcul « P et h connus », la pression restant égale à 9 bars, et l'enthalpie valant 436,8025 kJ/kg. Le calcul conduit à la figure ci-dessous.

point	2		
corps	R134a	afficher	Dupliquer
			Sauver
			Supprimer
			Fermer
<input checked="" type="radio"/> Système ouvert (T,P,h) <input type="radio"/> Système fermé (T,v,u) <input type="radio"/> Mélanges humides			
P (bar)	9		<input type="radio"/> P et T connus
h (kJ/kg)	436,80176409		<input checked="" type="radio"/> P et h connus
s (kJ/kg.K)	1,77403744		<input type="radio"/> P et s connus
exergie (kJ/kg)	-74,3871		
T (°C)	53,21458818		<input checked="" type="radio"/> non contraint
T (K)	326,36		<input type="radio"/> imposer la pression de saturation
titre	1		<input type="radio"/> imposer la température de saturation
u (kJ/kg)	414,14024438		
s (kJ/kg.K)	1,77403744		
V (m3/kg)	0,0251794663		
<b>Calculer</b>			

Etat du point 2

#### 4.4.4 ETATS DES POINTS 3a ET 3b

Pour connaître l'état des points 3a et 3b, le paramétrage doit être « P et T connus », la pression restant égale à 9 bars, et la température de saturation étant imposée, x valant successivement 1 puis 0 avec un écart à la saturation de -5 K.

#### 4.4.5 ETAT DU POINT 4

Pour connaître l'état du point 4, le paramétrage doit être « P et h connus », la nouvelle pression étant celle d'évaporation, égale à 2 bars, et l'enthalpie étant celle du point 3. Le calcul conduit à la figure ci-dessous. Le titre en sortie de turbine vaut 0,2716.

point	4			
corps	R134a	afficher	Dupliquer	Sauver
			Supprimer	Fermer
<input checked="" type="radio"/> Système ouvert (T,P,h) <input type="radio"/> Système fermé (T,v,u) <input type="radio"/> Mélanges humides				
P (bar)	2		<input type="radio"/> P et T connus	
h (kJ/kg)	242,56770642		<input checked="" type="radio"/> P et h connus	
s (kJ/kg.K)	1,16299033		<input type="radio"/> P et s connus	
	exergie (kJ/kg)	-92,548		
T (°C)	-10,07854553	<input checked="" type="radio"/> non contraint		
T (K)	263,07	<input type="radio"/> imposer la pression de saturation		
titre	0,271614633	<input type="radio"/> imposer la température de saturation		
u (kJ/kg)	236,9866531			
s (kJ/kg.K)	1,16299033			
V (m <sup>3</sup> /kg)	0,0279052666			
Calculer				

Etat du point 4

#### 4.4.6 BILAN GLOBAL DU CYCLE

Les calculs précédents ont permis d'estimer la chaleur  $Q$  extraite à l'évaporateur (154,4 kJ/kg), et le travail de compression  $\tau$  (39,8 kJ/kg).

Le COefficient de Performance COP du cycle est égal au rapport de ces deux valeurs. Il vaut donc  $154,4/39,8 = 3,89$ .

### 4.5 Modélisation directe dans ThermoOptim

La modélisation directe du cycle dans ThermoOptim est celle qui est présentée de manière détaillée dans le guide de prise en mains relatif au cycle de réfrigération et dans la séance Diapason S31. Nous nous contenterons ici d'en rappeler les grandes lignes.

#### 4.5.1 CREATION DU SCHEMA

Dans cette approche, l'élève commence par travailler avec l'éditeur de schémas, plaçant les différents composants sur la palette et saisissant pour chacun d'eux un tout petit nombre d'informations. Il aboutit ainsi à un schéma du type de celui présenté figure ci-dessous, qu'il transfère dans le simulateur : la seule différence avec le schéma-bloc est l'apparition des deux parties du condenseur, préalablement non distinguées.

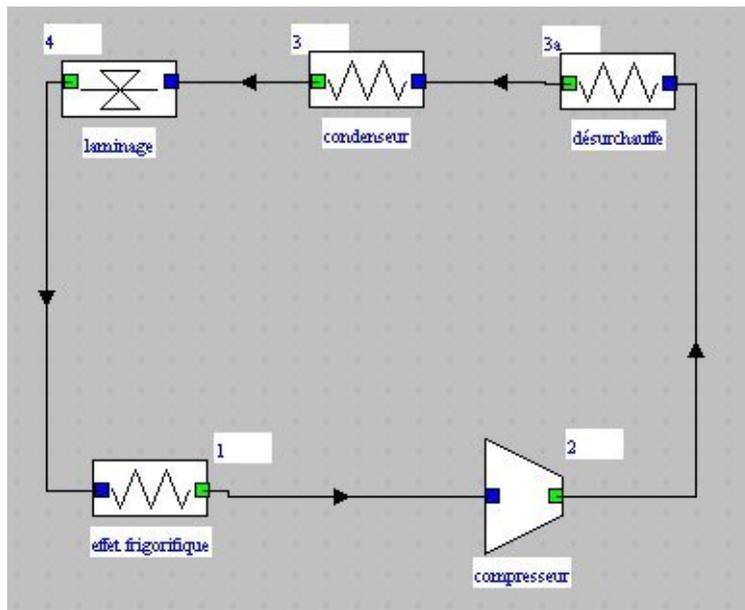


Schéma d'un cycle de réfrigération

#### 4.5.2 PARAMETRAGE DU CYCLE

Dans un second temps, l'élève paramètre sur le plan thermodynamique les points dont l'état est parfaitement connu (1, 3a, 3), et les transfos compression et laminage, ce qui permet de calculer les deux autres points.

#### 4.5.3 COMPARAISON DES DEUX APPROCHES PEDAGOGIQUES

L'intérêt de la modélisation directe dans Thermoptim est qu'elle se fait dans un premier temps dans l'éditeur de schémas, l'architecture du cycle étant très proche de celle du schéma-bloc.

L'élève commence donc par réfléchir à la structure globale du cycle, sans avoir à se préoccuper de la manière dont les calculs sont effectués dans chaque composant. La modélisation est grandement facilitée, ce qui est un atout sur le plan psychologique, car l'élève est vraiment convaincu que le simulateur lui permet de « faire de la thermo sans peine ». Il est donc encouragé à continuer, ses appréhensions initiales vis à vis de la discipline s'estompant.

Le risque est qu'il ait tendance à utiliser le logiciel de façon « presse-bouton », sans bien comprendre la méthodologie sous-jacente. Le parti pris pédagogique est donc assez différent de celui qui a été retenu dans les sections 2.3 et 2.4, où l'enseignant considère fondamental que l'élève ait pleinement conscience de l'enchaînement des calculs.

Dans tous les cas, les calculs sont effectués par un logiciel, ce qui correspond bien au même paradigme global, celui de la réduction des difficultés calculatoires, mais le degré d'implication de l'élève n'est pas le même. Les deux approches pédagogiques constituent donc des variantes entre lesquelles l'enseignant choisira, en fonction du contexte auquel il est confronté.

### 4.6 Représentation dans les diagrammes

Une fois les points du cycle déterminés, il est possible de le tracer dans les diagrammes usuels, notamment les diagrammes entropique, des frigoristes et de Mollier.

Dans ce qui précède, nous avons introduit les points 2s et 2, le premier étant un intermédiaire qui n'a pas besoin d'être représenté. Dans ce qui suit, pour simplifier les notations, nous n'afficherons que le point 2.

Si le cycle a été calculé en créant des points dans Thermoptim, comme expliqué dans les sections 4.3 ou 4.5, leur tracé dans les diagrammes peut être directement

effectué en utilisant l'interface entre le simulateur et les diagrammes. S'il a été calculé avec le calculateur-inverseur, il faut commencer par créer les points dans le simulateur.

#### 4.6.1 SAISIE DIRECTE DES POINTS DANS L'ÉDITEUR DE CYCLES

Il est possible d'entrer directement les points dans l'éditeur de cycles du diagramme, en opérant de la manière suivante.

Une fois le diagramme des vapeurs du R134a ouvert, l'éditeur de cycles est accessible à partir du menu Cycle ou en tapant Ctrl C (figure ci-dessous).

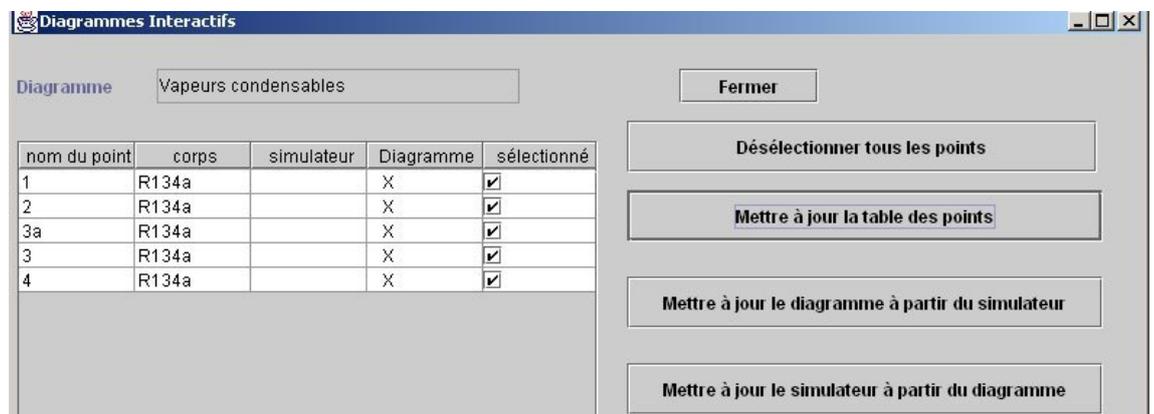


Saisie directe des points dans l'éditeur de cycles

En utilisant le bouton Insérer, il est alors possible d'entrer les différents points un par un. La seule contrainte est que, le bouton de recalcul n'étant pas disponible dans la version Education Salle de cours de Thermoptim, il faut entrer à la main toutes les valeurs des variables (T, P, x, s et h) pour que le cycle soit correctement construit.

Notons qu'une fois ces points créés dans l'environnement des diagrammes, il est possible de les transférer dans le simulateur en utilisant l'interface qui les relie.

Dans l'écran de l'interface (figure ci-dessous), il faut commencer par mettre à jour la table des points, puis mettre à jour le simulateur à partir du diagramme.



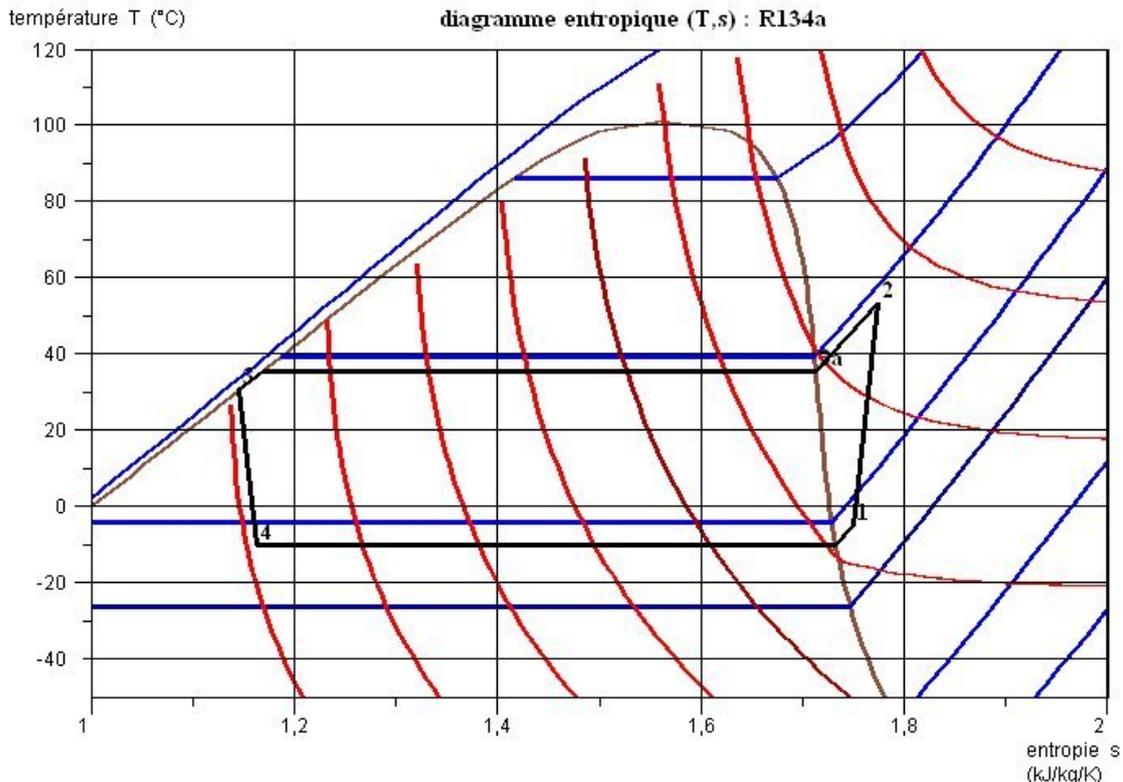
Interface diagramme - simulateur

Les points sont alors créés dans le simulateur. Une fois ce transfert effectué, il est toutefois préférable de reprendre les paramètres des points un par un,

notamment pour imposer la température de saturation lorsque nécessaire.

#### 4.6.2 TRACE DANS LE DIAGRAMME ENTROPIQUE

Sur le diagramme entropique (figure ci-dessous), pour augmenter la lisibilité, on n'a fait apparaître que les isobares (en bleu), et les isenthalpes (en rouge). Le point 1 légèrement surchauffé par rapport à la vapeur saturée est placé sur l'isobare 2 bars. La compression irréversible se traduit par une augmentation de l'entropie. Le refroidissement par l'air extérieur comporte trois étapes : une désurchauffe (2-3a) dans la zone vapeur, une condensation selon le segment de droite horizontal (3a-3b), et un léger sous-refroidissement (3b-3) presque confondu avec la courbe de saturation liquide.



*Cycle frigorifique dans le diagramme entropique*

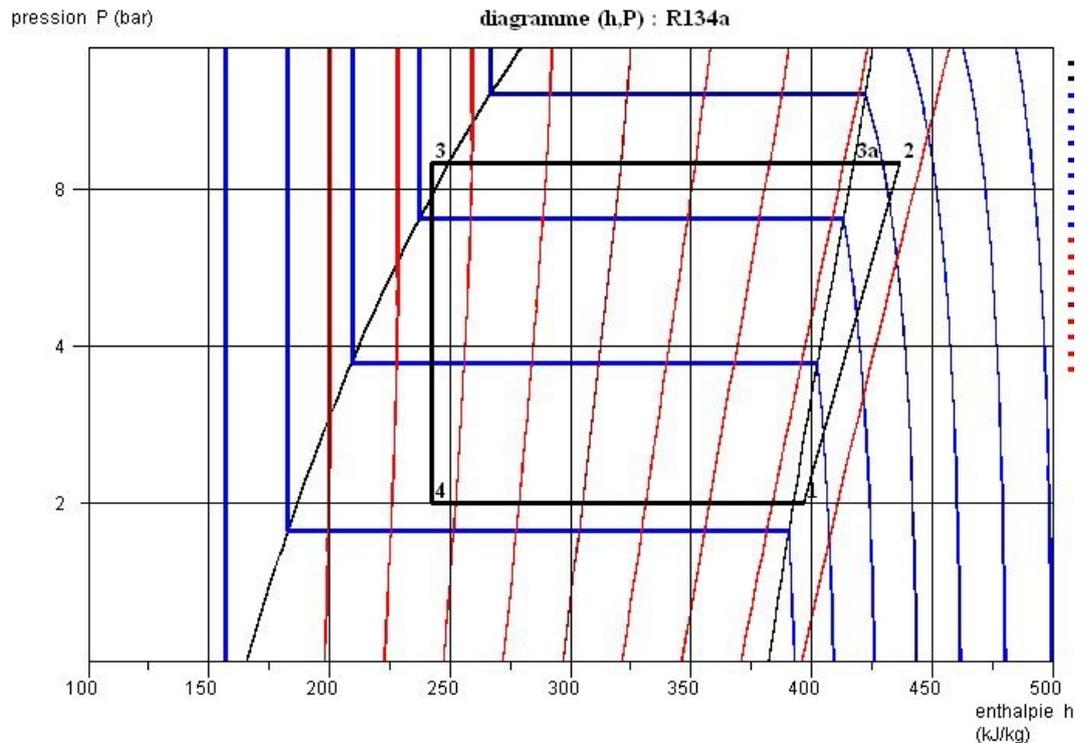
Le laminage isenthalpique (3-4) conduit à une augmentation de l'entropie, le point 4 étant situé dans la zone d'équilibre liquide-vapeur (titre égal à 0,2716).

