

Titre: Thermo-maître 2.0 : logiciel pour thermodynamique appliquée
Title:

Auteurs: Jacqueline Vermette, & Ricardo Camarero
Authors:

Date: 1985

Type: Rapport / Report

Référence: Vermette, J., & Camarero, R. (1985). Thermo-maître 2.0 : logiciel pour thermodynamique appliquée. (Technical Report n° EPM-RT-85-26).
Citation: <https://publications.polymtl.ca/10143/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10143/>
PolyPublie URL:

Version: Version officielle de l'éditeur / Published version

Conditions d'utilisation: Tous droits réservés / All rights reserved
Terms of Use:

Document publié chez l'éditeur officiel

Document issued by the official publisher

Institution: École Polytechnique de Montréal

Numéro de rapport: EPM-RT-85-26
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:

BIBLIOTHÈQUE

DEC 3 1985

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL

EPM/RT-85-26

Don
THERMO-MAITRE 2.0 : LOGICIEL POUR THERMODYNAMIQUE
APPLIQUEE

Jacqueline VERMETTE
Ricardo CAMARERO

DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES APPLIQUEES

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
SEPTEMBRE 1985.

S O M M A I R E

THERMO-MAITRE 2.0 : LOGICIEL POUR THERMODYNAMIQUE APPLIQUEE

Le but de ce projet était de concevoir un logiciel assistant l'étudiant dans ses calculs. Trop souvent, les concepts fondamentaux de la matière se trouvent masqués par un travail fastidieux d'interpolations des tables de propriétés. Par ce logiciel, on cherche précisément à éliminer l'utilisation de ces tables.

L'étude de la thermodynamique est un vaste domaine. On se limite donc dans ce travail aux applications utilisant des gaz réels ou parfaits.

Le support physique sélectionné pour ce logiciel, fut le micro-ordinateur à cause de sa facilité d'accès. Des calculs à l'aide d'équations empiriques étaient alors de rigueur afin d'économiser au maximum l'espace mémoire. L'équation de Redlich-Kwong s'est avérée la plus appropriée suite à une étude des principales équations d'états.

Une fois le gaz et les unités choisis, diverses fonctions de calculs sont proposées à l'usager telles: des calculs de propriétés d'états (pression, volume ou température), des calculs de processus (cinq types disponibles) et des calculs de cycles (connus ou quelconques). Une fonction de gestion gère les résultats

emmagasinés dans des banques de données provisoires. Toutes les interactions usager-logiciel (choix de menu, messages, entrées des données ...) se déroulent par l'intermédiaire d'un gérant d'actions (CHLOE). Ce gérant délimite également des zones de travail (zone d'affichage numérique, zone graphique...).

Par ce logiciel, on place l'usager dans un environnement de travail adéquat (banques de données permanentes, fonctions de calculs, de gestion et graphique, banque provisoires de résultats), en laissant l'usager maître de sa démarche.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier GAZ METROPOLITAIN inc. pour leur contribution financière.

T A B L E D E S M A T I E R E S

	PAGE
SOMMAIRE.....	iii
REMERCIEMENTS.....	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES SYMBOLES.....	xii
CHAPITRE I - INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE II - OBJECTIFS PEDAGOGIQUES DU DIDACTICIEL.....	4
2.1 Interactivité.....	4
2.2 Souplesse.....	5
2.3 Assistance dans les calculs.....	5
2.3.1 Outil complémentaire.....	5
2.3.2 Progression logique.....	6
2.3.3 Niveau de difficulté.....	7
2.4 Réaction attendue de l'étudiant.....	8
2.4.1 Jugement.....	8
2.4.2 Compréhension.....	9
2.4.3 Stimulation.....	9
CHAPITRE III - QUELQUES DIDACTICIELS DEVELOPPES...	10
3.1 Revue des travaux de Jolls.....	10
3.2 Tutoriel utilisé à Virginia Technology.....	11
3.3 CP/THERMO.....	12
3.4 THERMO-MAITRE.....	13
CHAPITRE IV - EQUATIONS D'ETATS.....	16
4.1 Revue des principales équations et leurs caractéristiques.....	17
4.1.1 Van der Waals (1873).....	18
4.1.2 Equation virielle (Kamerlingh-Onnes) (1901).....	20
4.1.3 Berthelot (1903).....	21

	PAGE
4.1.4 Beattie-Bridgeman (1928).....	21
4.1.5 Benedict-Webb-Rubin (1940).....	23
4.1.6 Redlich-Kwong (1949).....	24
4.1.7 Redlich-Kwong modifiée (1972) et Peng-Robinson (1976).....	25
4.1.8 Principe des états correspondants.....	26
4.2 Critères de sélection.....	27
4.3 Choix de l'équation.....	28
4.4 Définition d'une zone d'application pour chaque gaz.....	29
 CHAPITRE V - EQUATIONS DE LA VARIATION D'ENTHALPIE, D'ENTROPIE D'ENERGIE INTERNE ET DU TRAVAIL.....	 34
 CHAPITRE VI - SCHEMA STRUCTURAL ET DIALOGUE.....	 42
6.1 Schéma structural.....	44
6.2 Dialogue.....	46
6.2.1 L'écran.....	48
 CHAPITRE VII - LE PROGRAMME.....	 50
7.1 Initialisation.....	50
7.1.1 Rôle.....	50
7.1.2 Fonctionnement.....	52
7.2 Propriétés.....	53
7.2.1 Rôle.....	53
7.2.2 Fonctionnement.....	53
7.3 Processus.....	57
7.3.1 Rôle.....	57
7.3.2 Fonctionnement.....	57
7.4 Cycles.....	58
7.4.1 Rôle.....	58
7.4.2 Fonctionnement.....	58
7.5 Gestion.....	60
7.5.1 Rôle.....	60
7.5.2 Fonctionnement.....	60

	PAGE
CHAPITRE VIII - RECOMMENDATIONS.....	64
8.1 Utilisation.....	64
8.2 Implantation.....	65
8.3 Commentaires des usagers.....	65
8.4 Enrichissement.....	65
CHAPITRE IX - CONCLUSION.....	67
REFERENCES.....	68
ANNEXES.....	
A Comparaison des résultats de l'équation de Redlich-Kwong aux valeurs correspondantes des tables pour tous les gaz choisis.....	70
B Exemples.....	95
C Arbre du menu du logiciel.....	112
D Manuel de l'usager.....	113

L I S T E D E S T A B L E A U X

TABLEAU	PAGE
4.1 Limites de pression, volume et température.....	33
5.1 Coefficients de l'équation de la chaleur spécifique.....	40
7.1 Liste des gaz proposés.....	51
7.2 Liste des systèmes d'unités proposés....	51
B-1 Comparaison des résultats avec THERMO-MAITRE aux résultats avec les tables.....	101

L I S T E D E S F I G U R E S

FIGURE		PAGE
2.1	Exemple d'étapes de calcul d'un processus isothermique.....	7
2.2	Lien interne des modules de calculs.....	8
3.1	Environnement de travail.....	14
4.1	Pourcentage d'erreur sur la pression.....	30
4.2	Pourcentage d'erreur sur la température...	31
4.3	Pourcentage d'erreur sur le volume.....	32
5.1	Changement d'entropie d'un gaz réel via un état p° à 1° et 2° dans lequel le gaz agit comme un gaz idéal.....	35
6.1	Intéraction entre le module de dialogue et les autres modules.....	43
6.2	Schéma structural du logiciel.....	45
6.3	Structure en arbre.....	47
6.4	L'écran.....	49
7.1	Structure parentale des fonctions de calculs.....	61
7.2	Structure d'informations des banques de résultats.....	63
B-1	Choix du gaz.....	95
B-2	Calcul d'un processus.....	96
B-3	Zoom sur un processus.....	98
B-4	Banque de résultats des points.....	99
B-5	Banque de résultats des processus.....	100
B-6	Calcul d'un cycle de Carnot.....	108
B-7	Zoom sur un cycle de Carnot.....	109

B-8	Banque de résultats des processus après calcul d'un cycle.....	110
B-9	Banque de résultats des cycles.....	111

L I S T E D E S S Y M B O L E S

c_p	chaleur spécifique à pression constante (MJ/kg. °K).
$c_{p,a}$, $c_{p,b}$,	coefficients de l'équation de la chaleur
$c_{p,c}$, $c_{p,d}$	spécifique fonction de la température $[c_p(T)]$ pour un gaz parfait.
h	enthalpie par unité de masse (MJ/kg).
p	pression (MPa).
q	chaleur par unité de masse (MJ/kg).
$q_{\text{absorbé}}$	chaleur absorbée par un système (cycle) (MJ/kg).
R	constante spécifique d'un gaz.
R	constante universelle des gaz.
s	entropie par unité de masse (MJ/kg. °K).
T	température (°K).
u	énergie interne par unité de masse (MJ/kg).
v	volume par unité de masse (m^3/kg).
V	volume (m^3).
w	travail par unité de masse (MJ/kg).
w_{net}	travail effectué ou absorbé par un cycle (MJ/kg).
z	facteur de compressibilité.
η	rendement thermique.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

La thermodynamique, cette branche scientifique au confluent de la physique et de la chimie, étudie les relations entre l'énergie thermique et les lois générales des phénomènes impliquant des échanges ou des transformations. Il s'agit donc d'un champ fondamental et très vaste qui peut être étudié à deux niveaux: l'aspect microscopique, considéré par les physiciens, et l'aspect macroscopique qui relève davantage du génie, où, le type d'applications, requiert une mathématique plus simple et un nombre restreint de variables.

L'enseignement de la thermodynamique est à la base de toute formation en génie car la thermodynamique intervient dans des problèmes quotidiens, telle la transformation de l'énergie en chaleur.

Dans un premier cours, l'enseignement se limite essentiellement aux concepts de base, dont surtout, les première et deuxième lois de la thermodynamique (dont dépendent toutes les applications). Il importe donc que ces concepts soient bien maîtrisés. Pour y parvenir, on a habituellement recours à un enseignement basé sur une résolution répétée de problèmes multiples, dont les étapes

de résolution s'avèrent souvent laborieuses.

Pour les gaz, deux méthodes de calcul s'offrent selon la précision recherchée et le degré de complexité des étapes de solutions souhaité. D'une part, l'équation des gaz parfaits donne un résultat approximatif pour un calcul simple. D'autre part, des résultats provenant de tables construites à partir de données expérimentales, reflètent mieux la réalité. Naturellement, la résolution à l'aide de cette dernière méthode, implique une série d'interpolations.

S'il s'agit d'un problème moindrement intéressant thermodynamiquement, mais complexe pour l'étudiant, les concepts fondamentaux de la matière se trouvent masqués par ce travail arithmétique fastidieux, sujet à de multiples erreurs. Effectuer des règles de trois et fouiller dans les tables de propriétés, sont des étapes consommatrices de temps qui pourrait être utilisé à meilleur escient.

On propose un logiciel pour assister l'étudiant dans l'apprentissage de la thermodynamique. Les objectifs généraux poursuivis lors d'applications numériques sont:

- maintenir l'attention des étudiants sur les concepts fondamentaux de la thermodynamique.
- permettre aux étudiants d'apprendre en "expérimentant", soit en variant les paramètres, prenant des décisions et jugeant à partir des résultats numériques et graphiques obtenus.

- libérer l'étudiant de la corvée de calculs arithmétiques.

Par l'intermédiaire de ce logiciel, diverses fonctions de calculs sont proposées à l'étudiant. Celui-ci peut exécuter des calculs: de propriétés caractérisant l'état d'un gaz réel, d'échanges thermiques et de travail lors de transformations, ou encore de cycles.

L'utilisation massive de cet outil pédagogique nécessite que tous y aient accès aisément. Il est donc développé en fonction d'un micro-ordinateur.

La facilité d'accessibilité des ordinateurs a modifié, depuis ces dernières années, la pratique et l'enseignement du génie. Au début, l'ordinateur était réservé aux gros calculs, à la recherche. On tente maintenant de l'introduire progressivement dans le travail quotidien de l'ingénieur, afin de l'assister dans l'analyse, la conception et l'optimisation de ses projets. Utilisé dans l'enseignement, il permet d'éliminer certaines parties du cours apportant peu à la compréhension des phénomènes mais consommatrices de temps.

Bref, l'ordinateur ne modifie pas les principes de base mais change la façon de résoudre un problème de génie. Le logiciel THERMO-MAITRE s'inscrit dans le cadre d'un effort d'assistance par ordinateur des cours de génie.

CHAPITRE III

OBJECTIFS PEDAGOGIQUES DU DIDACTICIEL

L'utilisation d'un didacticiel n'est justifié que s'il constitue un apport réel aux méthodes traditionnelles [1]. Cet apport peut se situer sur plusieurs plans (vitesse, réussite, etc....).

Des points importants, tels l'interactivité, la souplesse, l'assistance dans les calculs, le renforcement graphique méritent une attention toute particulière. Ceci, afin d'inciter l'étudiant à poser un jugement, à poursuivre ses démarches pour établir sa propre expertise du problème. La forme donnée à un outil d'enseignement (tutoriel, outil de calcul ou autres) lors de son développement est un élément prépondérant.

2.1 INTERACTIVITE

L'utilisateur moyen n'est pas familier avec le fonctionnement d'ordinateurs. Il faut lui fournir un logiciel facile à opérer. Les messages et les sollicitations se doivent d'être clairs et courts.

Une façon commode pour l'usager de composer sa solution est d'entrer les données une seule à la fois. Pour le bon

déroulement de la solution, il est préférable de valider ces données à mesure. Si de mauvaises valeurs sont entrées, le programme est protégé et demande de nouvelles données. Une réponse immédiate succède chaque intervention de l'usager.

Il faut exploiter au maximum tout moyen matériel facilitant l'interactivité (ex: souris), ainsi que tout moyen attirant l'attention de l'usager (ex: cloche).

2.2 SOUPLESSE

On entend par souplesse, la maniabilité du programme par l'usager. Ceci se traduit pour l'usager par une mise en marche, un arrêt, un changement de section et un bris volontaire d'une séquence de calculs s'effectuant de façon naturelle impliquant un minimum d'actions.

Pour l'informaticien chargé du développement ou de l'entretien, ceci signifie une structure modulaire où de nouvelles fonctions s'insèrent aisément.

2.3 ASSISTANCE DANS LES CALCULS

2.3.1 Outil complémentaire

Ce logiciel (THERMO-MAITRE) n'a pas été conçu dans le but de remplacer les manuels de thermodynamique. Ceux-ci sont suffisamment complets et bien adaptés à l'enseignement.

Il se veut plutôt un outil de calcul supplémentaire aux tables et graphiques rencontrés à la fin de la plupart des livres de thermodynamique. Un effort intellectuel est quand même requis à l'analyse du problème et à l'élaboration d'une solution. Avant de débuter un problème, l'étudiant doit bien saisir les concepts exposés en classe. Il doit être capable de le disséquer pour, s'il y a lieu, l'adapter aux particularités du logiciel.

2.3.2 Progression logique

La progression logique se situe à deux plans. Le premier implique une progression logique dans les étapes de calculs suggérés par le logiciel. La spécification du calcul à effectuer se fait d'un niveau tout à fait général à un niveau très particulier (Fig. 2.1).

L'autre aspect de la progression logique se situe chez l'étudiant. Pour mener à bien une séance de travail, il doit composer la solution du problème. Partant de l'énoncé, il détermine les grandeurs connues et inconnues, les conditions d'applications, les principes impliqués et les valeurs à calculer. Il est important de bien réaliser ce cheminement pour obtenir un bon résultat.