La forme de ce cycle s'écarte assez sensiblement de celle de celui de Carnot, compte tenu de l'allure des isobares. Il est possible de l'améliorer en procédant à des resurchauffes qui conduisent à une détente dite para-isotherme, et à des prélèvements qui permettent d'effectuer une régénération partielle. De telles variantes seront proposées aux élèves dans l'étape de consolidation de leurs connaissances (cf. troisième partie).

#### 4.6.3 TRACE DANS LE DIAGRAMME DES FRIGORISTES

Sur le diagramme des frigoristes (h, log P) (figure ci-dessous), pour augmenter la lisibilité, on n'a fait apparaître que les isothermes (en bleu), et les isentropes (en rouge). La compression irréversible se traduit par une augmentation de l'entropie.

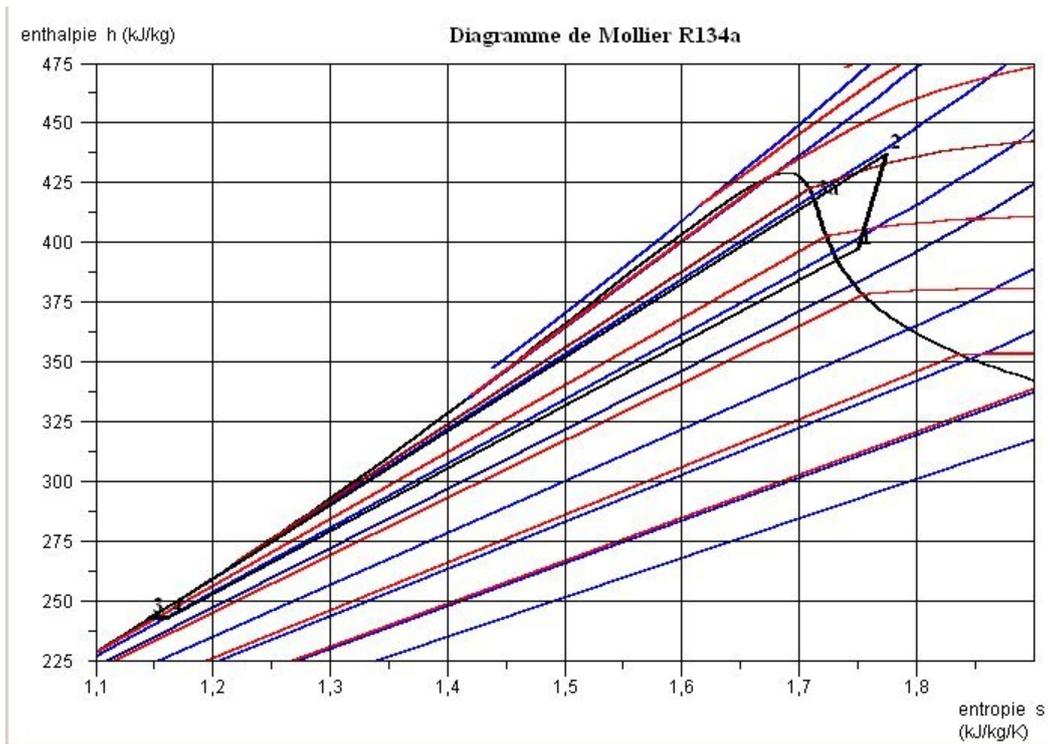
Si l'on néglige les pertes de charge dans le condenseur, l'ensemble du refroidissement correspond à l'horizontale (2-3), les trois parties représentant le désurchauffeur, la condensation proprement dite et le sous-refroidisseur apparaissant très distinctement.



Cycle frigorifique dans le diagramme des frigoristes

#### 4.6.4 TRACE DANS LE DIAGRAMME DE MOLLIER

Sur le diagramme de Mollier (figure ci-dessous), pour augmenter la lisibilité, on n'a fait apparaître que les isobares (en bleu), et les isothermes (en rouge). Le point 1 légèrement surchauffé par rapport à la vapeur saturée est placé sur l'isobare 2 bars. La compression irréversible se traduit par une augmentation de l'entropie. Le refroidissement par l'air extérieur comporte trois étapes : une désurchauffe (2-3a) dans la zone vapeur, une condensation selon le segment de droite de pente T (3a-3b), et un léger sous-refroidissement (3b-3) presque confondu avec la courbe de saturation liquide.



Cycle frigorifique dans le diagramme de Mollier

#### 4.7 Création dans ThermoOptim des transfos à partir des points

Si le cycle a été modélisé sans utiliser l'éditeur de schémas de ThermoOptim, (cf. sections 4.3 et 4.4), et que les points du cycle ont été créés ou transférés dans le simulateur afin de pouvoir les représenter dans les diagrammes, le projet se présente comme indiqué figure ci-dessous.

nom du point	corps	P (bar)	T (°C)
1	R134a	2	-5,07855
2	R134a	9	53,21459
3a	R134a	9	35,54631
3	R134a	9	30,54631
4	R134a	2	-10,07855

Le tableau '0 TRANSFOS' est vide. Le tableau '0 NOEUDS' est vide. Le tableau '0 ECHANGEURS DE CHALEUR' est vide. Les boutons 'Bilan', 'Recalculer' et 'Schéma associé' sont présents.

Cycle frigorifique dans le simulateur

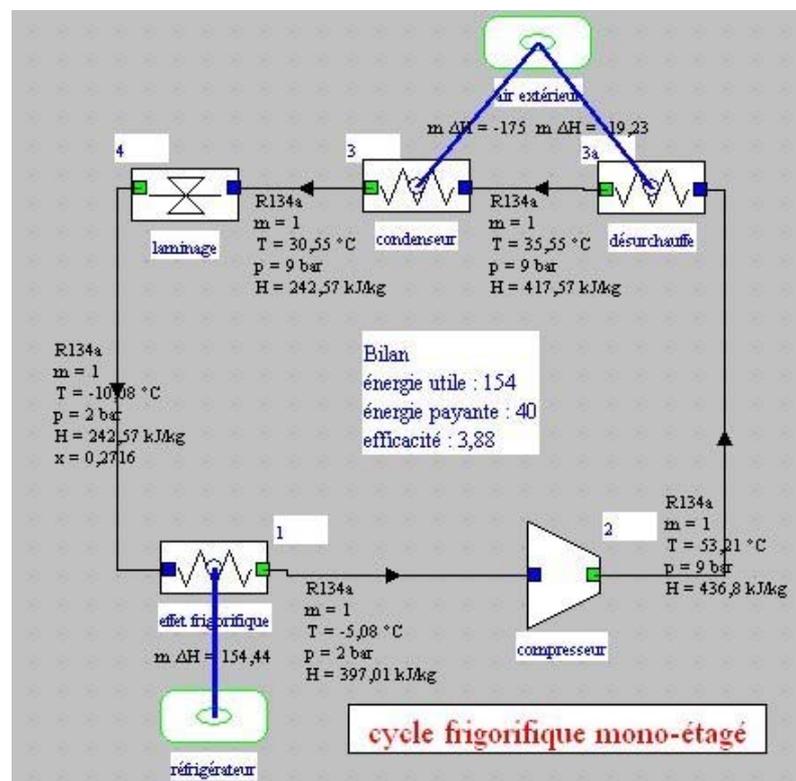
Pour finir de représenter le cycle dans ThermoOptim, il faut maintenant relier ces

points par des transfos, ce qui peut être fait très simplement à partir de l'éditeur de schémas. Il suffit pour cela de sélectionner dans la palette les différents composants, en entrant dans les champs définissant les ports d'entrée et de sortie leurs différents noms et leur corps (du R134a).

Les points étant tous connus, les transfos doivent être initialement paramétrés en conséquence. En particulier le compresseur doit recalculer la valeur du rendement, le point aval étant connu.

Une fois ces valeurs déterminées, le paramétrage peut être changé si l'on désire pouvoir simuler d'autres cas.

Le synoptique de l'installation se déduit des remarques précédentes (figure ci-dessous). Il correspond bien sûr au schéma de la figure de la section 4.5.1, auquel on a ajouté les sources de chaleur externes pour montrer que la machine interagit avec son environnement. On a aussi fait apparaître le cartouche avec le bilan du cycle, et on retrouve bien les valeurs qui avaient été déterminés par le calcul pas à pas.



Synoptique du cycle frigorifique

Ce cycle peut être directement obtenu en chargeant dans ThermoOptim l'exemple intitulé « t1\_6.2 cycle frigorifique simple » à partir du catalogue d'exemples.

## 4.8 Activités pédagogiques connexes avec les élèves

### 4.8.1 Diagrammes thermodynamiques

Des exemples d'activités concernant les diagrammes thermodynamiques sont donnés section 2.8.1. Nous vous suggérons de vous y reporter.

### 4.8.2 Cycle de machine frigorifique

Autour du cycle du réfrigérateur domestique, de nombreuses activités intéressantes les élèves peuvent être proposées :

- comparer qualitativement ce cycle par rapport au cycle de Carnot inverse, en identifiant les écarts qui existent entre eux ;
- comparer la valeur du COP avec celle du cycle de Carnot inverse

fonctionnant entre  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (freezer) et  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (air ambiant), pour se faire une idée de l'écart du cycle réel (3,88) par rapport au cycle idéal (11,7) ;

- étudier l'évolution du COP et de la puissance frigorifique lorsque la température de l'air ambiant varie. Pour cela, il faut ajuster la pression de condensation pour que la température de condensation soit supérieure d'environ  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  à celle de l'air : environ 10,17 bars pour  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , et 11,2 pour  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . L'évolution du COP peut ainsi être tracée ;
- étant donné que les points 3 et 4 ont la même enthalpie, plus le sous-refroidissement (3b-3) est important, plus l'effet frigorifique l'est, et ceci sans que le travail de compression soit modifié, comme le montre très bien le diagramme des frigoristes. On a donc intérêt à sous-refroidir autant que possible pour augmenter les performances du cycle. La limite est que la température du point 3 doit rester supérieure à celle de l'air extérieur, plus un certain écart, appelé pincement, nécessaire pour que la chaleur puisse être échangée ;
- il est facile de fractionner la compression en deux phases, et de regarder quelle réduction du travail peut être obtenue par un refroidissement intermédiaire par échange avec l'air extérieur ;
- le dimensionnement des sections de passage peut être déterminé en transformant le débit-masse en débit-volume à partir de la donnée du volume massique ;
- il peut aussi être intéressant d'effectuer une comparaison de ce cycle avec celui utilisant le R12, fluide principalement utilisé auparavant dans les réfrigérateurs domestiques, mais banni depuis 1994 compte tenu de son important potentiel de destruction de la couche d'ozone. Cette comparaison montre que les niveaux de pression sont un peu modifiés, mais que le COP est sensiblement le même. Avec la version Education Salle de cours de Thermoptim, le changement de fluide se fait automatiquement à partir du Gestionnaire de corps (menu "Spécial"), tandis qu'avec la version de démonstration, il faut changer le nom du fluide dans l'éditeur de schémas puis mettre à jour le simulateur à partir de l'interface existante. On prendra garde à ce que les pressions doivent être modifiées pour que les températures de condensation et d'évaporation des deux cycles soient les mêmes.

#### 4.9 Exploration de cycles existants

---

Dans ce qui précède, nous avons montré comment calculer pas à pas le cycle de la machine de réfrigération, puis comment le modéliser dans Thermoptim, en partant du principe que l'objectif pédagogique visé était d'apprendre aux élèves à acquérir ce savoir-faire tout en assimilant des connaissances déclaratives suffisantes pour comprendre les fondements de ces opérations.

Il existe cependant des contextes pédagogiques où cette manière de procéder ne peut pas être adoptée, essentiellement par manque de temps, et où cependant l'enseignant souhaite que ses élèves puissent utiliser Thermoptim et les diagrammes interactifs, sans construire par eux-mêmes les modèles.

C'est par exemple le cas dans certaines Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles (CPGE) où le volume horaire est insuffisant pour opérer comme nous l'avons fait dans les sections précédentes. Pourtant, de nombreux enseignants considèrent pédagogiquement pertinent d'utiliser Thermoptim, car cela permet aux élèves de voir comment les équations qu'ils étudient peuvent être mises en application. Leur programme acquiert ainsi dans leur esprit davantage de sens : il correspond à un savoir qui peut être vraiment utilisé.

Dans de tels cas, une alternative pédagogique à celles que nous avons présentées jusqu'ici consiste à faire travailler les élèves sur des exemples déjà modélisés, en

leur demandant de les explorer et de les comprendre. Ils peuvent aussi modifier les paramétrages et réaliser quelques études de sensibilité.

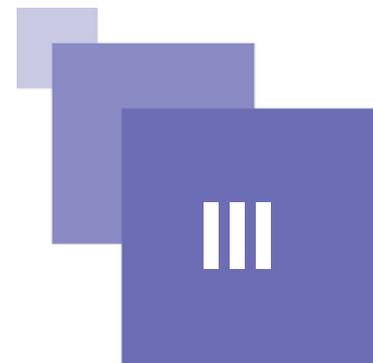
S'il souhaite faire étudier la machine de réfrigération de cette manière, l'enseignant sélectionne alors dans le catalogue d'exemples de ThermoOptim l'exemple intitulé « t1\_6.2 cycle frigorifique simple » à partir du catalogue d'exemples et demande à ses élèves de le charger.

Le projet étant chargé, il commence par passer en revue les différents composants, en fournissant à ses élèves des explications technologiques et thermodynamiques. Ensuite, il peut leur demander de procéder à des changements de paramétrage et d'en étudier l'impact sur les performances globales du cycle.

Même si elle peut paraître un peu limitée, cette approche pédagogique peut se révéler très féconde, les élèves s'impliquant souvent beaucoup plus lorsqu'ils ont un simulateur à leur disposition que devant une feuille de papier ou un tableau. Elle est en particulier souvent appropriée en formation professionnelle, les élèves étant généralement assez réticents devant les approches disciplinaires académiques. Ils préfèrent avoir l'outil logiciel entre leurs mains pour pouvoir l'explorer à leur guise et poser des questions aux enseignants qui les encadrent.



# Troisième partie : activités pédagogiques de consolidation



1 Exercices	96
2 Echangeurs de chaleur	97
3 Cycles combinés à un niveau de pression	97
4 Fiches thématiques	98
5 Utilisation des classes externes	99
6 Fiches-guides de TD	99
7 Guides méthodologiques	102

La troisième partie de ce guide est consacrée à la présentation d'une série d'activités pédagogiques destinées à la consolidation des notions présentées dans la seconde partie.

De nombreuses activités peuvent être menées à ce stade. Elles peuvent porter :

- sur l'amélioration des cycles, la comparaison avec le cycle de Carnot direct ou inverse permettant d'identifier les composants dans lesquels les écarts sont les plus importants. La deuxième partie de la **note de présentation allégée des cycles de base**<sup>30</sup> donne quelques exemples ;
- sur la maîtrise de ThermoOptim en tant qu'outil de modélisation et de simulation ;
- sur le dimensionnement des échangeurs de chaleur, qui jouent souvent un rôle critique dans les performances des cycles, et que les élèves ont généralement du mal à bien comprendre.

C'est aussi à ce stade qu'il peut être intéressant de souligner aux élèves les similitudes qui existent sur le plan thermodynamique entre des technologies aussi différentes que celles mises en oeuvre dans les exemples de base présentés lors des activités d'initiation. Ces réflexions, qui débouchent tout naturellement sur les notions **d'analyse système** ou **d'analyse fonctionnelle**, permettent de généraliser les démarches introduites précédemment et de préparer les élèves à des études de cycles plus complexes qui feront l'objet d'approfondissements ultérieurs.

Les élèves peuvent en particulier consulter utilement la page du portail qui explique la **démarche générale de modélisation**<sup>31</sup> que ThermoOptim permet d'adopter. Si, lors de l'étape d'initiation, l'enseignant a privilégié l'approche de construction des cycles pas à pas en utilisant le calculateur-inverseur des propriétés des fluides, il

30 - <http://www.thermooptim.org/sections/enseignement/pedagogie/presentation-pedagogique>

31 - <http://www.thermooptim.org/sections/base-methodologique/modelisation-systemes/demarche-methodologique>

peut être judicieux de faire construire aux élèves les cycles de base en utilisant les guides de prise en mains de Thermoptim ou les séances Diapason correspondantes, afin qu'ils comprennent bien, maintenant qu'ils ne sont plus débutants, l'intérêt d'utiliser le simulateur pour bâtir des cycles.

Parmi les ressources disponibles pour cette phase de consolidation, on peut citer de nombreux exercices, une partie des fiches thématiques et des fiches-guides de TD, et certains guides méthodologiques.

Les scénarios pédagogiques qui peuvent être mis en œuvre vis à vis des élèves sont ici du type S1 à S4.

## A. 1 Exercices

Tout d'abord, une fois les cycles de base étudiés, des exercices permettent de développer la capacité de l'élève à bien comprendre ces cycles et à les modéliser avec Thermoptim. Les énoncés étant très succincts, le schéma de l'installation est fourni dans chaque cas. Les corrigés sont accessibles aux enseignants authentifiés. Une fois le modèle établi, des études de sensibilité peuvent être effectuées pour analyser l'influence des différents paramètres sur les performances des cycles.

Ces exercices peuvent être étudiés en se référant aux fiches thématiques correspondantes. Les études des cycles à vapeur à prélèvement ou les cycles de réfrigération bi-étagés conduisent à introduire des nœuds, dont le paramétrage doit être fait avec soin. Alors que dans la phase d'acquisition des bases les cycles ne mettaient en jeu qu'un seul circuit et que donc la propagation des points et du corps d'un composant amont à un composant aval se faisait automatiquement, ce n'est plus nécessairement le cas dans les mélangeurs et séparateurs, ce qui impose une vigilance nouvelle à laquelle les élèves ne sont pas habitués. Ce ne sont que des petites difficultés, mais il est préférable qu'elles soient bien expliquées aux élèves.

La *séance Diapason S07\_trucs*<sup>32</sup> fournit une série de trucs et astuces pour faciliter la modélisation avec Thermoptim, en particulier sur ces questions.

Les exercices relatifs aux cycles étudiés précédemment sont les suivants :

- *Exercices sur les centrales à vapeur*<sup>33</sup> : cycle simple, cycle à prélèvement et réchauffe, cycle supercritique, cycle nucléaire REP ;
- *Exercices sur les TAG*<sup>34</sup> : turbine à gaz simple, turbine à gaz à cycle fermé, turbine à gaz à régénération, turbine à gaz à refroidissement intermédiaire, turbine à gaz à combustion séquentielle, turbine à gaz biétagée, turbine à gaz à injection de vapeur, turbine à gaz réfrigérée ;
- *Exercices sur les installations de réfrigération à compression de vapeur*<sup>35</sup> : cycle frigorifique simple, cycle avec surchauffe et sous-refroidissement, cycle avec échangeur, cycle frigorifique bi-étagé, cycle à injection totale, cycle à injection partielle, cycle à échangeur moyenne pression, cycle de pompe à chaleur.

32 - [http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s07\\_trucs-astuces](http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s07_trucs-astuces)

33 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/exercices-vap-sujets>

34 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/exercices-tag-sujets>

35 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/exercices-installations>

## B. 2 Echangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur constituent souvent un des sujets que les élèves ont le plus de difficulté à bien comprendre et qui mérite donc d'être traité avec un grand soin. C'est pour cette raison qu'une section particulière leur est consacrée dans ces activités de consolidation.

La *fiche thématique sur les échangeurs*<sup>36</sup> permet d'introduire les principales notions à connaître, et l' *exercice sur la turbine à gaz à régénération*<sup>37</sup> fournit un exemple à la fois assez simple et intéressant pour illustrer leur fonctionnement et leur rôle critique dans un cycle.

Cet exercice présente de plus l'avantage de permettre une réflexion sur l'influence qu'ont le rapport de compression et la température d'entrée turbine sur les performances de la turbine à gaz à régénération. Il montre que cette configuration ne permet d'améliorer le cycle que dans certaines conditions, qui ne sont pas toujours vérifiées. L'étude des cycles combinés qui fait l'objet de la section suivante trouve alors directement sa place comme solution alternative.

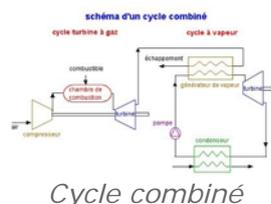
Un autre exemple relativement simple à étudier est celui du condenseur d'un cycle de centrale à vapeur, traité à la fin du guide de prise en mains correspondant.

Ensuite pourront être étudiés des échangeurs plus complexes comme la chaudière d'un cycle à vapeur ou le condenseur d'un cycle frigorifique.

Le *fil d'Ariane sur les échangeurs de chaleur*<sup>38</sup> fait partie des activités d'approfondissement de la quatrième partie de ce guide. Il montre comment concrètement effectuer des calculs de dimensionnement technologique et de comportement en régime non-nominal.

## C. 3 Cycles combinés à un niveau de pression

L'optimisation d'un cycle combiné à un niveau de pression (figure ci-dessous) est un exercice particulièrement intéressant car il permet de réfléchir à de nombreuses notions tout en restant d'un niveau de complexité tout à fait abordable, ce qui justifie sa présence dans les activités de consolidation.



Cycle combiné

Etant donné qu'il met en jeu des échangeurs de chaleur assurant le couplage thermique entre les gaz d'échappement d'une turbine à gaz et un cycle à vapeur, il est préférable que les élèves aient auparavant effectué quelques modélisations mettant en jeu des échangeurs, parmi celles proposées dans la section précédente.

Pour un cycle combiné, une attention particulière doit être apportée au rôle du générateur de vapeur-récupérateur, qui doit être modélisé comme un triple échangeur en série, sans quoi un croisement de température peut apparaître en son sein.

Alors que le paramétrage d'un échangeur simple constitue un exercice à cinq degrés de liberté, celui d'un tel générateur de vapeur est beaucoup plus contraint,

36 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/composants/echangeurs>

37 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/exercices-tag-sujets>

38 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/pedagogie/fils-d-ariane/fil-echangeur>

car ses trois éléments ne peuvent être paramétrés indépendamment les uns des autres, ce que certains élèves peuvent avoir des difficultés à bien comprendre.

Le pincement, qui apparaît en sortie d'économiseur / entrée de vaporiseur, doit être déterminé comme résultat du dimensionnement de l'échangeur, et non comme une donnée d'entrée de ce paramétrage.

La recherche du rapport des débits qui traversent la turbine à gaz et le cycle à vapeur ne peut se faire que par approximations successives, ce qui conduit à effectuer de nombreux recalculs du modèle.

La *fiche-thématique sur les cycles combinés*<sup>39</sup> et la *séance Diapason S41*<sup>40</sup> traitent de ce sujet.

## D. 4 Fiches thématiques

Rappelons que les fiches thématiques synthétiques d'une part constituent une introduction sommaire à la discipline, et d'autre part renvoient sur différentes activités pédagogiques (cours en ligne, exercices...). Les fiches thématiques des systèmes suivants peuvent être étudiées à ce stade.

*Turbines à gaz*<sup>41</sup>

*Centrales à vapeur*<sup>42</sup>

*Moteurs alternatifs à combustion interne*<sup>43</sup>

*Installations de réfrigération à compression de vapeur*<sup>44</sup>

*Cycles combinés*<sup>45</sup>

*Installations de cogénération*<sup>46</sup>

*Piles à combustible*<sup>47</sup>

*Cycle de turbine à gaz à air humide HAT*<sup>48</sup>

*Cycle de Kalina*<sup>49</sup>

*Cycles au CO2 supercritique pour réacteurs nucléaires HTR*<sup>50</sup>

*Cycles à oxycombustion*<sup>51</sup>

*Cycle de Brayton inverse*<sup>52</sup>

*Cycles nucléaires à haute température (HTR)*<sup>53</sup>

*Cryogénie*<sup>54</sup>

*Cycles de réfrigération à absorption*<sup>55</sup>

*Cycles de climatisation*<sup>56</sup>

Il peut être utile pour l'étude de ces cycles, de se reporter aux *séances Diapason*

39 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-combines>

40 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s41-exercice>

41 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/turbines-gaz>

42 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/centrales-vapeur>

43 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/maci>

44 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/refrigerateur>

45 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-combines>

46 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cogeneration>

47 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/piles-combustible>

48 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-hat>

49 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-kalina>

50 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-moteur-au-co2>

51 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-graz>

52 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-brayton-inverse>

53 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-nuceaires-haute>

54 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cryogenie>

55 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-absorption>

56 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/climatisation>

*sur le traitement d'air et la climatisation TACLIM*<sup>57</sup> et suivantes préparées par P. Chantrenne.

**Centrales nucléaires à Eau Pressurisée (REP)** <sup>58</sup>

*Cycles à vapeur supercritiques*<sup>59</sup>

**Evapoconcentration et séchage par air chaud** <sup>60</sup>

**Cycle de Uehara** <sup>61</sup>

**Installations de géothermie** <sup>62</sup>

**Tours de refroidissement** <sup>63</sup>

## E. 5 Utilisation des classes externes

C'est aussi lors de cette deuxième grande étape de leur formation que les élèves peuvent être amenés à utiliser des classes externes, qui permettent d'étendre le noyau du progiciel en proposant des modèles de corps ou de composants complémentaires. Cette utilisation ne présente aucune difficulté particulière, mais doit être expliquée.

Le début de la *séance Diapason S07\_ext*<sup>64</sup> explique comment procéder pour paramétrer un composant externe et configurer le fichier extUser.zip où la classe externe doit se trouver pour que Thermoptim la reconnaisse.

De nombreuses fiches-guides de TD font appel à de telles classes externes.

## F. 6 Fiches-guides de TD

Les fiches-guides de TD suivantes peuvent être étudiées à ce stade.

### FG1 Centrale solaire SEGS

*Sujet seul*<sup>65</sup>

*Complet avec corrigé*<sup>66</sup>

Cette fiche-guide permet d'étudier le fonctionnement des centrales électriques solaires et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec Thermoptim. Le TD est centré sur la modélisation d'une centrale solaire du type SEGS mise au point par la société Luz, représentée comme une simple variante d'un cycle de Rankine, où la chaudière est remplacée par un générateur de vapeur dont le caloporteur est réchauffé par le champ de capteurs.

Elle fait appel à deux classes externes, "solar concentrator" et "Dowtherm A".

### FG2 Turboréacteurs

*Sujet seul*<sup>67</sup>

57 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-tai-traitement>

58 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/centrales-nucleaires-eau>

59 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-vapeur>

60 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/evapoconcentration>

61 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-uehara>

62 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/geothermie>

63 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/composants/tours-refroidissement>

64 - [http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s07\\_ext-classes-externes](http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s07_ext-classes-externes)

65 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-sujet-fg1>

66 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-fg1>

67 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-sujet-fg2>

### ***Complet avec corrigé***<sup>68</sup>

Cette fiche-guide traite des turboréacteurs et montre aux élèves comment construire des modèles de turboréacteurs de complexité croissante (simple flux au point fixe au sol avec une variante d'une turbine à gaz munie d'une tuyère, simple flux en vol avec diffuseur d'entrée, configuration à double flux).

Elle fait appel à deux composants externes, "diffuser", "nozzle" et au pilote "thrust".

### **FG3 Etang solaire**

---

#### ***Sujet seul***<sup>69</sup>

#### ***Complet avec corrigé***<sup>70</sup>

Cette fiche-guide traite des systèmes de génération d'électricité à partir d'un étang solaire à gradient inverse.

### **FG5 OTEC fermé, OTEC ouvert**

---

#### ***Sujet seul***<sup>71</sup>

#### ***Complet avec corrigé***<sup>72</sup>

Cette fiche-guide permet aux élèves d'étudier le fonctionnement de centrales électriques utilisant le gradient thermique des océans (OTEC pour Ocean Thermal Energy Conversion). Deux variantes sont étudiées : la plus simple correspond à un cycle fermé, et la seconde à un cycle ouvert qui présente l'avantage de produire aussi de l'eau potable.

### **FG6 Tours de refroidissement**

---

#### ***Sujet seul***<sup>73</sup>

#### ***Complet avec corrigé***<sup>74</sup>

Cette fiche-guide est centrée sur la modélisation des tours de refroidissement, son objectif étant de montrer le gain de COP apporté à une machine frigorifique industrielle par l'utilisation d'une telle tour à la place d'un refroidissement par air du condenseur.

Elle fait appel à deux classes externes, "DirectCoolingTowerInlet" et "DirectCoolingTower".

### **FG8 Emissions de CO2 dans les cycles à combustion**

---

#### ***Sujet et corrigé***<sup>75</sup>

Cette fiche-guide explique comment calculer les émissions de carbone et de gaz carbonique pour les cycles mettant en jeu des combustions.

Elle fait appel à une classe externe, "CO2 emissions".

### **FG9 Centrales électriques géothermiques**

---

#### ***Sujet seul***<sup>76</sup>

#### ***Complet avec corrigé***<sup>77</sup>

Cette fiche-guide traite des systèmes de génération d'électricité à partir de chaleur géothermique.

68 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-fg2>

69 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-sujet-fg3>

70 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-fg3>

71 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-sujet-fg5>

72 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-fg5>

73 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-sujet-fg6>

74 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-fg6>

75 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-sujet-fg8>

76 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-fg-9-sur>

77 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-td-fg9>

## FG10 Cycles de réfrigération à éjecteur

*Sujet seul*<sup>78</sup>

*Complet avec corrigé*<sup>79</sup>

Cette fiche-guide traite des cycles de réfrigération à éjecteur.

## FG14 Climatisation

*Sujet seul*<sup>80</sup>

*Complet avec corrigé*<sup>81</sup>

Cette fiche-guide traite de deux cycles de climatisation (un pour l'été et un pour l'hiver).

Il peut être utile pour l'étude de ces cycles, de se reporter aux *séances Diapason sur le traitement d'air et la climatisation TACLIM*<sup>82</sup> et suivantes préparées par P. Chantrenne.

## FG15 Modélisation d'un palier de centrale nucléaire N4 pour réacteur REP

*Sujet et corrigé*<sup>83</sup>

Cette fiche-guide permet d'étudier un circuit secondaire de centrale nucléaire du type Réacteur à Eau Pressurisée : l'objectif est de le modéliser sous Thermoptim, de calculer son bilan énergétique, et de réaliser quelques analyses de sensibilité sur des paramètres modifiables

## FG16 Etude des performances d'une turbine à gaz en fonction des paramètres de fonctionnement

*Sujet seul*<sup>84</sup>

*Complet avec corrigé*<sup>85</sup>

L'objectif de ce travail est de faire découvrir aux élèves la technologie et le fonctionnement d'une turbine à gaz ainsi que les paramètres clés de son fonctionnement. Auteur : Patrice NORTIER.

## FG17 Installations de cogénération à moteur à gaz

*Sujet et corrigé*<sup>86</sup>

L'objectif de ce TD est l'étude et la modélisation sous Thermoptim d'installations de cogénération existantes, et l'analyse de l'influence des différents paramètres sur leurs performances.

## FG18 Installations de cogénération à turbine à gaz

*Sujet et corrigé*<sup>87</sup>

L'objectif de ce TD est l'étude et la modélisation sous Thermoptim d'installations de

78 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-fg10-sujet>

79 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-td-fg10>

80 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-fg148544>

81 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-td-fg14>

82 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-tai-traitement>

83 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-fg15>

84 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-fg16>

85 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-td-fg168489>

86 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-fg17>

87 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-fg18>

cogénération existantes, et l'analyse de l'influence des différents paramètres sur leurs performances.

## FG19 Production d'énergie pour l'augmentation de capacité d'une papeterie

---

*Sujet seul*<sup>88</sup>

*Complet avec corrigé*<sup>89</sup>

L'objectif de ce travail est de faire découvrir aux élèves la technologie et le fonctionnement d'installations de production d'énergie pour une papeterie, de leur faire étudier plusieurs options techniques et les comparer économiquement. Auteur : Patrice NORTIER.