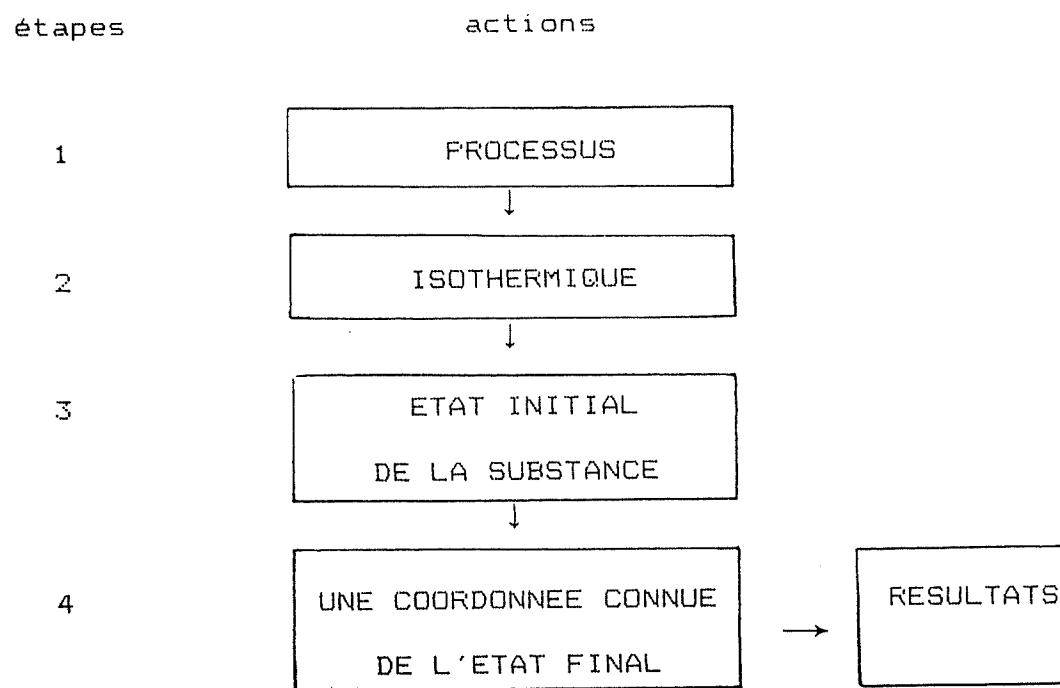


Figure 2.1 : Exemple d'étapes de calcul d'un processus isothermique

2.3.3 Niveau de difficulté

Certains didacticiels proposent à l'usager différents niveaux de difficulté. Ce logiciel n'en propose pas de façon explicite, l'usager étant maître de sa démarche. On retrouve plutôt une complexité variant selon les modules de calculs choisis. Un calcul de propriétés est qualifié de peu complexe, tandis que les calculs de processus ou de cycle sont qualifiés plus complexes. Ces derniers font appel de façon interne au module de calculs de propriétés (Fig. 2.2). De la même façon, un calcul de cycle requiert

les deux autres niveaux de calculs.

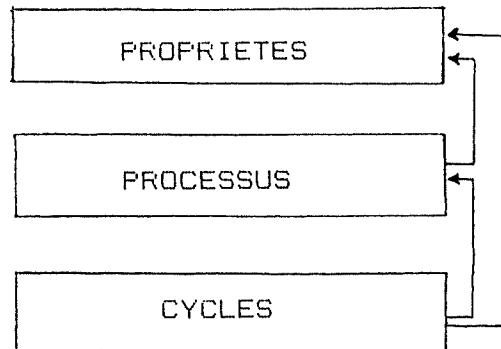


Figure 2.2 : Lien interne des modules de calculs

2.4 REACTION ATTENDUE DE L'ETUDIANT

2.4.1 Jugement

Un cours magistral n'est pas un mode d'apprentissage dynamique. L'esprit de l'étudiant demeure passif. On incite donc l'étudiant à résoudre quelques problèmes pour une meilleure compréhension. Des connaissances acquises, il en fait la synthèse, résoud son problème et ainsi, saisit mieux les subtilités des principes thermodynamiques. Il accomplit donc un exercice de jugement, tout son génie se met à l'œuvre.

L'utilisation du logiciel incite d'avantage l'étudiant à poser un jugement. A sa guise, il peut expérimenter différentes valeurs, comparer les résultats obtenus et analyser les conséquences des variations apportées par

rapport au problème initial.

2.4.2 Compréhension

Tout professeur soucieux de sa méthode d'enseignement est constamment à l'affût de meilleurs moyens pédagogiques. Ceci, dans le but de mieux transmettre sa matière.

Une meilleure compréhension des concepts exposés en classe permet de voir plus en profondeur la portée de ceux-ci.

2.4.3 Stimulation

Par ce logiciel, l'attention de l'étudiant se concentre d'avantage sur la physique du problème. La compréhension de la matière en est donc accrue. Face à une réussite, l'étudiant est incité à poursuivre son apprentissage, à consacrer plus de temps à l'étude. De cette façon, on atteint un des buts fixés; un défi de taille : stimuler l'étudiant.

CHAPITRE III

QUELQUES DIDACTICIELS DEVELOPPES

3.1 REVUE DES TRAVAUX DE JOLLS

L'enseignement de la thermodynamique fait l'objet de plusieurs travaux. En particulier on retient les travaux de Kenneth R. Jolls [2].

Il s'agit de combler certaines lacunes décelées dans l'enseignement des principes.

Une solution apportée fût de recomposer les manuels de classe. Cependant, Jolls considère qu'actuellement les ouvrages traitant ce sujet sont suffisamment bons. La source du problème proviendrait de la difficulté à visualiser les équations d'états et les corrélations entre les propriétés (diagrammes de phases des substances simples et des multi-composants). Très peu de manuels présentent ces diagrammes de phases, ceux-ci étant le résultat d'un laborieux travail à la main. Produire ces graphiques en 3 dimensions à l'aide d'un ordinateur faciliterait considérablement la tâche. (Les projections en 2 dimensions sont jugées tout à fait inadéquates.)

Par des artifices graphiques, le professeur peut mettre l'accent sur certaines caractéristiques des diagrammes de

phases projetés dans l'orientation choisie.

Les équations d'états (gaz parfaits, Van der Waals, Redlich-Kwong) peuvent sans difficulté être comparées graphiquement.

Jolls croit ainsi que les étudiants saisiront mieux les relations entre les propriétés utilisées fréquemment en génie chimique, ainsi que la portée des diagrammes de phases dont ils se référeront souvent en industrie.

3.2 TUTORIEL UTILISE A VIRGINIA TECHNOLOGY

A partir des travaux de K. Jolls, J. Spark et E. Brown [3] ont développé un didacticiel de type tutoriel.

Le programme exécutable est lancé par l'étudiant et avance au rythme de ce dernier. Il comprend 10 pages qui contiennent une partie graphique et un texte à lire au bas. On met l'accent sur les diagrammes PVT, la vapeur et le liquide comprimé de même que sur les mélanges.

L'objectif semble répondre à un besoin de support graphique.

Le tout s'exécute sur un système CMS/VM avec écran TEKTRONICS.

3.3 CP/THERMO

Utilisant une approche très différente [4], un didacticiel s'adressant aux étudiants d'un premier et deuxième cours de thermodynamique a été mis au point.

Une méthode répandue pour bien assimiler les concepts exposés en classe, est la résolution d'exercices. CP/THERMO intervient ici en suggérant une démarche de résolution. Une banque de problèmes touchant différents aspects de la thermodynamique (cycles travail vapeur, cycles réfrigérants, turbines à gaz, moteurs à combustion interne volonté pour mieux évaluer les propriétés testées. Si ce dernier éprouve de la difficulté, à sa demande, des indices l'aide à continuer, et en tout dernier recours, la réponse est donnée. On encourage l'étudiant par un système de pointage et des tonalités appropriées selon une bonne ou une mauvaise réponse.

De plus, une série de commande (impression, énoncé du problème, aide,...) est disponible au bas de l'écran.

On espère ainsi encourager l'étudiant dans son apprentissage. Ce didacticiel solutionne trois à quatre problèmes dans le même temps qu'un seul à la main.

3.4 THERMO-MAITRE

Tous les outils d'enseignement décrits précédemment poursuivent essentiellement le même objectif: accroître la compréhension de la matière. THERMO-MAITRE ne déroge à cet objectif; seules les fins pour y accéder sont différentes.

On dénote une certaine évolution à travers ces logiciels. Les deux premiers appartiennent à une première génération d'assistance par ordinateur dans l'enseignement. En fait, ils ne présentent à l'étudiant que des graphiques spécifiques construits au préalable, et n'apportent rien d'autres qu'un chapitre supplémentaire à un manuel de thermodynamique. Le tutoriel utilisé à Virginia Technology, est en fait un manuel informatisé dont la communication usager-logiciel est inexistante.

Le troisième didacticiel présenté, s'apparente plus à THERMO-MAITRE. Ce sont tous les deux des méthodes dynamiques d'apprentissage. On entend par méthodes dynamiques d'apprentissage, une méthode où l'accent est mis sur la communication à plusieurs niveaux entre l'usager et le logiciel. Elle peut s'affirmer par un choix de menu, des sollicitations, validations, calculs, présentations de résultats etc... Bref, l'esprit de l'usager est constamment sollicité, et les décisions prises par celui-ci entraîne toujours une conséquence.