## G. 7 Guides méthodologiques

### 7.1 Analyse qualitative des cycles, comparaison avec le cycle de Carnot

---

L'ensemble des activités de *comparaison des cycles de base avec celui de Carnot*<sup>90</sup> correspond à des réflexions qui trouvent pleinement leur place à ce stade de la formation des élèves.

### 7.2 Démarche méthodologique générale

---

Au cours de la première étape de leur formation, seules quelques généralités sur les cycles ont été introduites. Comme nous l'avons dit en introduction, elles peuvent être complétées par une réflexion plus approfondie sur la *démarche méthodologique générale*<sup>91</sup> mise en œuvre dans le portail.

C'est notamment l'occasion de faire prendre conscience aux élèves que les technologies énergétiques peuvent être considérées comme des **systèmes** associant un petit nombre de **composants**. L'analyse fonctionnelle et l'analyse système constituent ainsi des démarches particulièrement fécondes quand il s'agit d'étudier ces technologies.

C'est ainsi qu'un moteur fait appel séquentiellement à trois fonctions : comprimer, chauffer, détendre, puis refroidir, tandis qu'un cycle inverse utilise bien les mêmes, mais dans l'ordre contraire : comprimer, refroidir, détendre et chauffer. Ces réflexions nourriront leur compréhension des cycles complexes et leur permettront de les aborder avec une compréhension d'ensemble.

### 7.3 Indicateurs environnementaux

---

Les *indicateurs environnementaux*<sup>92</sup> sont des critères de plus en plus souvent utilisés pour qualifier la performance des systèmes énergétiques, qui peuvent sans difficulté être introduits à ce stade de la formation des élèves.

### 7.4 Simulation de systèmes à énergie solaire

---

Les fiches de ce *guide méthodologique*<sup>93</sup> portent essentiellement sur la manière de prendre en compte la variation de la ressource solaire, problématique qui intéresse beaucoup d'élèves, même si elle ne relève pas à proprement parler de la thermodynamique appliquée.

88 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-fg19>

89 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-td-fg19-corr>

90 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/analyse-qualitative>

91 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/modelisation-systemes/demarche-methodologique>

92 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/indicateurs-qualite>

93 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/simulation-systemes>

## 7.5 Analyses exergetiques

Il est aussi possible, à ce stade de la formation, d'introduire la notion d'exergie et de faire effectuer aux élèves des *calculs de bilans exergetiques*<sup>94</sup> simples, qui permettent de quantifier les irréversibilités que les comparaisons avec le cycle de Carnot permettent d'analyser uniquement qualitativement.

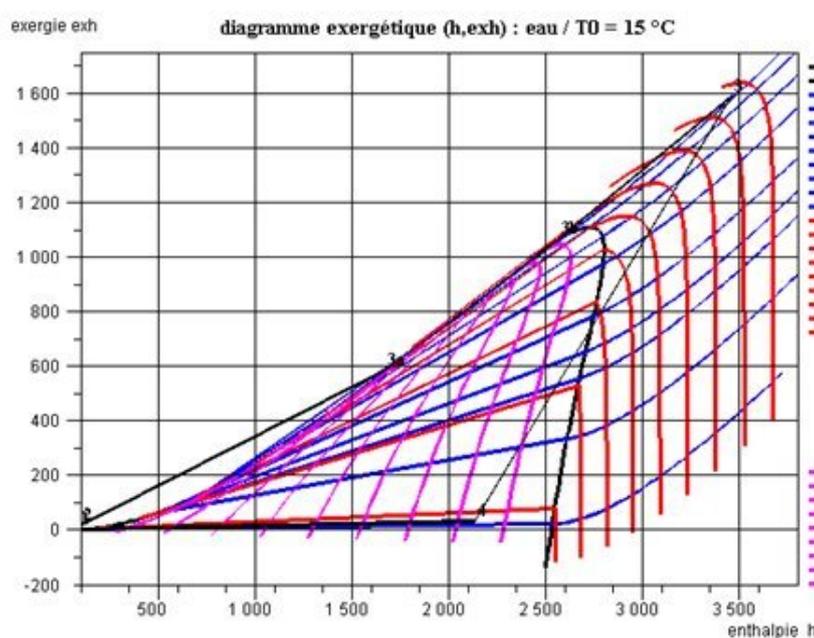
La *séance Diapason S06*<sup>95</sup> explique comment procéder.

Les diagrammes exergetiques présentent eux aussi un grand intérêt. On représente généralement l'exergie en ordonnée avec, en abscisse, soit l'enthalpie, soit l'entropie.

Les paragraphes qui suivent présentent les tracés, dans les diagrammes exergetiques, des cycles étudiés dans la seconde partie. Sur les diagrammes exergetiques des figures ci-dessous, pour augmenter la lisibilité, on n'a fait apparaître que les isobares (en bleu), les isothermes (en rouge) et les isotitres (en magenta).

### 7.5.1 Représentation dans les diagrammes exergetiques du cycle à vapeur

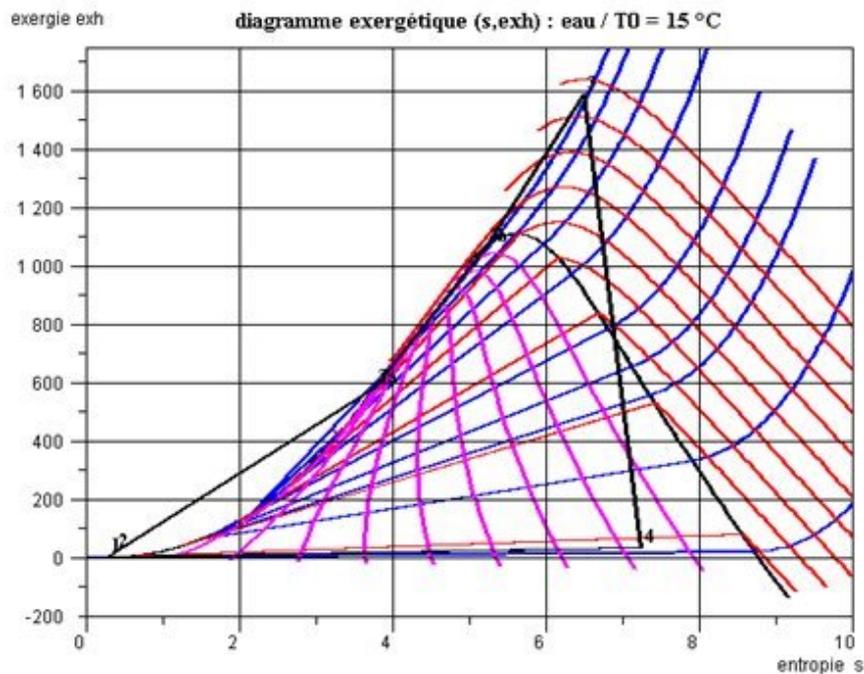
Les points 1 et 2 représentant la compression à l'état liquide sont quasiment superposés, et l'échauffement à l'état liquide presque confondu avec la courbe de saturation liquide. La vaporisation se fait selon un segment de droite de pente  $\theta = 1 - T_0/T$  dans le diagramme exergetique ( $h, exh$ ), et  $(T - T_0)$  dans le diagramme ( $s, exh$ ).



Cycle à vapeur simple sur diagramme ( $h, exh$ )

94 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/analyses-exergetiques/analyse-quantitative>

95 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/analyses-exergetiques/s06-bilans-exergetiques>



*Cycle à vapeur simple sur diagramme (s, exh)*

Le point 3 représentant la fin de la surchauffe isobare est bien situé au maximum de l'isotherme  $T = 560 \text{ °C}$ , ce qui montre immédiatement que la pression et la température ont été judicieusement choisies pour maximiser l'exergie de la vapeur.

La détente irréversible se traduit par une augmentation de l'entropie, le point 4 étant situé dans la zone d'équilibre liquide-vapeur. Les irréversibilités de détente sont parfaitement visibles dans le diagramme exergetique entropique (s, exh).

La centrale à vapeur est une machine qui reçoit de l'extérieur un apport d'exergie au niveau de la chaudière, et, par recyclage interne, un apport d'exergie au niveau de la pompe. Cette exergie est pour l'essentiel convertie sous forme mécanique dans la turbine et pour partie dissipée dans le condenseur.

### 7.5.2 Représentation dans les diagrammes exergetiques du cycle frigorifique

Pour un système multitherme en régime permanent, échangeant de la chaleur avec  $n$  sources  $q_k$  à la température  $T_k$  l'équation exergetique peut s'exprimer sous la forme :

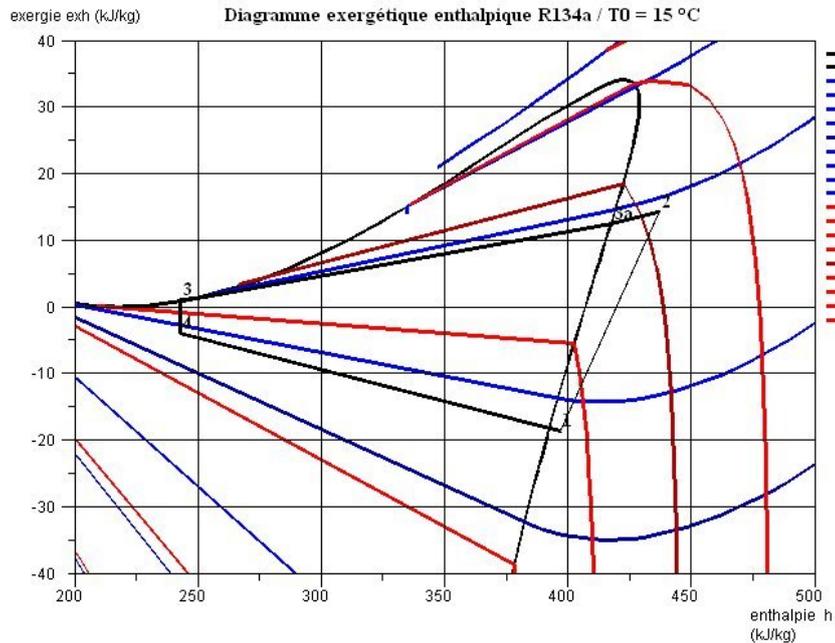
$$w_t + \sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) q_k - \Delta ex_h - \Delta ex_{hi} = 0$$

*Equation exergetique du cycle frigorifique*

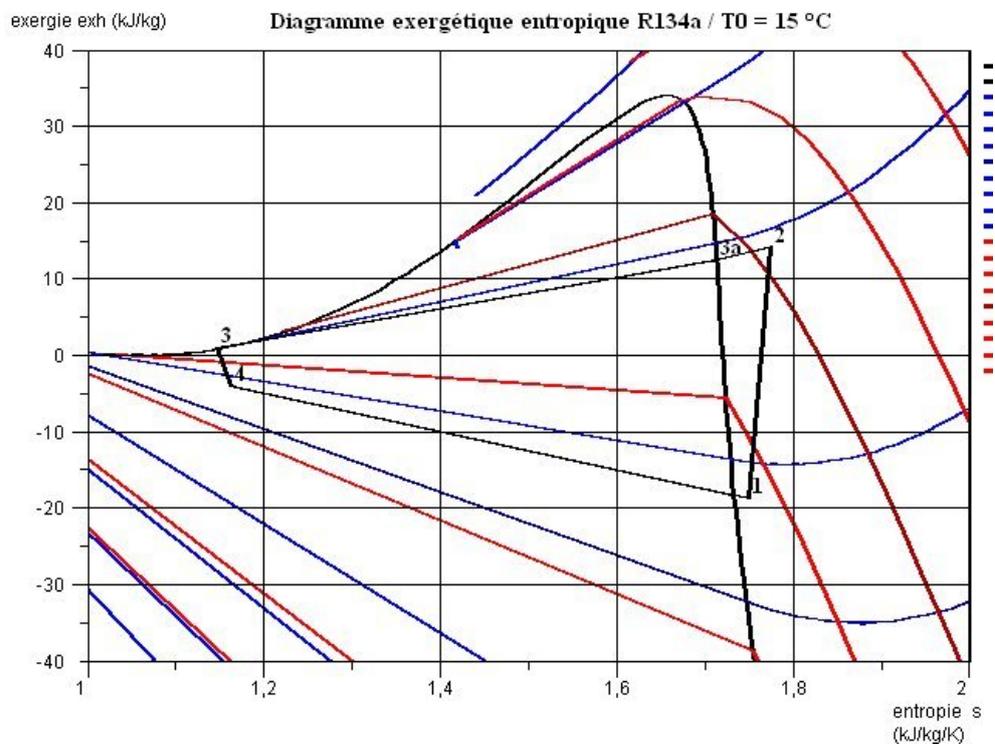
Ecrite pour l'un des échangeurs ( $w_t = 0$ ), cette relation indique que la variation d'exergie  $\Delta ex_h$ , du fluide à travers l'échangeur est égale à l'exergie-chaleur reçue par le fluide moins l'exergie  $\Delta ex_{hi}$  détruite du fait des irréversibilités internes et externes.

Sur les diagrammes exergetiques du cycle frigorifique ci-dessous, on voit clairement que l'exergie du R134a diminue aussi bien dans le condenseur que dans

l'évaporateur. Dans le premier, l'exergie-chaaleur est négative car la température du fluide est supérieure à celle de l'environnement (facteur de Carnot positif) et la chaleur fournie par le système (et donc de signe négatif), et dans le second parce que la température du fluide est inférieure à celle de l'environnement (facteur de Carnot négatif) et la chaleur reçue par le système (et donc de signe positif). La détente isenthalpique correspond, elle aussi, à une chute d'exergie.



*Cycle frigorifique sur diagramme ( $h, exh$ )*



*Cycle frigorifique sur diagramme ( $s, exh$ )*

Les deux échangeurs et le détendeur sont des composants où l'exergie du fluide diminue. Pour fermer le cycle, il faut nécessairement fournir au fluide une exergie

correspondant à celle qu'il a perdue. C'est le rôle du compresseur, et les diagrammes exergétiques permettent de bien comprendre la nécessité de cet apport exergétique.

Ces deux types de diagrammes, et notamment le  $(s, \text{exh})$ , nous paraissent particulièrement faciles à interpréter et très riches d'enseignements pour une analyse exergétique des cycles.

On notera toutefois qu'ils ne visualisent que les variations d'exergie du fluide. Ils ne permettent donc pas d'estimer les irréversibilités dues aux différences de température avec les sources externes, qui sont prises en compte dans les bilans exergétiques lors du calcul des exergies-chaleurs.



# Quatrième partie : activités pédagogiques d'approfondissement

## IV

1 Fiches thématiques	107
2 Fiches-guides de TD	108
3 Guides méthodologiques	109
4 Fils d'Ariane pédagogiques	110

La quatrième partie de ce guide est consacrée à la présentation d'une série d'activités pédagogiques d'approfondissement des notions présentées dans les seconde et troisième parties.

A ce stade l'élève est devenu très autonome et est souvent capable de naviguer seul dans les ressources qui sont à sa disposition. A l'instar de ce qui a été fait dans la troisième partie, nous passerons brièvement en revue ces ressources, en fournissant quelques indications sur leur contenu.

Sur le plan conceptuel, les trois plus grandes difficultés que l'on peut introduire dans cette étape de la formation concernent les études d'intégration thermique par la méthode du pincement, la création des classes externes et les aspects dimensionnement technologique et étude du comportement en régime non-nominal. Pour le reste, il s'agit surtout d'étudier des cycles plus complexes que ceux qui ont été vus auparavant.

## A. 1 Fiches thématiques

Les fiches thématiques des systèmes suivants peuvent être étudiées à ce stade.

*Installations de cogénération et de trigénération*<sup>96</sup>

*Piles à combustible*<sup>97</sup>

*Cycles nucléaires à haute température (HTR)*<sup>98</sup>

*Centrales nucléaires à Eau Pressurisée (REP)*<sup>99</sup>

96 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cogeneration>

97 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/piles-combustible>

98 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-nuclaires-haute>

99 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/centrales-nuclaires-eau>

**Cycles au CO<sub>2</sub> supercritique pour réacteurs nucléaires HTR** <sup>100</sup>

**Cycle de turbine à gaz à air humide HAT** <sup>101</sup>

**Cycle de Kalina** <sup>102</sup>

**Cycles à oxycombustion** <sup>103</sup> (Oxy-fuel, Water cycle, Graz, Matiant, AZEP, CLC)

**Cycles de réfrigération à absorption** <sup>104</sup>

**Cryogénie** <sup>105</sup>

## B. 2 Fiches-guides de TD

Les fiches-guides de TD suivantes peuvent être étudiées à ce stade.