On peut qualifier le logiciel THERMO-MAITRE de deuxième génération. En plus d'être dynamique, il se distingue en créant un environnement de travail adéquat autour de l'usager (Fig.3.1)

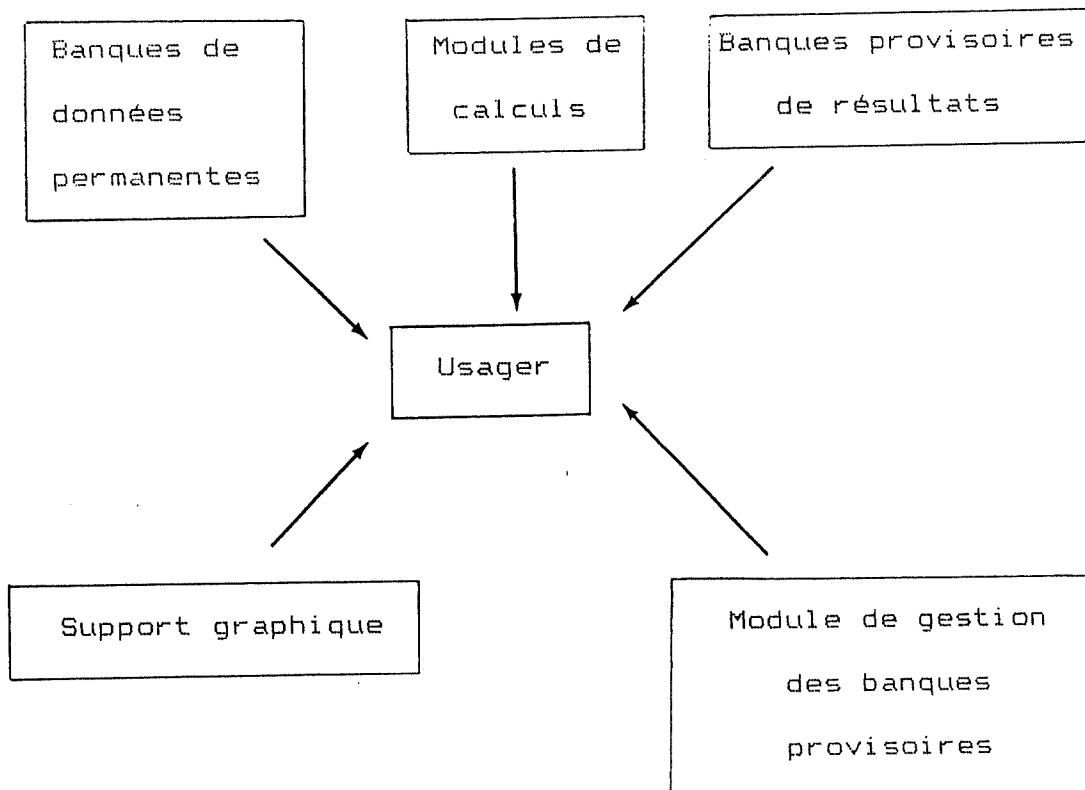


Figure 3.1 : Environnement de travail

Par cette approche, il allie le traitement numérique, la gestion des données et la représentation graphique au génie de l'usager.

THERMO-MAITRE ne propose pas de problèmes à résoudre, ni de méthodes rigoureuses de solution. L'étudiant soumet sa propre solution.

Le public cible est l'étudiant inscrit à un premier cours de thermodynamique en génie. Toutefois, un technicien ou un ingénieur ayant de nombreux calculs à effectuer y verra sûrement l'utilité.

CHAPITRE IV

EQUATIONS D'ETATS

Il existe deux méthodes pour le calcul de propriétés: les tables et les équations d'états. Dans le contexte d'un logiciel, il faut, par la première méthode, stocker toutes les tables de propriétés, et ceci pour chaque gaz. Lorsqu'on effectue un calcul, on interpole numériquement dans ces tables. L'espace mémoire requise est considérable et dépasse la capacité envisagée pour le mode d'utilisation visé. D'autre part, un calcul à l'aide d'équations d'états nécessite une banque de données comprenant seulement quelques chiffres comparativement à des milliers. Les équations d'états s'avèrent donc préférables.

Un des objectifs fixés dès le début, était de rendre ce logiciel le plus accessible possible. Le micro-ordinateur, de par sa facilité d'accès, se prête bien à ce type d'utilisation. Le choix de la méthode devient alors important car l'espace mémoire requise pour le logiciel doit être optimisée au maximum.

On désire également une version exécutable résidant sur une seule disquette.

Les équations d'états servent à évaluer les propriétés thermodynamiques intensives d'une substance (elles

approximent les données expérimentales). Sous forme algébrique, graphique ou de tables, elles constituent un lien entre deux propriétés et une troisième, permettant ainsi de caractériser l'état thermodynamique de la substance. L'état de cette substance se représente sur un diagramme par un point. Elles ont fait l'objet de multiples recherches et, encore aujourd'hui, on tente de les améliorer.

Chacune des équations d'états s'avère précise dans des conditions particulières. On en sélectionne une selon la région de travail et le gaz utilisé. Il s'agit de réaliser un compromis entre la simplicité de la forme de l'équation et la précision du résultat obtenu.

Certaines sont utilisées pour une grande gamme de gaz, d'autres se veulent très précises pour quelques gaz dans une région restreinte. Leur niveau de complexité est très grand tandis que pour d'autres fort simple.

4.1 REVUE DES PRINCIPALES EQUATIONS ET LEURS CARACTERISTIQUES

La première équation d'état, également la plus simple, est l'équation des gaz parfaits de "Boyle and Charles", qui relie la pression, le volume et la température.

$$pV = RT$$

(4.1)

où R la constante des gaz

(unité de pression) * (unité de volume/unité de masse)

$$R = \frac{\text{température absolue}}{1545.32 \text{ pi-lb/lb-}^{\circ}\text{R}}$$

$$\overline{R} = 1545.32 \text{ pi-lb/lb-}^{\circ}\text{R}$$

$$\overline{R} = 8.3143 \text{ J/gmole-k}$$

$$\overline{R} = R * \text{Poids moléculaire}$$

Elle est fondée sur les hypothèses suivantes:

l'attraction entre les molécules est nulle et l'espace occupé par celles-ci par rapport au volume est négligeable.

Cette relation ne décrivant pas précisément l'état d'un gaz, on a cherché à développer d'autres équations. Parmi celles-ci, on distingue trois formes d'équations d'états; la forme virielle consistant en une expansion géométrique avec plusieurs coefficients de corrélation représentant l'effet des forces intermoléculaires, la forme cubique impliquant peu de constantes, et le principe des états correspondants.

4.1.1 Van der Waals (1873)

L'équation de Van der Waals s'apparente à la forme

cubique. Elle possède deux constantes facile à évaluer et s'énonce comme suit [5,6] :

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2} \quad (4.2)$$

où

$$a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_c^2}{p_c} \quad (4.3)$$

$$b = \frac{1}{8} \frac{R T_c}{p_c} \quad (4.4)$$

T_c : température critique

p_c : pression critique

Pionnière de toutes les équations d'états, l'équation de Van der Waals cubique, repose sur la théorie des forces de cohésions entre molécules et sur la théorie de perturbation du système (collision). Un modèle de sphères dures agissant comme système de référence s'annonce dès le début inexact. Elle ne décrit donc pas bien les gaz réels à haute température et haute pression, les collisions devenant plus fréquentes.

Toutefois, elle est très simple et les constantes s'évaluent facilement. Elle demeure quand même aujourd'hui

très employée.

4.1.2 Equation virielle (Kamerlingh-Onnes) (1901)

L'équation virielle [6,7], consistant en une série géométrique convergeante, fut proposée à l'origine comme une forme empirique de représentation des données PVT.

$$z = \frac{pV}{RT} = A - \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^4} + \frac{E}{v^6} + \dots \quad (4.5)$$

où B le second coefficient viriel

$$B = b_1 + \frac{b_2}{T} + \frac{b_3}{T^2} + \frac{b_4}{T^3} + \dots \quad (4.6)$$

Elle est donc tout à fait générale. Plus tard, elle fut généralisée aux mélanges gazeux.

Les coefficients de cette équation sont exacts mais, à cause de la difficulté à les évaluer, la plage d'applicabilité en est limitée. L'équation est valable pour des substances de densité faible (moins de 3/4 de la densité critique).

Habituellement, on tronque au troisième coefficient. On connaît très bien le deuxième coefficient, moins le troisième et rarement les suivants.

4.1.3 Berthelot (1903)

L'équation de Berthelot [5,6] dévie de l'équation de Van der Waals. La constante b s'évalue de la même façon. Elle diffère de par son deuxième terme où la température intervient, et par la constante a qui est fonction de la température critique au cube.

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{Tv^2} \quad (4.7)$$

où

$$a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_c^3}{p_c} \quad (4.8)$$

$$b = \frac{1}{8} \frac{R T_c}{p_c} \quad (4.9)$$

Elle développe la théorie des perturbations pour un fluide de molécules non-sphériques utilisant un fluide de référence de sphères dures. Elle devient intéressant pour des fluides de molécules non-sphériques.

Elle donne de meilleurs résultats que Van der Waals à basse pression.

4.1.4 Beattie-Bridgeman (1928)

L'équation de Beattie-Bridgeman [8] est de la forme

virielles et s'énonce comme suit:

$$p = RT \frac{(1 - \epsilon)}{v^2} (v + B) - \frac{A}{v^2} \quad (4.10)$$

où

$$A = A_\infty \left(1 - \frac{a}{v} \right) \quad (4.11)$$

$$B = B_\infty \left(1 - \frac{b}{v} \right) \quad (4.12)$$

$$\epsilon = \frac{c}{v T^2} \quad (4.13)$$

Exprimée sous une autre forme:

$$v = \frac{RT}{p} + \frac{\beta}{RT} + \frac{\gamma}{R^2 T^2} p + \frac{\delta}{R^3 T^3} p^2 \quad (4.14)$$

où

$$\beta = RTB_\infty - A_\infty - \frac{Rc}{T^2} \quad (4.15)$$

$$\gamma = -RTB_\infty b + A_\infty a - \frac{RB_\infty c}{T^2} \quad (4.16)$$

$$\delta = \frac{RB_0bc}{T^2} \quad (4.17)$$

Elle représente bien les propriétés primaires (pression, volume et température) des substances gazeuses. Cinq paramètres (A_0 , a , B_0 , b et c) différents pour chaque gaz sont nécessaires. Ils sont disponibles dans la littérature pour une vingtaine de gaz, dont les plus fréquemment rencontrés en génie.

La précision des résultats se révèle satisfaisante (en dedans de 5%) sur une large bande de températures et de pressions pour au moins une dizaine de gaz. Cependant, elle ne s'applique pas aux mélanges.

4.1.5 Benedict-Webb-Rubin (1940)

Beaucoup plus complexe que l'équation de Beattie-Bridgeman, l'équation de Benedict-Webb-Rubin est aussi de la forme virielle [7, 9, 10].

$$\rho = RT\rho + (RT(B_0 + b\rho) - (A_0 - a\rho - a\rho^4) - 1/T^2 [C_0 - c\rho(1 + \gamma\rho^2)e^{-\gamma\rho^2}])\rho^2 \quad (4.18)$$

ρ : la densité

a_0 , b_0 , c_0 , A_0 , B_0 , C_0 : les constantes de l'équation [11]

Elle requiert huit constantes et parfois même 11, 24 et 44

constantes. Elle très utilisée pour les hydrocarbures pour une bonne plage d'applications (environ de 26 à 400 °F et de 65 psia à 2000 psia). Elle s'applique pour les phases liquide et vapeur, et aussi pour des mélanges dont les paramètres sont connus pour chaque constituant.

Bien qu'elle soit relativement exacte, sa complexité et le temps de calcul requis n'en demeurent pas moins imposants.

Sa plage d'applicabilité est restreinte. Les coefficients sont disponibles pour peu de substances.

4.1.6 Redlich-Kwong (1949)

L'équation de Redlich-Kwong [5,12], cubique en v , fut développée à partir de l'équation de Van der Waals.

$$p = \frac{RT}{(v - b)} - \frac{a}{\sqrt{T} v(v + b)} \quad (4.19)$$

où

$$a = \frac{.4278 R^2 T_c^{2.5}}{P_c} \quad (4.20)$$

$$b = 0.0867 \frac{RT_c}{P_c} \quad (4.21)$$

Elle s'applique aux mélanges, aux vapeurs comme aux liquides. Equation simple et précise, elle se limite aux

substances non-polaires. Son application n'est pas recommandée pour les substances polaires. Selon les résultats de cette équation, les fluides composés de liaisons hydrogène et de moments dipolaires ne sont pas bien représentés.

L'équation de Redlich-Kwong est très utilisée dans l'industrie pétrochimique traitant surtout les hydrocarbures.

En dépit de ses bons résultats, elle affiche une faiblesse dans le calcul de la chaleur spécifique.

4.1.7 Redlich-Kwong modifiée (1972) et Peng-Robinson (1976)

On remarque que le paramètre a de l'équation de Redlich-Kwong modifiée [5] est fonction de la température, tandis que dans l'équation de Peng-Robinson [13], il prend une autre forme.

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b)} \quad (4.22)$$

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{\theta_{PR}(T)}{(v^2 + 2bv - b^2)} \quad (4.23)$$

où $\theta_{PR} = .45725 [1 + (.37464 + 1.54226 w + .26992 w^2)(1 - Tr^{1/2})]^2$

(4.24)

T_r : température réduite

w : facteur ascentrique

Redlich-Kwong modifiée et Peng-Robinson sont très précises pour des groupes très spécifiques de substances et des plages d'applicabilité restreintes.

$a(T)$ et $\theta_{PR}(T)$ s'évaluent difficilement.

4.1.8 Principe des états correspondants

Une façon simple d'effectuer des calculs par le principe des états correspondants [6, 10], est d'utiliser des graphiques tracés au préalable. On les retrouve à la fin des manuels de thermodynamique.

$$z = \frac{pv}{RT} = \frac{p_r v_r}{T_r} z_c \quad (4.25)$$

p_r : pression réduite

v_r : volume réduit

T_r : température réduite

z_c : facteur de compressibilité critique

Evidemment exacte pour toutes substances au point critique, elle le devient moins à basse pression si z_c est différent. Pour les autres régions sa précision se compare

à Benedict-Webb-Rubin avec un temps de calcul plus long.

On doit recourir à des graphiques.

Cette équation ne s'applique pas aux mélanges.

4.2 CRITERES DE SELECTION

Le choix d'une équation d'états parmi celles exposées (les plus connues) se fixe selon les critères suivants:

- Simplicité de la forme

On admet qu'une équation est complexe lorsqu'elle possède un grand nombre de coefficients et/ou les coefficients s'évaluent difficilement étant fonction d'une variable ou dépendant de conditions très spéciales. Soumises à des méthodes numériques et aux relations de Maxwell elle se traite avec de plus en plus de peine.

- Plage d'applacibilité

Eliminer complètement les tableaux exige une grande plage d'applacibilité en pression, volume et température et ceci pour chaque gaz considéré. Un vaste choix de gaz est également souhaitable.

- Disponibilité des coefficients de l'équation

Une équation très précise n'a pas ici d'utilité si ses coefficients sont quasi introuvables.

- Précision des calculs

Considérant les tables de propriétés comme référence, on escompte autant que possible des valeurs voisines. Fait à noter, ces tables sont issues elles-mêmes d'équations très complexes et très précises (certaines se basant sur des notions de mécanique statistique).

4.3 CHOIX DE L'EQUATION

En appliquant ces critères aux équations présentées, on retient deux équations: Beattie-Bridgeman (forme virielle) et Redlich-Kwong (forme cubique). Pour un examen quantitatif, les deux ont été programmées. La première version du logiciel employait l'équation de Beattie-Bridgeman.

Une étude plus approfondie de la précision de chacune consistait à comparer les résultats obtenus (pression, volume et température) aux valeurs correspondantes dans les tables [14]. Les figures 4.1, 4.2 et 4.3 présentent l'erreur relative aux tables pour le bioxyde de carbone (CO_2)

Un examen de ces comparaisons révèle que près du point critique les équations des gaz parfaits et de Beattie-Bridgeman ne donnent pas une bonne précision tandis que celle de Redlich-Kwong semble être meilleure pour cette

région. Dans l'ensemble le pourcentage d'erreur pour l'équation de Redlich-Kwong varie de 0.35% à 6% et pour Beattie-Bridgeman varie de 0.6% à 35%.