### FG7 Oxycombustion (AZEP)

*Sujet seul*<sup>106</sup>

*Complet avec corrigé*<sup>107</sup>

Cette fiche-guide présente un cycle de capture du CO<sub>2</sub> par oxycombustion appelé cycle AZEP pour Advanced Zero Emission Power. Elle a été préparée en partenariat avec l'EPFL.

Elle fait appel à trois classes externes, "MIEC\_Inlet", "MIEC" et "ColdBattery".

### FG11 Optimisation des cycles combinés par la méthode du pincement

*Sujet et corrigé*<sup>108</sup>

L'objectif du TD est d'étudier la mise en œuvre de la méthode du pincement pour l'optimisation de centrales électriques à cycle combiné et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec Thermoptim. Pour pouvoir faire ce TD, il est nécessaire que vous ayez accès à la version Professionnelle ou Industrielle de Thermoptim.

### FG12 Trigénération par micro turbine à gaz et cycle à absorption

*Sujet et corrigé*<sup>109</sup>

Cette fiche guide explique comment modéliser une installation de trigénération, le cycle à absorption étant à simple effet

### FG13 Absorption du CO<sub>2</sub> dans du méthanol

*Sujet et corrigé*<sup>110</sup>

Cette fiche guide permet d'étudier la capture du CO<sub>2</sub> dans une centrale électrique par absorption dans du méthanol, et de montrer comment on peut la modéliser de manière réaliste avec Thermoptim

100 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-moteur-au-co2>

101 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-hat>

102 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-kalina>

103 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-graz>

104 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-absorption>

105 - <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cryogenie>

106 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-sujet-fg7>

107 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-fg7>

108 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-fg11-sur>

109 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-fg12-sur>

110 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-td-sur>

## FG20 Modélisation et pilotage d'un moteur Diesel

### *Avec corrigé*<sup>111</sup>

L'objectif de ce travail est de reprendre la modélisation du moteur Diesel qui fait l'objet de la *séance Diapason S38*<sup>112</sup>, puis de présenter la manière dont peut être construit un *pilote externe*<sup>113</sup> pour automatiser le paramétrage du cycle.

## FG21 Extraction d'air au condenseur par éjecteurs d'un système propulsif à vapeur de la Marine Marchande

### *Sujet seul*<sup>114</sup>

### *Complet avec corrigé*<sup>115</sup>

L'objectif de ce travail est de faire découvrir aux élèves la technologie et le fonctionnement d'installations de maintien du vide dans des condenseurs de cycles de propulsion à vapeur. Auteurs : R. Gicquel, P. Y. Larrieu.

## C. 3 Guides méthodologiques

### 3.1 Optimisation systémique par la méthode du pincement

*L'intégration thermique, ou méthode du pincement*<sup>116</sup>, est une méthode relativement récente (elle date des années 80) qui permet de déterminer le réseau d'échangeurs et d'utilités le plus performant dans une installation énergétique ou une usine de procédés. Elle est basée sur des principes thermodynamiques et sur l'étude des échanges thermiques entre les fluides à refroidir (disponibilités) et à réchauffer (besoins).

### 3.2 Analyses exergetiques

L'exergie ayant été introduite uniquement pour étudier les cycles simples, il peut être opportun d'effectuer un approfondissement de cette notion, et de voir comment elle peut en particulier être mise en œuvre pour générer des *structures productives*<sup>117</sup> et automatiser l'établissement des bilans exergetiques.

### 3.3 Extensions de Thermoptim

L'interfaçage de Thermoptim avec des classes (éléments de code Java) externes permet à des utilisateurs de pouvoir définir leurs propres éléments ou leurs propres corps et facilite l'inter-opérabilité du progiciel avec l'extérieur, notamment avec d'autres applications développées sous Java.

Au cours de la deuxième étape de leur formation (troisième partie de ce guide), les élèves ont appris comment utiliser des classes externes, mais pas à les *concevoir*<sup>118</sup>. Cette activité, qui ouvre de nombreuses possibilités, suppose une certaine connaissance du développement informatique avec le langage Java. L'ensemble des étapes qui permettent de créer de nouvelles classes externes est documenté, mais il est dans toute la mesure du possible préférable que les élèves intéressés soient accompagnés par un encadrant informaticien en complément de leur enseignant en thermodynamique.

111 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-fg20>

112 - [../sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s38-exercice](http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s38-exercice)

113 - [../sections/logiciels/thermoptim/documentation/manuel-reference-tome-4/switchLanguage/fr](http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/documentation/manuel-reference-tome-4/switchLanguage/fr)

114 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiche-guide-fg21>

115 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/corriges/fiche-guide-td-fg21-corr>

116 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/optimisation-systemique>

117 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/analyses-exergetiques/structures-productives>

118 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/extensions-thermoptim>

### 3.4 Etudes de dimensionnement technologique et de régime non nominal

Les études de *dimensionnement technologique et de régime non nominal*<sup>119</sup> [3] constituent un dernier domaine particulièrement intéressant, mais assez difficile, réservé à des élèves ayant à la fois de bonnes compétences en énergétique et familiers avec la création de pilotes externes.

Deux des fils d'Ariane présentés dans la section suivante montrent concrètement comment aborder ces questions.

## D. 4 Fils d'Ariane pédagogiques

La notion de fil d'Ariane est issue de la mythologie grecque. Ariane, fille du roi de Crète Minos, aida Thésée à s'échapper du célèbre Labyrinthe où était enfermé le Minotaure, en lui donnant un fil qu'il dévida derrière lui pour en parcourir les couloirs sans revenir sur ses pas, et trouver ainsi l'unique sortie.

Dans notre contexte, le labyrinthe est bien entendu un domaine de la thermodynamique appliquée dans lequel les élèves ont du mal à se situer et à s'orienter, et le fil d'Ariane est une présentation progressive destinée à leur en faciliter la compréhension phénoménologique, sur les plans à la fois qualitatif et quantitatif.

Ils s'adressent en premier lieu aux enseignants, à qui ils peuvent servir de guide pour la préparation de leurs enseignements, mais aussi directement à des élèves suffisamment autonomes pour travailler par eux-mêmes.

Les fils d'Ariane commencent par une carte de connaissances présentant les principaux sujets qui y sont abordés, et se poursuivent par un enchaînement d'explications, des plus simples aux plus avancées, avec illustration par des exemples concrets.

Bien que pour partie redondants avec d'autres pages du portail, notamment les fiches thématiques, ils en sont complémentaires car leur ambition est d'aborder de manière à peu près complète un aspect du domaine traité, en parcourant les différents jalons pédagogiques nécessaires à sa compréhension, tout en représentant un volume de travail raisonnable en pratique.

Même si elle n'a pas été initialement conçue sur le modèle d'une fiche d'Ariane, la *page sur les Notions fondamentales et l'approche qualitative des principes*<sup>120</sup> s'en inspire beaucoup. C'est pourquoi elle est aussi publiée en tête de cette rubrique.

Par exemple, le fil d'Ariane sur les *échangeurs de chaleur monophasiques*<sup>121</sup> traite in extenso un exemple d'échangeur simple, depuis son équilibrage enthalpique jusqu'à son dimensionnement géométrique et son utilisation en régime non-nominal, mais en se limitant aux seules notions nécessaires à la compréhension de cet exemple.

Un troisième fil d'Ariane sur les *compresseurs volumétriques*<sup>122</sup> détaille le dimensionnement et le calcul en régime non-nominal d'un compresseur à piston servant à alimenter un réservoir de stockage d'air comprimé.

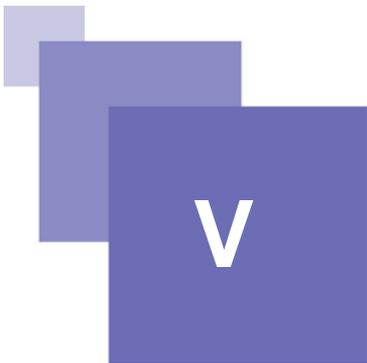
119 - <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/dimensionnement>

120 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/pedagogie/fils-d-ariane/notions-fondamentales>

121 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/pedagogie/fils-d-ariane/fil-echangeur>

122 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/pedagogie/fils-d-ariane/fil-compr-volum>

# Cinquième partie : présentation allégée des cycles thermodynamiques



V

1 Architecture des machines étudiées	112
2 Quatre fonctions élémentaires	115
3 Notions de système thermodynamique et d'état	115
4 Echanges d'énergie entre un système thermodynamique et l'environnement	116
5 Conservation de l'énergie : premier principe de la thermodynamique	116
6 Application aux quatre fonctions élémentaires identifiées précédemment	118
7 Evolutions de référence	119
8 Rappels succincts sur les propriétés des corps purs	120
9 Retour sur la notion d'état, choix des variables d'état à considérer	120
10 Diagrammes thermodynamiques	121
11 Représentation graphique de cycles dans le diagramme (h, ln(P))	123
Conclusion	128

Nous parlons de présentation pédagogique allégée car nous cherchons à limiter le plus possible le bagage en mathématique et physique nécessaire à la compréhension des cycles, notre objectif étant de les rendre accessibles à des lecteurs peu familiers avec le langage des spécialistes de la thermodynamique. Nous montrons en particulier que l'on peut tout à fait présenter l'essentiel des notions sans faire appel à une grandeur qui peut être difficile à bien maîtriser, l'entropie.

## A. 1 Architecture des machines étudiées

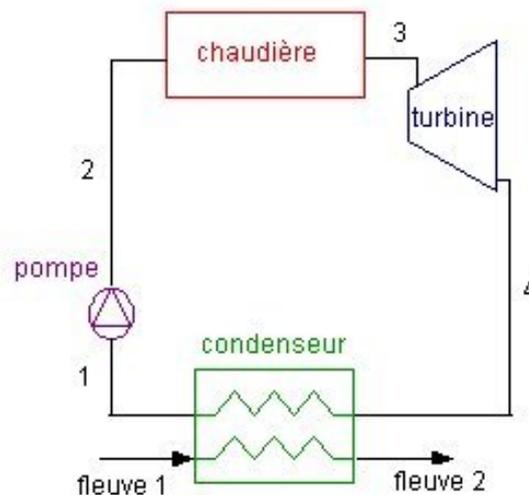
### 1.1 Centrale à vapeur

Le cycle de base d'une centrale à vapeur consiste essentiellement en une chaudière où le combustible (solide, liquide ou gazeux) est brûlé générant ainsi de la vapeur (en général surchauffée) qui est ensuite détendue dans une turbine à vapeur dont l'arbre fournit le travail moteur (figure ci-dessous).

La vapeur sortant de la turbine est totalement liquéfiée (eau) dans un condenseur avant qu'une pompe ne lui redonne la pression de chaudière. L'eau étant comprimée à l'état liquide, le travail de compression est quasiment négligeable devant le travail récupéré sur l'arbre de la turbine.

Le refroidissement du condenseur est assuré par une source froide externe, généralement l'air extérieur ou l'eau d'un fleuve ou de mer, comme indiqué figure ci-dessous.

### Schéma d'une centrale à vapeur



*Schéma d'une centrale à vapeur*

La pompe est généralement du type centrifuge, multiétagée car elle doit réaliser un haut rapport de compression.

La chaudière remplit trois fonctions successives et se comporte donc comme un triple échangeur. Elle doit :

- chauffer l'eau d'alimentation pressurisée jusqu'à la température de vaporisation à la pression correspondante ;
- vaporiser l'eau ;
- et enfin la surchauffer à la température désirée.

Les turbines à vapeur sont pour la plupart des turbines axiales multiétagées.

Le condenseur est un échangeur dont la particularité est de travailler en dépression par rapport à l'atmosphère, compte tenu de la faible tension de vapeur de l'eau à la température ambiante

On parle de cycle parce que, parcourant successivement les quatre composants de la centrale, le fluide de travail subit une série de transformations qui l'amènent à se retrouver dans son état initial.

Plus précisément, il s'agit d'un cycle à combustion externe, permettant d'utiliser une grande variété de combustibles (dont l'uranium). Dans la plupart des pays, plus de 90 % du parc des centrales thermiques était jusqu'à récemment composé de telles centrales.

## 1.2 Turbine à gaz

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue (figure ci-dessous), la turbine à gaz est composée de trois éléments :

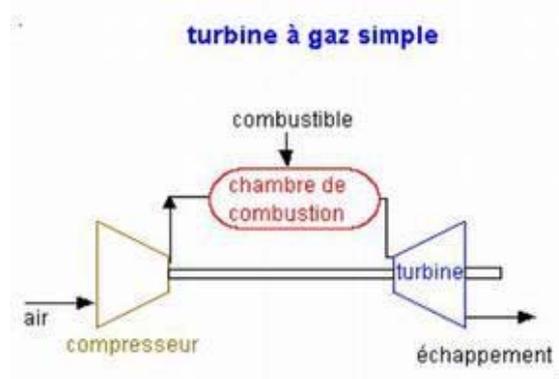
- un compresseur, généralement centrifuge ou axial, qui sert à comprimer l'air ambiant à une pression comprise dans les machines modernes entre 10 et

30 bar environ ;

- une chambre de combustion, dans laquelle un combustible injecté sous pression est brûlé avec l'air préalablement comprimé (ce dernier en fort excès afin de limiter la température des gaz brûlés en entrée de la turbine) ;
- une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz à haute température sortant de la chambre de combustion. Une partie significative (60 à 70 %) du travail récupéré sur l'arbre de la turbine sert à entraîner le compresseur.

Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un moteur à combustion interne à flux continu. On notera que le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide thermodynamique, qui reste toujours gazeux, et non du combustible utilisé, qui peut être aussi bien gazeux que liquide (les turbines à gaz utilisent généralement du gaz naturel ou des distillats légers comme du gazole).

Pour atteindre des taux de compression de 20 ou 30, le compresseur est multiétagé, avec parfois une réfrigération intermédiaire destinée à réduire le travail consommé.



*Schéma d'une turbine à gaz*

La chambre de combustion est normalement construite en alliage réfractaire.

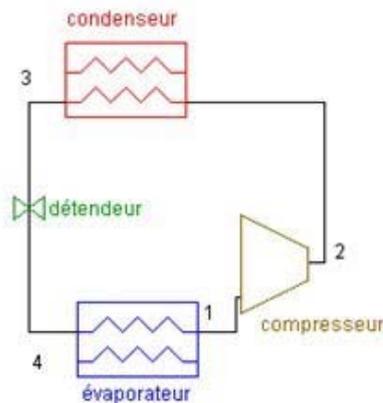
Les principales contraintes technologiques se situent au niveau des premiers étages de la turbine de détente, qui sont soumis au flux des gaz d'échappement à très haute température. Les pièces les plus exposées sont en particulier les aubages du rotor, qui sont très difficiles à refroidir et, de plus, particulièrement sensibles à l'abrasion. Il importe donc d'utiliser un combustible très propre (absence de particules et de composants chimiques susceptibles de former des acides), et de limiter la température en fonction des caractéristiques mécaniques des aubages.

Les gaz étant rejetés dans l'atmosphère, il est impropre de parler de cycle. On le fait cependant par abus de langage.

### 1.3 Machine de réfrigération

Dans une installation de réfrigération (figure ci-dessous), on cherche à maintenir une enceinte froide à une température inférieure à l'ambiante. Le principe consiste à évaporer un fluide frigorigène à basse pression (et donc basse température), dans un échangeur en contact avec l'enceinte froide. Pour cela, il faut que la température du fluide frigorigène soit inférieure à celle de l'enceinte froide. Le fluide est ensuite comprimé à une pression telle que sa température de condensation soit supérieure à la température ambiante. Il est alors possible de refroidir le fluide par échange thermique avec l'air ambiant ou l'eau d'un fleuve ou de mer, jusqu'à ce qu'il devienne liquide. Le liquide est ensuite détendu à la basse pression dans une vanne, sans production de travail, et dirigé dans l'évaporateur. Le cycle est ainsi refermé.

**Schéma d'un cycle frigorifique à compression**



*Schéma d'un machine de réfrigération*

L'évaporateur est généralement, dans un réfrigérateur domestique, formé de deux plaques planes corruguées soudées l'une contre l'autre, le fluide frigorigène circulant dans les canaux formés par les corrugations. Il tapisse le plus souvent le compartiment « congélation » du réfrigérateur (c'est sur lui que se forme la couche de givre). La plaque entre les canaux de passage du fluide sert d'ailette pour augmenter le contact thermique entre le fluide frigorigène et le compartiment froid. Cet évaporateur est relié au reste de la machine par deux canalisations qui traversent la paroi isolante. L'une d'entre elles est connectée à l'aspiration du compresseur, l'autre au détendeur.

Le condensateur est la grille noire située sur la face postérieure du réfrigérateur, constituée d'un tuyau enroulé en serpentin et étayé par des plaques métalliques qui d'une part augmentent les échanges thermiques avec l'air, et d'autre part renforcent la rigidité mécanique. Il est relié à la sortie du compresseur et au détendeur.

Le plus souvent, le compresseur n'est pas directement visible car il est contenu dans un bloc métallique monté sur des coussins en caoutchouc, pour éviter les vibrations, d'où sortent un fil électrique et deux tuyaux d'entrée et sortie du fluide. Il s'agit d'un compresseur dit hermétique, à piston, qui présente l'avantage que le moteur est directement refroidi et lubrifié par le fluide thermodynamique, ce qui permet de se passer d'huile.

Le détendeur est généralement constitué d'un simple tube capillaire, et quelquefois il s'agit d'un détendeur thermostatique.

**B. 2 Quatre fonctions élémentaires**

Ces machines sont toutes les trois traversées par des fluides thermodynamiques, de l'eau sous forme liquide ou vapeur dans la première, de l'air et des gaz brûlés dans la seconde, un réfrigérant dans la troisième.

Ce qui est particulièrement remarquable, c'est que, même si les solutions techniques mises en œuvre sont très variées comme nous avons pu le voir, ces fluides ne sont soumis qu'à quatre types de transformations distinctes :

- des compressions ;
- des détente avec production de travail ;
- des détente sans production de travail ;
- des changements de température (échauffements et refroidissements).

Quatre fonctionnalités seulement suffisent ainsi à décrire le fonctionnement de ces

machines.

- les compressions peuvent être réalisées le fluide étant liquide ou gazeux. Dans le premier cas le composant est une pompe, dans le second un compresseur ;
- les détentes avec production de travail sont généralement réalisées dans des turbines ;
- les détentes sans production de travail prennent place dans des vannes ou détenteurs ;
- les échauffements peuvent être effectués soit dans des chambres de combustion ou des chaudières, soit dans des échangeurs de chaleur. Les refroidissements se font généralement dans des échangeurs de chaleur.

Ce constat a une portée très générale : dans tous les moteurs, le fluide qui circule est successivement comprimé, chauffé, détendu et refroidi, et, dans toutes les machines réceptrices, il est comprimé, refroidi, détendu et chauffé.

Notons enfin, et ceci est très important en pratique, que l'écoulement des fluides qui traversent ces composants s'effectue soit de manière cyclique dans les turbines, pompes et compresseurs, soit en continu dans les autres.

Dans ce qui suit, nous montrerons comment caractériser ces transformations sur le plan thermodynamique. Pour cela nous nous intéresserons à une petite quantité de fluide et nous chercherons à déterminer l'évolution de ses propriétés thermodynamiques au cours de ces transformations. Sur le plan pratique, il suffit de connaître ce que l'on appelle son état à l'entrée et à la sortie des composants pour en déduire les performances de la machine complète.

### C. 3 Notions de système thermodynamique et d'état

Il est à ce stade nécessaire d'introduire la notion de **système thermodynamique**, qui représente une telle quantité de matière isolée de ce que l'on appelle l'environnement par une frontière réelle ou fictive. Cette notion de système est très générale en physique et se retrouve notamment en mécanique.

La notion d'**état d'un système** représente "l'information minimale nécessaire à la détermination de son comportement futur". Cet état est défini par ce que l'on appelle un jeu de variables d'état permettant de complètement caractériser ce système à un instant donné.

En mécanique, les grandeurs de position et la vitesse déterminent l'état d'un système.

Pour la thermodynamique, il existe bien évidemment plusieurs ensembles répondant à cette définition. Les plus utilisés dans la littérature sont les couples suivants : (pression, température), (pression, volume), (température, volume).

Une **fonction d'état** est une grandeur dont la valeur ne dépend que de l'état du système, et non pas de son histoire.

En thermodynamique, on est plus précisément amené à distinguer deux types de systèmes : les **systèmes fermés**, qui n'échangent pas de matière avec l'environnement, et les **systèmes ouverts** qui en échangent.

La présentation qui a été faite précédemment du fonctionnement des composants qui interviennent dans les machines que nous désirons étudier a montré qu'ils opèrent en système ouvert, étant tous traversés par des fluides.

Cette distinction est importante car les propriétés thermodynamiques ne s'expriment pas de la même manière en système fermé et en système ouvert.

## D. 4 Echanges d'énergie entre un système thermodynamique et l'environnement

Il est fondamental de bien noter que les systèmes thermodynamiques mis en jeu dans les composants qui nous intéressent n'échangent de l'énergie avec l'environnement que sous deux formes bien distinctes :

- de la chaleur, par échange thermique aux frontières du système. Elle est généralement notée  $Q$  ;
- du travail, par action des forces de pression sur ces frontières, le travail des forces de pesanteur pouvant être négligé. Ce travail est généralement noté  $W$  en système fermé, et  $\tau$  en système ouvert.

On peut par ailleurs assez facilement montrer que, pour une évolution élémentaire, en système ouvert,  $\tau$  et  $Q$  sont donnés par les expressions suivantes :

$$\delta\tau = v \, dP$$

$$\delta Q = C_p \, dT - v \, dP$$

Cette dernière relation exprime simplement un fait expérimental essentiel, base de la thermodynamique des fluides compressibles : la chaleur  $\delta Q$  échangée avec l'extérieur se traduit par une modification linéaire de l'état thermodynamique du système.

## E. 5 Conservation de l'énergie : premier principe de la thermodynamique

La loi fondamentale qui gouverne le comportement des systèmes thermodynamiques est celle de la conservation de l'énergie, connue sous le nom de premier principe.

Elle s'exprime, pour un système fermé, sous la forme suivante : l'énergie contenue dans un système isolé ou qui évolue selon un cycle fermé reste constante, quelles que soient les transformations qu'il subit. Les différentes formes que peut prendre l'énergie d'un système : énergie mécanique, énergie calorifique, énergie potentielle, énergie cinétique... sont ainsi toutes équivalentes entre elles au sens du premier principe. Dans notre cas rappelons-le, seuls la chaleur et le travail seront pris en compte.

Appelant  $W$  le travail des forces de pression extérieures et  $Q$  la chaleur échangée avec l'environnement et en négligeant les énergies cinétiques mises en jeu, le premier principe peut s'écrire pour un système fermé sous la forme :

$$\Delta u = W + Q$$

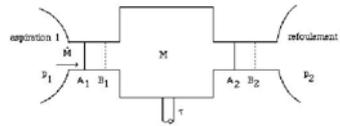
$u$  est une grandeur appelée énergie interne massique du système. C'est une fonction d'état.

Sous cette forme, cette loi est très intuitive et facilement acceptée par les élèves : c'est une loi de conservation qui stipule que l'énergie ne se perd ni se crée, tout comme la masse.

L'énergie interne n'a cependant de sens que si le système est fermé, et demande à être généralisée lorsqu'on s'intéresse à un système cyclique dans lequel entre et/ou d'où sort de la matière.

Le principe du raisonnement consiste à suivre l'évolution d'un volume de contrôle fermé, et à calculer le travail des forces externes qui s'exerce pendant un cycle sur l'ensemble de ses frontières, en distinguant les sections de passage des fluides (A1

et A2 au temps  $t_0$ , devenant B1 et B2 au temps  $t_0 + \Delta t$  dans la figure ci-dessous), les parois fixes, qui bien évidemment ne produisent ni ne reçoivent aucun travail, et les parois mobiles, au niveau desquelles s'exerce un certain travail  $\tau$  que l'on appelle "**travail utile**".



*Machine en régime périodique*

On peut montrer que, pour des machines cycliques, ce qui est bien le cas de celles qui interviennent dans les cycles que nous étudions, ce travail appelé travail de transvasement, est égal à  $-\Delta(Pv)$ .

On a donc  $W = \tau - \Delta(Pv)$

En faisant apparaître une **grandeur h appelée enthalpie** telle que  $\Delta h = \Delta u + \Delta(Pv)$ , le premier principe s'écrit, en système ouvert :

$$\Delta h = \tau + Q$$

La généralisation du premier principe aux systèmes ouverts s'exprime sous la forme suivante : la variation d'enthalpie d'un système ouvert est égale à la somme du travail utile s'exerçant sur les parois mobiles et de la chaleur échangée avec l'extérieur.

L'enthalpie apparaît ainsi simplement comme la généralisation aux systèmes ouverts de l'énergie interne pour les systèmes fermés. Sur le plan pratique, c'est bien ainsi qu'il suffit de considérer cette fonction d'état : il s'agit de l'énergie associée au système considéré, ni plus ni moins.

Notons que dans cette présentation, nous avons commencé par énoncer le premier principe en système fermé, considérant que les élèves en avaient déjà entendu parler. Si ce n'est pas le cas, il est possible de directement l'énoncer en système ouvert.

## F. 6 Application aux quatre fonctions élémentaires identifiées précédemment

Nous allons montrer dans cette section que la variation d'enthalpie du fluide qui les traverse suffit pour déterminer l'énergie mise en jeu dans ces quatre transformations élémentaires.

### 6.1 Compressions et détente avec travail

Les détente peuvent être effectuées avec et sans travail. Dans le premier cas, la machine la plus généralement utilisée est la turbine. Dans le second cas, il s'agit d'une simple vanne ou d'un filtre, dont l'étude est faite section 6.2.

Les machines réalisant la compression ou la détente d'un fluide ont une conception très compacte pour des raisons de poids, d'encombrement et de coût. Pour les mêmes raisons, elles tournent très vite (plusieurs milliers de tours par minute). Chaque parcelle de fluide y séjourne très peu de temps.

Par ailleurs, les fluides mis en jeu dans les compresseurs et turbines sont très souvent des gaz dont les coefficients d'échange thermique ont des valeurs faibles.

Les courts temps de séjour, les petites surfaces de contact fluide-paroi, et les faibles coefficients d'échange font que l'échange de chaleur est minime et que le

fonctionnement de ces machines est pratiquement adiabatique :  $Q = 0$ .

Dans une machine adiabatique de compression ou détente, le travail utile  $\tau$  est donc égal à la variation d'enthalpie du fluide  $\Delta h$ .

### 6.2 Détentes sans travail : vannes, filtres

---

Il existe une classe d'appareils, comme le détendeur de la machine de réfrigération, où  $\tau$  et  $Q$  sont nuls tous les deux, ainsi donc que  $\Delta h$  : ce sont les détendeurs statiques tels que vannes, filtres... La transformation correspondante s'appelle un laminage isenthalpique.

### 6.3 Echanges de chaleur

---

Les composants appelés à transférer de la chaleur d'un fluide à un autre nécessitent de grandes surfaces d'échange, les flux thermiques leur étant proportionnels. Des considérations techniques et économiques amènent à adopter des dispositifs purement statiques. Par exemple, de grands faisceaux de tubes en parallèle, parcourus intérieurement par un fluide pendant que l'autre circule à l'extérieur.

$\tau$  est alors nul en raison de l'absence de parois mobiles.

Lors d'un échange de chaleur, la chaleur  $Q$  cédée ou fournie par un fluide à l'autre est donc égale à sa variation d'enthalpie  $\Delta h$ .

### 6.4 Chambres de combustion, chaudières

---

Dans une chambre de combustion ou une chaudière, il n'y a pas non plus de parois mobiles, et  $\tau = 0$ .

La chaleur  $Q$  cédée au fluide qui la traverse est égale à sa variation d'enthalpie  $\Delta h$ .

## G. 7 Evolutions de référence

La section précédente a montré que la détermination de la variation d'enthalpie du fluide qui les traverse suffit pour calculer l'énergie mise en jeu dans ces quatre transformations élémentaires.

Mais cette information n'est pas suffisante pour les caractériser complètement. L'analyse physique de leur comportement permet de mettre en évidence les évolutions de référence correspondant au fonctionnement de composants qui seraient parfaits.

Il est ensuite possible de caractériser la transformation réelle en introduisant un facteur d'imperfection, souvent appelé rendement ou efficacité, qui exprime ses performances par rapport à celle de l'évolution de référence. Cette manière de faire facilite grandement la compréhension des transformations subies par les fluides.

Le choix des évolutions de référence est basé sur l'analyse physique des phénomènes qui prennent place dans les composants : il s'agit d'un choix de modélisation tout à fait essentiel.

Enfin, comme nous le verrons section 10, l'évolution de référence se révèle très utile lorsque l'on cherche à représenter graphiquement le cycle étudié dans un diagramme thermodynamique.

### 7.1 Compressions et détentes avec travail

---

Nous avons vu section 6.1 que les compresseurs et turbines sont des machines

dont les échanges de chaleur avec l'extérieur sont généralement négligeables, que l'on qualifie d'adiabatiques. L'évolution de référence pour une compression ou détente avec travail est donc l'adiabatique parfaite ou réversible (nous qualifierons pour le moment de réversible une transformation sans échange de chaleur avec l'extérieur et sans pertes par frottement). Son équation peut être obtenue en intégrant l'équation différentielle exprimant que la chaleur échangée est nulle à tout moment, soit  $0 = C_p dT - v dP$ . Pour un gaz parfait, pour lequel  $Pv = rT$ , la courbe correspondante s'obtient très facilement. Elle est donnée par la loi  $Pv^\gamma = Cste$ , avec  $\gamma = C_p/C_v$ .

## 7.2 Détentes sans travail : vannes, filtres

Une détente sans travail ou laminage conservant l'enthalpie ( $\Delta h=0$ ), l'évolution de référence est l'isenthalpique.

## 7.3 Echanges de chaleur

En première approximation, les échanges thermiques peuvent être supposés isobares, les pertes de charge étant relativement faibles. L'évolution de référence est donc l'isobare.

## 7.4 Chambres de combustion, chaudières

De la même manière, les chambres de combustion et les chaudières peuvent généralement être considérées comme isobares. La combustion a donc lieu à pression constante, ce qui surprend toujours un certain nombre d'élèves, convaincus que la combustion élève la pression, même en système ouvert.

Pour illustrer ce propos, considérons un exemple assez répandu de chaudière : la chaudière au gaz murale d'un appartement. La pression y demeure la même dans chacun des deux fluides, que ce soit le circuit d'eau chaude à une pression de 1 à 3 bars, ou le circuit d'air et des fumées, bien évidemment à la pression atmosphérique...

# H. 8 Rappels succincts sur les propriétés des corps purs

Rappelons qu'un corps pur peut se présenter sous l'une ou plusieurs des trois phases solide, liquide ou gazeuse. Lorsqu'on chauffe un liquide à pression constante bien choisie, il se transforme en vapeur, et on parle de vaporisation. La température à laquelle cette transformation se réalise dépend de la pression exercée sur le corps considéré. Elle reste constante tant que la vaporisation n'est pas complète, c'est-à-dire tant que le titre  $x$  est compris entre 0 et 1. Rappelons qu'on appelle titre  $x$  d'un mélange diphasique d'un corps pur le rapport de la masse de vapeur à la masse totale (vapeur + liquide).

Pour que ce changement de phase puisse se réaliser, il est nécessaire de fournir ou de retirer de l'énergie, appelée chaleur latente de changement d'état. Au cours de la vaporisation, on observe des variations importantes du volume spécifique, la vapeur étant de l'ordre de 600 à 1000 fois moins dense que le liquide. Cette modification de volume spécifique se fait à pression et température constantes.

Le point critique représente l'état où la phase de vapeur pure a les mêmes propriétés que la phase de liquide pur. A des températures et pressions plus élevées (supercritiques), il n'est pas possible d'observer une séparation entre les phases liquide et gazeuse : le ménisque de surface qui sépare les phases liquide et vapeur disparaît au point critique.