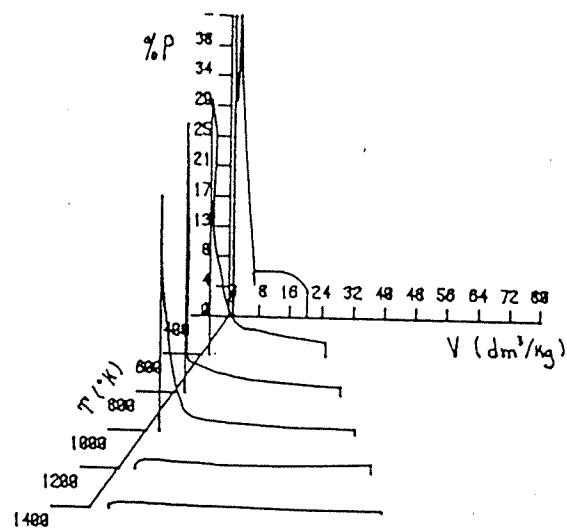
L'équation de Redlich-Kwong donne une précision plus uniforme sur l'ensemble de la région considérée.

4.4 DEFINITION D'UNE ZONE D'APPLICATION POUR CHAQUE GAZ

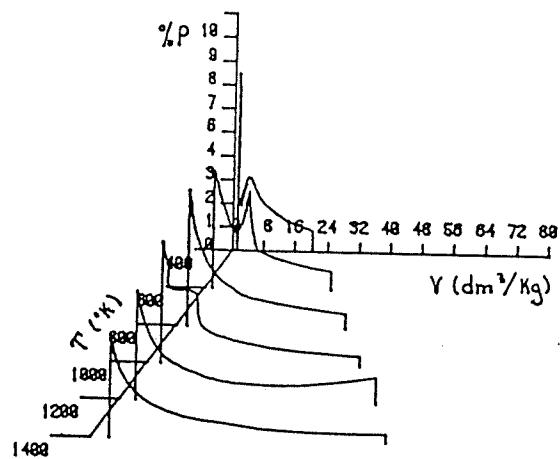
Chaque gaz est soumis à une analyse comparative telle que décrite ci-dessus.

La zone jugée acceptable pour les calculs du programme se restreint à:

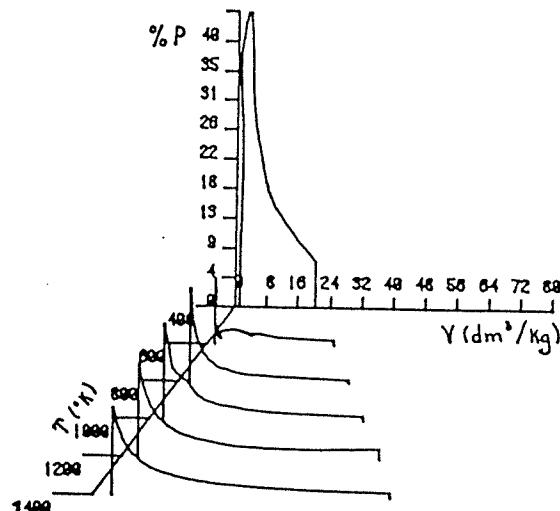
- Une erreur relative aux tables moins de 10%
- L'étendue de chaque table



a) Beattie-Bridgeman



b) Redlich-Kwong



c) Gaz Parfait

Figure 4.1 : Pourcentage d'erreur sur la pression.

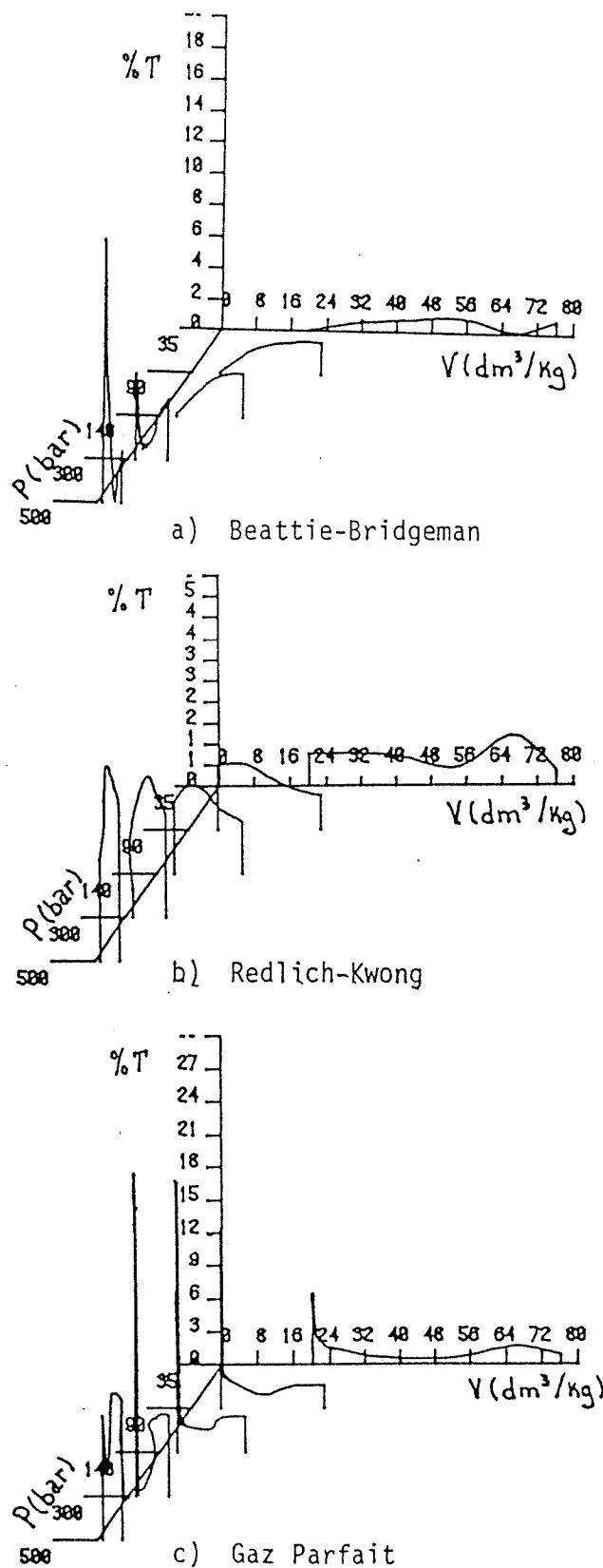
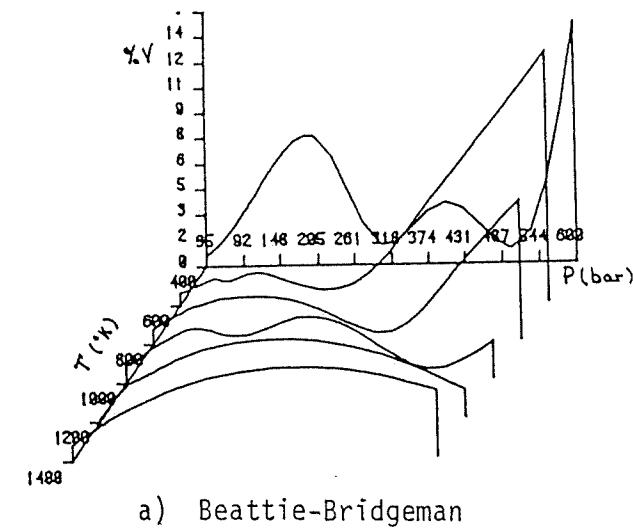
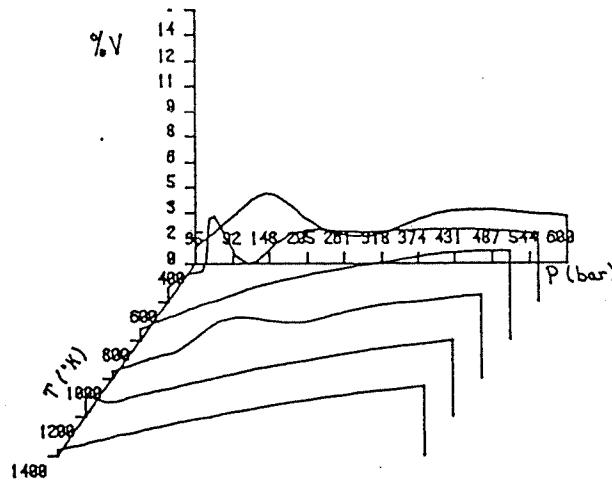


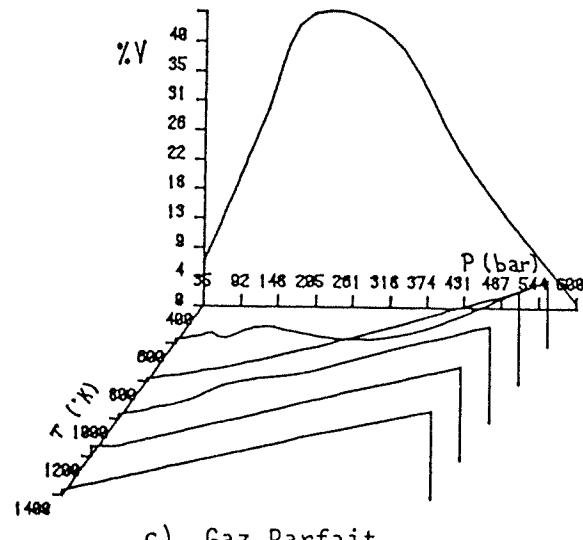
Figure 4.2 : Pourcentage d'erreur sur la température.



a) Beattie-Bridgeman



b) Redlich-Kwong



c) Gaz Parfait

Figure 4.3 : Pourcentage d'erreur sur le volume.

Le tableau ci-dessous indique les limites inférieures et supérieures établies. Pour plus de détails sur les écarts relatifs obtenus pour chaque gaz, on réfère le lecteur à l'annexe A.

Tableau 4.1 : Limites de pression, volume et température

GAZ	P _{MIN} (MPa)	P _{MAX} (MPa)	V _{MIN} (m ³ /Kg)	V _{MAX} (m ³ /Kg)	T _{MIN} (°K)	T _{MAX} (°K)
ARGON	0,1	90	0,009575	2,70600	250	1300
AZOTE	0,1	100	0,002262	3,85900	450	1300
BIOXYDE DE CARBONE	3,5	60	0,001250	0,09787	400	1800
ETHANE	0,1	5	0,007670	1,38050	310	500
ETHYLENE	0,1	10	0,004541	1,25200	323	423
METHANE	0,1	5	0,071700	5,18400	200	1000
MONOXIDE DE CARBONE	0,1	10	0,008100	8,90700	280	3000
OXYGENE	0,1	90	0,001185	3,37800	260	1300
PROPANE	0,1	7	0,002650	1,12900	400	600

Certains gaz ne peuvent toutefois être utilisés actuellement par le programme. Ils ne satisfont pas les conditions énumérées ci-haut. Ces gaz sont l'ammoniac et l'éthanol.

CHAPITRE V

EQUATIONS DE LA VARIATION D'ENTHALPIE, D'ENTROPIE, D'ENERGIE INTERNE ET DU TRAVAIL

Une transformation implique un changement d'énergie interne (Δu), d'enthalpie (Δh), d'entropie (Δs) et une production ou une absorption de travail (w) et de chaleur (q). Une des principales fonctions du module de transformation est d'évaluer ces propriétés. Toutes les transformations traitées par ce logiciel sont réversibles. Les calculs s'effectuent pour l'unité de masse par la première loi de la thermodynamique (système fermé, énergies cinétique et potentielle négligeables),

$$q = \Delta u + w \quad (5.1)$$

les relations de Maxwell et à l'aide de fonctions de dérivation ("departure function") par rapport à un comportement idéal [15].

Examinons le changement d'entropie Δs . Appliquant les relations de Maxwell :

$$ds = \left(\frac{\delta s}{\delta T} \right)_p dT - \left(\frac{\delta v}{\delta T} \right)_p dp \quad (5.2)$$

par rapport au gaz parfait l'équation (5.1) devient :

$$\Delta s = - \int_{p_1}^{p_0} \left(\frac{\delta v}{\delta T} \right)_p dp - \int_{p_0}^{p_2} \left(\frac{\delta v}{\delta T} \right)_p dp + \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} \quad (5.3)$$

et s'illustre sur un diagramme $T - s$ comme à la figure 5.1.

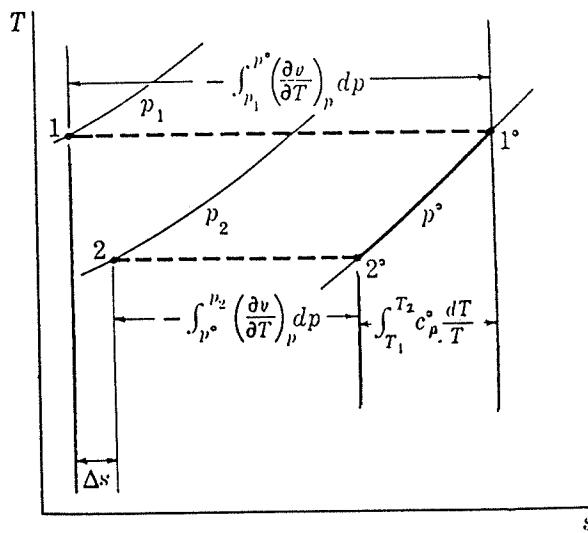


Figure 5.1 : Changement d'entropie d'un gaz réel via un état p^* à 1° et 2° dans lequel le gaz agit comme un gaz idéal.

c_p^* : chaleur spécifique à pression constante évaluée pour le gaz parfait en fonction de la température (Voir coefficients au tableau 5.1),

$$c_p^* = c_p A + c_p B T + c_p C T^2 + c_p D T^3 \quad (5.4)$$

p^* : pression du gaz parfait.

p^* tend vers zéro à mesure que le gaz tend vers un comportement idéal.

Notons que les fonctions de dérivations s'utilisent également pour des mélanges à composition fixe.

Appliquées à l'équation de Redlich-Kwong

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{\sqrt{T} v(v+b)} \quad (5.5)$$

on déduit pour l'enthalpie

$$dh = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\delta h}{\delta p} \right)_{T_1} dp + \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{\delta h}{\delta T} \right)_{p_2} dT \quad (5.6)$$

ou d'une autre façon

$$dh = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\delta h}{\delta p} \right)_{T_2} dp + \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{\delta h}{\delta T} \right)_{p_1} dT \quad (5.7)$$

la variation de n'importe quelle propriété thermodynamique entre deux états étant indépendante du parcours suivi.

Donc

$$\Delta h = (h^\circ - h_{p_1})_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} c^\circ_p dT = (h^\circ - h_{p_2})_{T_2} \quad (5.8)$$

où $h - h^\circ$ s'exprime en fonction de l'énergie d'Helmholtz et de l'entropie

$$h - h^\circ = (A - A^\circ) + T(s - s^\circ) + RT(z - 1) \quad (5.9)$$

où

$$A - A^\circ = -RT \ln \left(\frac{v - b}{v} \right) - \frac{a}{\sqrt{T} b} \ln \left(\frac{v + b}{v} \right) - RT \ln \left(\frac{v}{v^\circ} \right) \quad (5.10)$$

$$s - s^\circ = \frac{-\delta}{\delta T} (A - A^\circ) \approx$$

$$= R \ln \left(\frac{v - b}{v} \right) - \frac{a}{2bT^{3/2}} \ln \left(\frac{v + b}{v} \right) + RT \ln \left(\frac{v}{v^\circ} \right) \quad (5.11)$$

$$z = \frac{v}{v - b} = \frac{a}{RT^{3/2}(v+b)} \quad (5.12)$$

De la même façon, on déduit pour l'énergie interne et pour l'entropie

$$\Delta u = (u^* - u_v)_T + \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = (u^* - u_v)_T \quad (5.13)$$

où

$$u - u^* = (A - A^*) + T(s - s^*) \quad (5.14)$$

$$\Delta s = (s^* - s_v)_T + \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT = (s^* - s_v)_T \quad (5.15)$$

Les points de références v^* et p^* s'évaluent de plusieurs façons.