On appelle gaz idéal un gaz dont l'énergie interne et l'enthalpie ne dépendent que de la température, ce qui permet de simplifier sa modélisation : son équation d'état est  $Pv = rT$ .

Beaucoup de fluides thermodynamiques en phase vapeur peuvent être assimilés à des gaz idéaux, dans un large domaine de températures et de pressions. Il faut notamment que la combinaison température-pression s'écarte suffisamment de la zone de condensation possible (c'est-à-dire que la pression ne soit pas "trop" élevée, ni la température "trop" basse). De telles conditions sont couramment réalisées pour des gaz dits "permanents" tels que, à pression et température ambiantes, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le mélange oxygène-azote qui constitue l'air sec...

## I. 9 Retour sur la notion d'état, choix des variables d'état à considérer

Maintenant que nous avons introduit le premier principe, établi son expression enthalpique et montré combien simplement il s'applique aux quatre évolutions élémentaires que subissent les fluides dans les machines qui nous intéressent, nous pouvons discuter des avantages et inconvénients des différentes variables d'état que l'on peut envisager utiliser.

Nous avons vu qu'il existe plusieurs jeux de variables d'état pouvant servir à caractériser un système thermodynamique. Les plus « naturelles » sont la température, la pression et le volume, mais d'une part il en existe d'autres, comme l'enthalpie que nous venons de définir, et d'autre part elles ne sont pas pleinement satisfaisantes compte tenu de nos objectifs, comme nous allons le montrer.

La pression  $P$  est fondamentale, à la fois parce qu'elle intervient directement dans les contraintes mécaniques auxquelles sont soumis les composants, et parce que, comme nous l'avons vu, l'évolution de référence pour les échauffements et refroidissements de fluide est l'isobare.

La température  $T$  est elle aussi essentielle, mais, à la différence de la précédente, l'isotherme ne correspond à aucune des évolutions qui nous intéressent.

Par ailleurs, le couple  $(P, T)$  ne suffit pas à représenter l'évolution subie par un fluide lorsqu'il change d'état, les deux variables étant liées par la loi de pression ou température saturante : il manque le titre en vapeur  $x$ .

Le volume  $v$  n'intervient que très peu dans les analyses qui nous intéressent, même en système fermé, car l'existence de parois mobiles fait que le volume change. En fait, son principal intérêt pratique est de permettre le dimensionnement des sections de passage.

L'enthalpie  $h$  est une variable fondamentale elle aussi, car elle est directement liée aux échanges d'énergie qui prennent place dans les machines. Pour les gaz parfaits, c'est une fonction affine de la température, qui s'en déduit donc très facilement.

Pour les fluides réels, dans la zone d'équilibre liquide-vapeur, elle fournit de surcroît l'information sur le titre. Enfin, rappelons que l'isenthalpe est l'évolution de référence d'une détente sans travail.

Pour nos besoins actuels, dans le cadre de cette présentation pédagogique allégée, ces analyses suffisent pour nous permettre de conclure que le couple  $(P, h)$  constitue un jeu de variables d'état particulièrement intéressant. Nous en verrons les implications lorsque nous chercherons à représenter graphiquement les cycles des machines que nous étudions, c'est-à-dire leurs évolutions dans des diagrammes thermodynamiques.

L'analyse des transformations subies par les fluides lors des compressions et détente avec travail nous a montré que l'évolution de référence est l'adiabatique réversible, dont nous avons indiqué qu'elle suit pour un gaz parfait la loi  $P v^{\gamma} = \text{Cste}$ .

Signalons en passant, mais sans insister compte tenu de notre souci de simplicité, que cette loi est celle de l'isentropique. L'entropie  $s$  est elle aussi une fonction d'état très utilisée en thermodynamique, notamment parce que l'isentropique est l'évolution de référence en matière de compression et détente.

## J. 10 Diagrammes thermodynamiques

Les systèmes thermodynamiques auxquels nous nous intéressons peuvent être caractérisés par la donnée de deux variables d'état : on dit qu'ils sont bivariants. Cela signifie que leurs propriétés thermodynamiques peuvent être représentées graphiquement dans un plan, sous forme de diagramme thermodynamique.

En mettant en évidence les évolutions de référence des transformations subies par les fluides et en permettant de les calculer, au moins de manière approximative, les diagrammes font partie des outils de base du thermodynamicien. Leur intérêt est double :

- permettre de représenter graphiquement les cycles ;
- faciliter l'estimation de l'état thermodynamique des différents points du cycle.

Du fait des possibilités offertes par les progiciels de calcul des propriétés des fluides qui sont de plus en plus répandus, le second intérêt a tendance à diminuer tandis que le premier conserve toute son actualité. Visualiser sur un diagramme un cycle calculé à l'aide d'un outil informatisé permet notamment de s'assurer qu'il ne comporte pas de point aberrant dû à une erreur lors de l'entrée des données...

Un diagramme se présente sous forme d'un graphique plan comportant le tracé d'un certain nombre de courbes remarquables, notamment des familles d'isovaleurs des fonctions d'état.

### 10.1 Différents types de diagrammes

Sur le plan pratique, les principales transformations que l'on rencontre dans les processus industriels mettant en jeu des fluides purs sont, comme nous l'avons vu, des compressions, des détente, des échanges de chaleur et des laminages.

Il est clair que la température  $T$ , la pression  $P$  et le titre en vapeur  $x$  sont des variables d'état dont la connaissance est nécessaire pour l'étude de ces processus et la conception des équipements.

Les remarques précédentes montrent que l'enthalpie  $h$  est aussi très importante. Enfin, la connaissance du volume massique  $v$  est nécessaire pour dimensionner les conduits, puisque c'est elle qui permet de passer du débit-masse au débit-volume.

En conclusion, les grandeurs les plus intéressantes sur le plan pratique sont  $T$ ,  $P$ ,  $h$ , et des informations complémentaires sur  $x$  et  $v$  peuvent être nécessaires. C'est donc parmi les trois premières que sont choisies les abscisses et les ordonnées des diagrammes que nous pouvons considérer (rappelons que nous excluons ici l'entropie).

Le couple  $(T, h)$  est rarement retenu, car les isobares et les adiabatiques réversibles  $\gamma$  sont représentées par des courbes présentant des points d'inflexion qui en rendent l'usage délicat. De plus, les variations de  $T$  et  $h$  sont proportionnelles lorsque le fluide suit la loi des gaz idéaux.

Sauf pour les gaz permanents, c'est-à-dire dont l'état est très éloigné de leurs

conditions de saturation, le couple (T, P) est insuffisant, car T et P sont liés par la loi de vapeur saturante dans la zone d'équilibre liquide-vapeur. Il serait en revanche tout à fait utilisable pour représenter le cycle de la turbine à gaz.

Le couple (P, h) est de plus en plus employé, généralement avec une échelle logarithmique pour les pressions. Il correspond au diagramme dit « des frigoristes » parce que ce sont eux qui en ont généralisé l'usage, et sera étudié plus loin.

Enfin, le couple (P, v), diagramme de Clapeyron, présente un intérêt pédagogique certain, surtout pour l'étude des transformations en système fermé. Son inconvénient principal est sa faible lisibilité, la zone des vapeurs étant réduite et les fonctions énergétiques n'apparaissant pas directement.

En conclusion, pour cette présentation pédagogique allégée ne faisant pas appel à l'entropie, le couple (P,h) apparaît bien adapté.

### 10.2 Diagramme (h, ln(P)), dit des frigoristes

Dans le diagramme dit des frigoristes (figure ci-dessous), on porte en abscisse l'enthalpie, et en ordonnée la pression, le plus souvent selon une échelle logarithmique.

Son sommet correspond au point critique, la partie gauche, ascendante, représente l'ébullition commençante (courbe de bulle), et sa partie droite, descendante, la vapeur saturée (courbe de rosée). Sous cette courbe se trouve le domaine de l'équilibre diphasique liquide-vapeur, et, dans le reste du plan, celui du fluide simple.

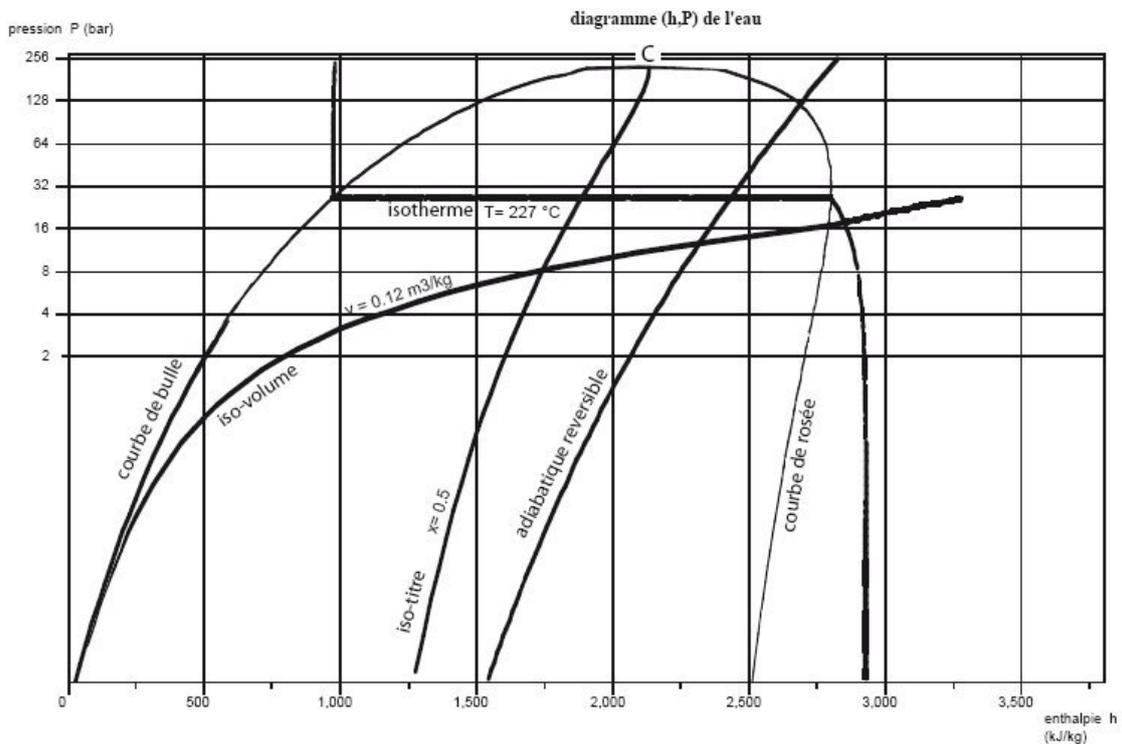


Diagramme (h, ln(P) ) de l'eau

Pour que ce diagramme soit utilisable, on l'équipe avec les adiabatiques réversibles, les isothermes, les isovolumes, et, dans la zone mixte, les courbes d'iso-titre.

Dans la zone "liquide", à gauche du diagramme, les isothermes ont une pente négative très forte : la compression d'un liquide met en jeu un travail très faible.

Dans le domaine diphasique, la pression et la température sont liées par la loi de pression saturante, et les isothermes sont horizontales. L'enthalpie croît

énormément, correspondant à la chaleur latente de vaporisation qu'il faut fournir au fluide.

Dans la zone située à droite de la courbe de vaporisation, les isothermes sont des courbes descendantes, qui se rapprochent de verticales pour les valeurs des faibles pressions. En effet, le comportement de la vapeur se rapproche alors de celui d'un gaz idéal, dont l'enthalpie ne dépend que de la température.

Un échauffement ou un refroidissement (isobare) se traduit dans ce diagramme par un segment horizontal, une détente sans travail (isenthalpique) par un segment vertical.

Une adiabatique réversible est une courbe ascendante dont la pente est égale à l'inverse du volume massique. Elles sont donc beaucoup moins inclinées dans la zone vapeur que dans la zone liquide.

## K. 11 Représentation graphique de cycles dans le diagramme $(h, \ln(P))$

Nous allons maintenant expliquer comment tracer dans le diagramme  $(h, \ln(P))$  les cycles de la centrale à vapeur et de la machine de réfrigération. Nous supposons ici que les compressions et détentes sont parfaites, c'est-à-dire suivent des adiabatiques réversibles.

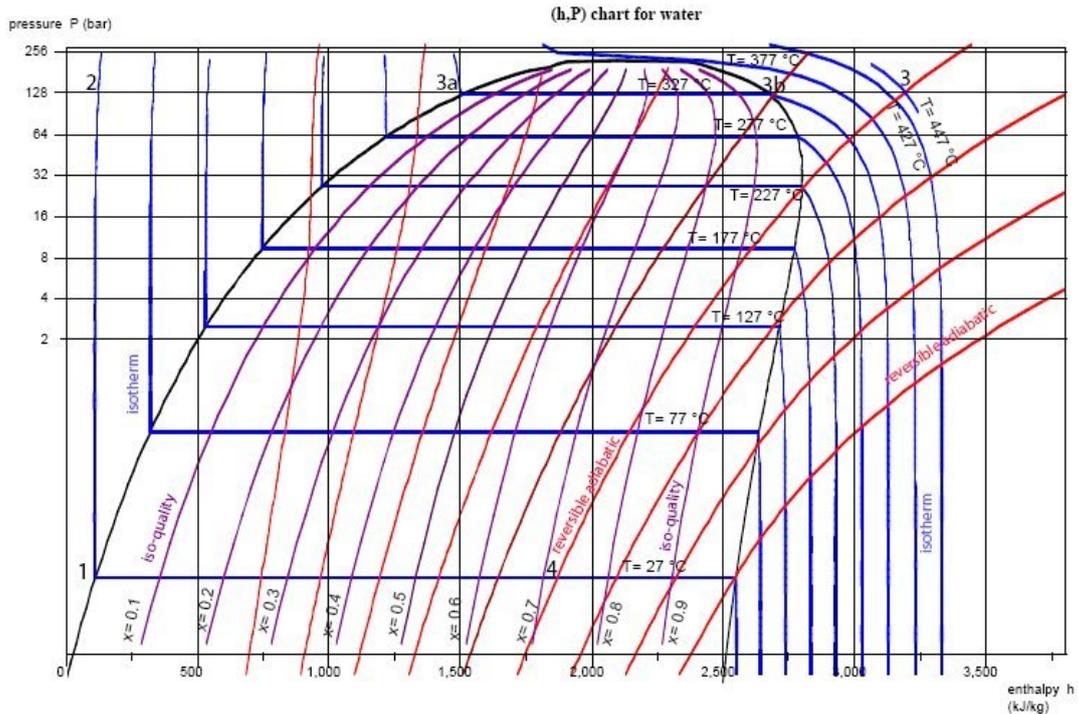
Sur le plan pratique, les activités proposées dans cette section devraient être faites à la main, les élèves disposant de diagrammes sur papier. Ceux-ci peuvent être soit imprimés directement à partir de Thermoptim, mais leur précision n'est pas très grande, soit obtenus dans le commerce ou dans des ouvrages spécialisés.

Nous n'avons pas encore précisé les données numériques relatives à ces cycles. Nous allons le faire maintenant, en choisissant des valeurs facilement représentables, et les construire pas à pas dans ce diagramme.

Nous ne chercherons pas à représenter le cycle de la turbine à gaz pour deux raisons : d'une part parce que les diagrammes  $(h, \ln(P))$  des gaz sont peu utilisés en pratique, et d'autre part parce que l'estimation des propriétés thermodynamiques des produits de combustion demande des précautions particulières. A notre sens il est beaucoup plus simple pour un non spécialiste de directement modéliser la machine avec un outil comme Thermoptim, et le tracé du cycle dans un diagramme ne s'impose pas toujours.

### 11.1 Centrale à vapeur

Au point 1 en sortie de condenseur (figure ci-dessous), l'eau est à l'état liquide, à une température d'environ 27 °C, sous une faible pression (0,0356 bar). Sur la figure, le point est facile à repérer, à l'intersection de l'isotherme  $T = 27$  °C et de la courbe de saturation.



Cycle de centrale à vapeur

La pompe la comprime à environ 128 bar, ce qui représente un rapport de compression considérable (de l'ordre de 3600).

La température  $T$  restant sensiblement constante pendant la compression (1- 2) le point 2 se situe à l'intersection de l'isotherme  $T = 27 \text{ °C}$  et de l'isobare  $P = 128 \text{ bar}$  (horizontale d'ordonnée 128 bar).

L'eau sous pression est ensuite portée à haute température dans la chaudière, l'échauffement comportant les trois étapes suivantes :

- chauffage du liquide de près de  $27 \text{ °C}$  à environ  $330 \text{ °C}$ , juste au-dessus de l'isotherme  $T = 327 \text{ °C}$ , température de début d'ébullition à 128 bar : évolution (2-3a). Le point 3a se trouve sur la courbe de vaporisation cette même isobare ;
- vaporisation à température constante  $330 \text{ °C}$  : évolution (3a-3b). La vaporisation s'effectuant à pression et température constantes, elle se traduit sur le diagramme par un segment horizontal 3a-3b. Le point 3b se trouve donc sur la branche descendante de la courbe de vaporisation, ou courbe de rosée, à son intersection avec la droite horizontale de pression 128 bar ;
- surchauffe de  $330 \text{ °C}$  à  $447 \text{ °C}$  : évolution (3b-3). Le point 3 est encore par hypothèse à la même pression, mais à une température  $T_3$  de  $447 \text{ °C}$ . Il se trouve donc à l'intersection de l'horizontale  $P = 128 \text{ bar}$  et de l'isotherme  $T = 447 \text{ °C}$  (représentée uniquement partiellement sur la figure).

Le point 3 se trouve par ailleurs sur une courbe inclinée à concavité tournée vers le bas correspondant à une adiabatique réversible.

L'évolution (3-4) est une détente adiabatique réversible de 128 bar à 0,0356 bar. Le point étant dans la zone mixte, cette dernière est confondue avec l'isotherme  $T = 27 \text{ °C}$ . Le point 4 est donc à l'intersection de la courbe inclinée à concavité tournée vers le bas et de cette isotherme. Son titre  $x$  est compris entre 0,7 et 0,8. Par interpolation linéaire on peut l'estimer égal à 0,72.

Comme on le voit sur cet exemple, la représentation du cycle dans le diagramme  $(h, \ln(P))$  est très parlante sur le plan physique : les échanges de chaleur,

quasiment isobares, correspondent aux segments horizontaux, et les compressions et les détente sont des adiabatiques réversibles, d'autant moins pentues que l'on s'écarte de la zone liquide.

Les enthalpies des points peuvent être directement lues en projetant ces différents points sur l'axe des abscisses. Le tableau ci-dessous fournit ces valeurs.

point	débit (kg/s)	h (kJ/kg)
1	1	113
2	1	126
3a	1	1524
3b	1	2672
3	1	3189
4	1	1870

Tableau 26 Etat des points du cycle

Les énergies mises en jeu dans chacune des transformations se déduisent par simple différence des enthalpies des points et conduisent au tableau ci-dessous. Notons que la lecture dans ce diagramme du travail de compression est très imprécise et qu'il est préférable de l'estimer à partir de l'intégration de  $\delta \tau = v \, dP$ , très facile à effectuer,  $v$  étant constant. Il vaut donc  $\Delta h = v \, \Delta P$ ,  $P$  étant exprimé en Pa.

transformation	$\tau$ (kW)	Q (kW)	$\Delta h$ (kW)
(1-2)	13		13
(2-3a)		1398	1398
(3a-3b)		1148	1148
(3b-3)		517	517
(3-4)	-1319		-1319
(4-1)		-1757	-1757
cycle	-1306	1306	

Tableau 27 Enthalpies mises en jeu

Le rendement est ici le rapport du travail mécanique produit à la chaleur fournie par la chaudière. Il est égal à 42,6 %.

Nous ne détaillerons pas ici les calculs à effectuer pour prendre en compte les irréversibilités qui prennent place dans la turbine. Ils sont expliqués dans la **présentation allégée complète**<sup>123</sup>.

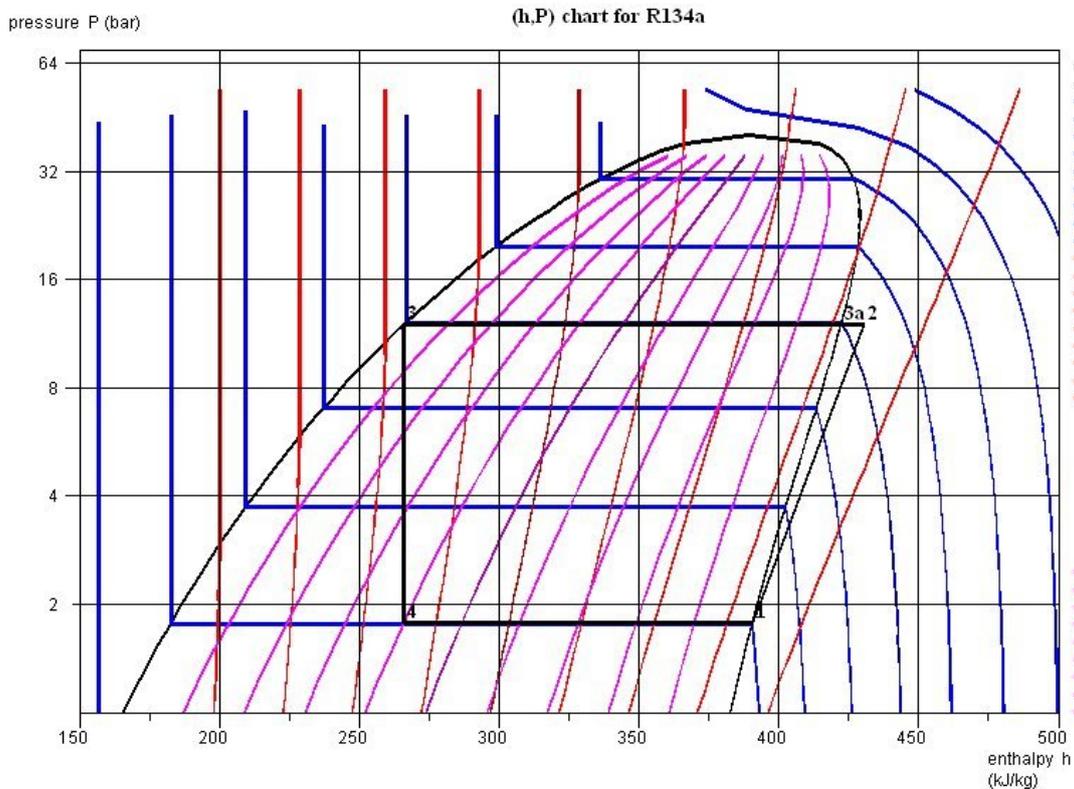
## 11.2 Machine de réfrigération

Le cycle de réfrigération par compression de R134a (figure ci-dessous) fonctionne entre une pression d'évaporation de 1,78 bar et une pression de condenseur de 12 bar.

Au point 1, en sortie d'évaporateur, le fluide est entièrement vaporisé, et donc à l'intersection de la courbe de saturation et de l'isobare  $P = 1,78$  bar, ou, ce qui

revient au même, de l'isotherme  $T = - 13 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Il est ensuite comprimé jusqu'à 12 bar en suivant une compression adiabatique réversible. Le point 1 se situant à peu près au tiers de la distance qui sépare deux adiabatiques réversibles, on peut par interpolation linéaire, déterminer le point 2 qui se situe sur l'isobare  $P = 12 \text{ bar}$ , entre ces deux courbes.



*Cycle de réfrigération*

Le refroidissement du fluide dans le condenseur par échange avec l'air extérieur comporte deux étapes : une désurchauffe (2-3a) dans la zone vapeur suivie d'une condensation selon le segment de droite horizontal (3a-3). Les points 3a et 3 se situent à l'intersection de la courbe de saturation et de l'isobare  $P = 12 \text{ bar}$ , ou, ce qui revient au même, de l'isotherme  $T = 47 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le point 3a est situé sur la droite, à la limite de la zone vapeur, et le point 3 à gauche, à la limite de la zone liquide.

La détente sans travail, et donc isenthalpique, correspond au segment vertical (3-4), le point 4 étant situé sur l'isobare  $P = 1,78 \text{ bar}$ , ou, ce qui revient au même, l'isotherme  $T = - 13 \text{ }^\circ\text{C}$ , à l'abscisse  $h = h_3$ . Son titre se lit directement sur l'isotitre correspondante : il vaut  $x = 0,4$ .

Les énergies mises en jeu peuvent être facilement déterminées en projetant ces différents points sur l'axe des abscisses. Le tableau ci-dessous fournit ces valeurs.

point	débit (kg/s)	h (kJ/kg)
1	1	391
2	1	430
3a	1	422
3	1	266
4	1	266

Tableau 28 Etat des points du cycle

Les énergies mises en jeu dans chacune des transformations se déduisent par simple différence des enthalpies des points et conduisent au tableau ci-dessous.

transformation	$\tau$ (kW)	Q (kW)	$\Delta h$ (kW)
(1-2)	40		40
(2-3a)		-8	-8
(3a-3)		-157	-157
(3-4)			
(4-1)		125	125
cycle	40	-40	

Tableau 29 Enthalpies mises en jeu

Ceci permet notamment de calculer le coefficient de performance du cycle (COP), défini comme le rapport de l'effet utile (la chaleur extraite à l'évaporateur) à l'énergie payante (ici le travail du compresseur). Il vaut 3,14.

Ce cycle s'écarte de celui d'une machine réelle sur plusieurs points. Ils sont expliqués dans la [présentation allégée complète](#) <sup>124</sup>.

## L. Conclusion

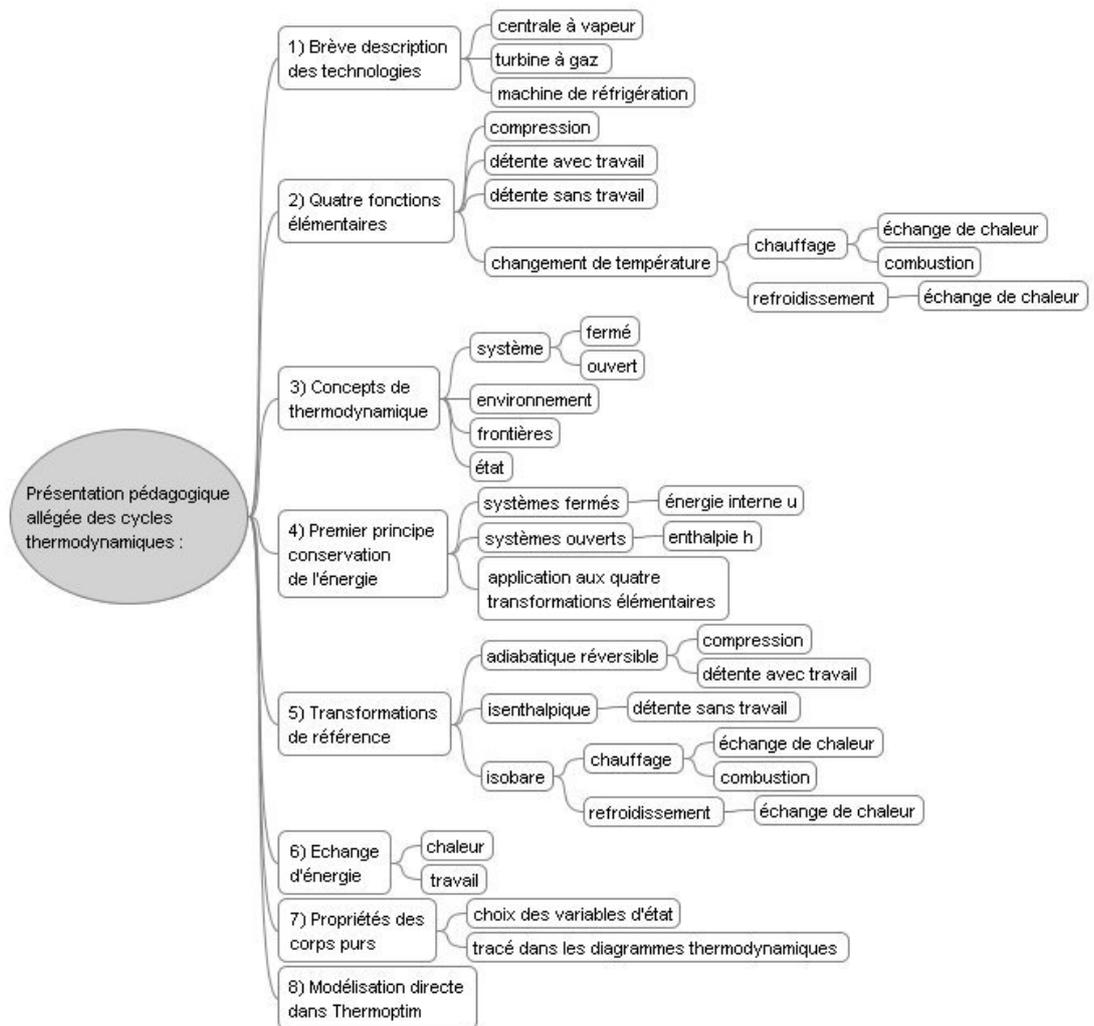
L'approche essentiellement qualitative et phénoménologique qui a été utilisée dans cette introduction prouve qu'il est possible d'initier des élèves aux cycles des machines thermiques usuelles en limitant les concepts thermodynamiques qui leur sont présentés et notamment en ne faisant pas appel à l'entropie.

Pour résumer, les jalons d'une présentation pédagogique allégée des cycles thermodynamiques (Carte ci-dessous) nous semblent pouvoir être les suivants (nous avons indiqué entre parenthèses les sections du premier tome du livre Systèmes Energétiques [1] où ces points sont développés plus en détail, afin de faciliter un éventuel approfondissement ultérieur des notions abordées) :

- Description technologique succincte des machines, avec schéma de leur architecture (sections 6.1.1, 6.2.1 et 6.3.1) ;
- Mise en évidence des quatre fonctions élémentaires : compressions, détentes avec production de travail, détentes sans production de travail, échanges de chaleur (section 2.3.6) ;
- Introduction des notions de système et d'état thermodynamique, distinction

124 - <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/pedagogie/presentation-pedagogique>

- entre systèmes fermés et systèmes ouverts (sections 2.1.1, 2.1.2) ;
- Les systèmes thermodynamiques qui nous intéressent n'échangent de l'énergie avec l'environnement que sous deux formes bien distinctes : de la chaleur et du travail (section 2.2) ;
  - La loi fondamentale qui gouverne le comportement des systèmes thermodynamiques est celle de la conservation de l'énergie, connue sous le nom de premier principe (sections 2.3.1 à 2.3.4) ;
  - Son application aux quatre transformations élémentaires montre que la détermination de la variation d'enthalpie du fluide qui les traverse suffit pour calculer l'énergie qu'elles mettent en jeu, que ce soit du travail ou de la chaleur (section 2.3.6) ;
  - Rappels succincts sur les propriétés des corps purs et leur représentation graphique dans les diagrammes thermodynamiques (sections 2.6.1 et 2.6.6.1) ;
  - Mise en évidence des évolutions de référence correspondant à ces transformations pour les machines parfaites (section 4.1.2) ;
  - Réflexion sur le choix des variables d'état les plus appropriées pour des élèves disposant d'un bagage léger en mathématique et en physique, montrant l'intérêt pédagogique des diagrammes  $(h, \ln(P))$  ;
  - Représentation des cycles de la centrale à vapeur et de la machine de réfrigération dans ces diagrammes ;
  - Enfin, une modélisation directe des cycles peut être effectuée dans ThermoOptim (sections 6.1, 6.2 et 6.3).



Carte des jalons de la présentation allégée

Il ne s'agit pas pour nous de minimiser l'intérêt que présente l'entropie : nous considérons seulement qu'il peut être préférable de ne pas l'introduire au tout début de la formation lorsque les élèves n'ont pas la culture requise. S'ils l'ont, rien ne s'oppose bien sûr à l'utiliser, bien au contraire.

Sans parler d'entropie, nous insistons en revanche sur le caractère adiabatique des compresseurs et des turbines, et sur l'importance de l'adiabatique réversible comme évolution de référence pour ces machines.

Sans avoir besoin de dire son nom, l'intérêt de l'entropie pour les études de cycle sous-tend donc notre approche, et son introduction formelle dans un second temps en est facilitée (par exemple dans la seconde partie de la [note complète](#)<sup>125</sup>), lorsque les élèves se sont familiarisés avec toutes les nouvelles notions présentées ici.