1 cas $p^* = \text{l'unité de pression}$

$$v^* = RT$$

2 cas $p^* = p$

$$v/v^* = z$$

3 cas $v = v^* \quad (\text{très peu courant})$

Les choix de v^* et p^* ont été fixés respectivement égales à RT et à l'unité de pression.

Les fonctions de dérivations $h - h^*$ et $u - u^*$ ne dépendent pas de la pression p^* (ou v^*) de l'état de

référence, par opposition $A - A^\circ$ et $s - s^\circ$ en dépendent.

Pour le calcul du travail, on applique l'équation suivante:

$$w = - \int p \, dv \quad (5.16)$$

Dans le cas d'une transformation à volume constant, elle se traduit par un travail nul.

Pour un processus isobare ($\Delta p = 0$), on peut écrire :

$$w = p (v_1 - v_2) \quad (5.17)$$

En se basant sur l'équation de Redlich-Kwong, elle devient pour un processus à température constante :

$$w = RT_1 \ln \left(\frac{v_2 - b}{v_1 - b} \right) - \frac{a}{b\sqrt{T_1}} \ln \left(\frac{v_2(v_1+b)}{v_1(v_2+b)} \right) \quad (5.18)$$

où a et b sont les constantes de l'équation de Redlich-Kwong.

Pour une transformation adiabatique, on utilise le principe de conservation d'énergie pour un système fermé (équation (5.19)).

$$w = - \Delta u \quad (5.19)$$

Tableau 5.1 : Coefficients de l'équation de la chaleur spécifique (c_p).

GAZ	SYBOLe	c_p A	c_p B	c_p C (MJ/Kg °K)	c_p D
ARGON	Ar	1,0362E-03	5,4450E-04	5,2083E-04	-8,0394
AZOTE	N ₂	1,1120E-03	-4,8430E-07	9,5650E-10	-4,1700E-13
BIOXYDE DE CARBONE	CO ₂	4,4980E-04	1,6680E-06	-1,2730E-09	3,8980E-13
ETHANE	C ₂ H ₆	1,7990E-04	5,9231E-06	-2,3070E-09	2,8975E-13
ETHYLENE	C ₂ H ₄	1,3566E-04	5,5816E-06	-2,9760E-09	6,2562E-13
METHANE	CH ₄	1,2000E-03	3,2490E-06	7,4640E-10	-7,0541E-13
MONOXYDE DE CARBONE	CO	1,1021E-03	-4,5890E-07	9,9580E-10	-4,5390E-13
OXYGENE	O ₂	8,7834E-04	-1,1500E-10	5,4561E-10	-3,3286E-13
PROPANE	C ₃ H ₈	-9,5800E-05	6,9450E-06	-3,5970E-09	7,2899E-13

Enfin, pour une transformation quelconque on retrouve

$$w = \frac{(p_2 v_2 - p_1 v_1)}{(1 - N)} \quad (5.20)$$

C H A P I T R E V I

SCHEMA STRUCTURAL ET DIALOGUE

Le logiciel est conçu de façon modulaire et comprend quatre parties principales:

- Module de dialogue usager - programme
- Banques de données permanentes et provisoires
- Modules de calculs thermodynamiques et de gestion
- Module graphique

Le module de dialogue (CHLOE) [16] sert uniquement d'intermédiaire entre l'usager et toutes les autres parties du programme. Il transmet à l'usager sous forme d'un menu une variété d'actions se situant à différents niveaux. L'usager indique son choix en pointant l'action désirée avec un curseur. Ce choix est saisi à l'écran par CHLOE qui retourne aux modules thermodynamiques un code correspondant à l'action. Selon la complexité de la commande, plusieurs choix peuvent être faits avant d'entrer les caractéristiques du groupe d'actions et d'obtenir un résultat.

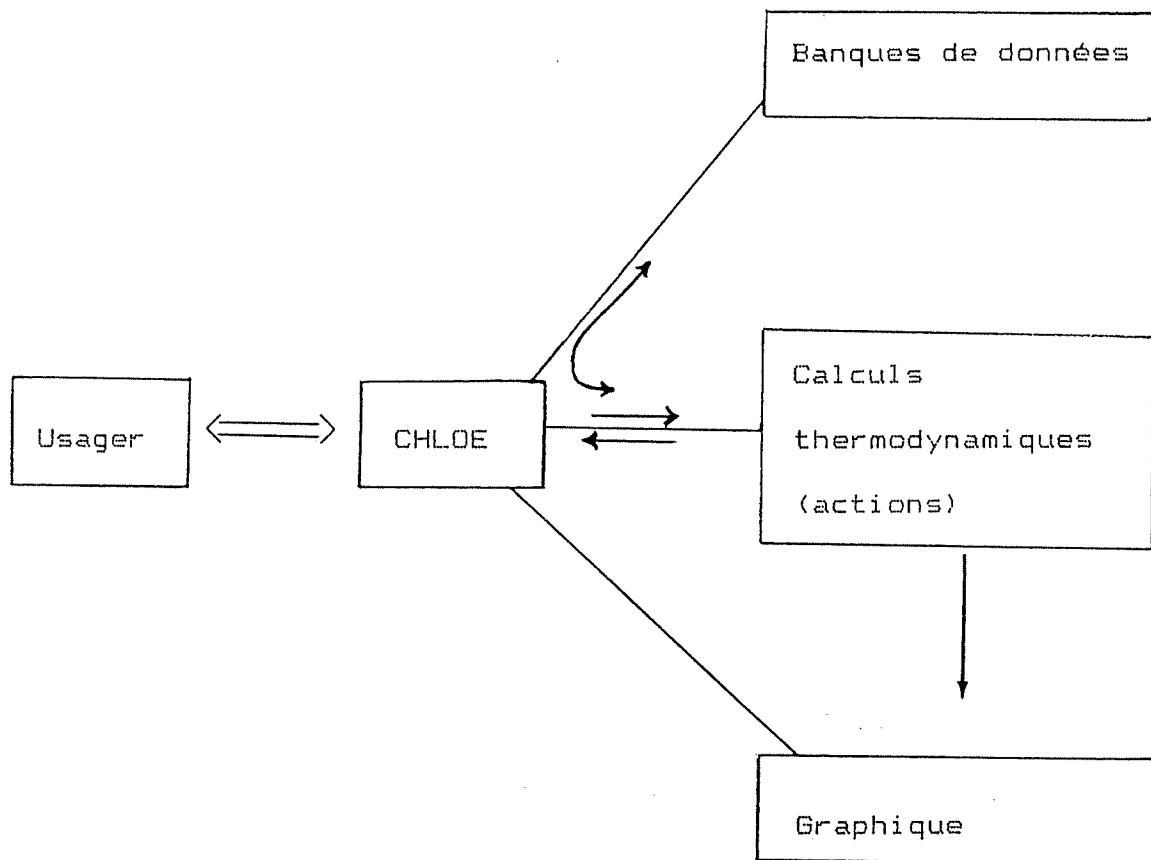


Figure 6.1: Interaction entre le module de dialogue et les autres modules

CHLOE interagit peu avec les modules graphiques et de banques de données. En fait, il permet d'avoir accès aux banques de données et situe les zones d'affichage graphique (l'écran étant entièrement géré par celui-ci).

6.1 SCHEMA STRUCTURAL

L'usager accède aux fonctions du logiciel par l'intermédiaire d'un gérant de menu (CHLOE). Il facilite la délimitation des zones de l'écran l'affichage du menu et le choix d'options en retournant au programme un numéro correspondant au choix.

Cinq fonctions (initialisation, propriétés, processus et gestion) se présentent à l'usager. La première, l'initialisation, consiste à choisir le système d'unités, le gaz (Argon, Méthane...) réel ou parfait parmi une liste proposée.

Toutes informations relatives aux unités et aux gaz forment une banque de données qui peut être enrichie à volonté sans que la structure du programme en soit modifiée.

Pour chacune des trois fonctions de calcul: propriétés, processus et cycles, les résultats obtenus peuvent, au choix de l'usager, être emmagasinés dans des banques de données provisoires. Elles serviront entre autres, aux calculs de processus ou de cycles qui puiseront respectivement dans la banque de propriétés, et dans les banques de propriétés ou de processus (voir Fig. 6.2)

Finalement, la fonction gestion gère ces banques de données provisoires.

Les quatre dernières fonctions mentionnées

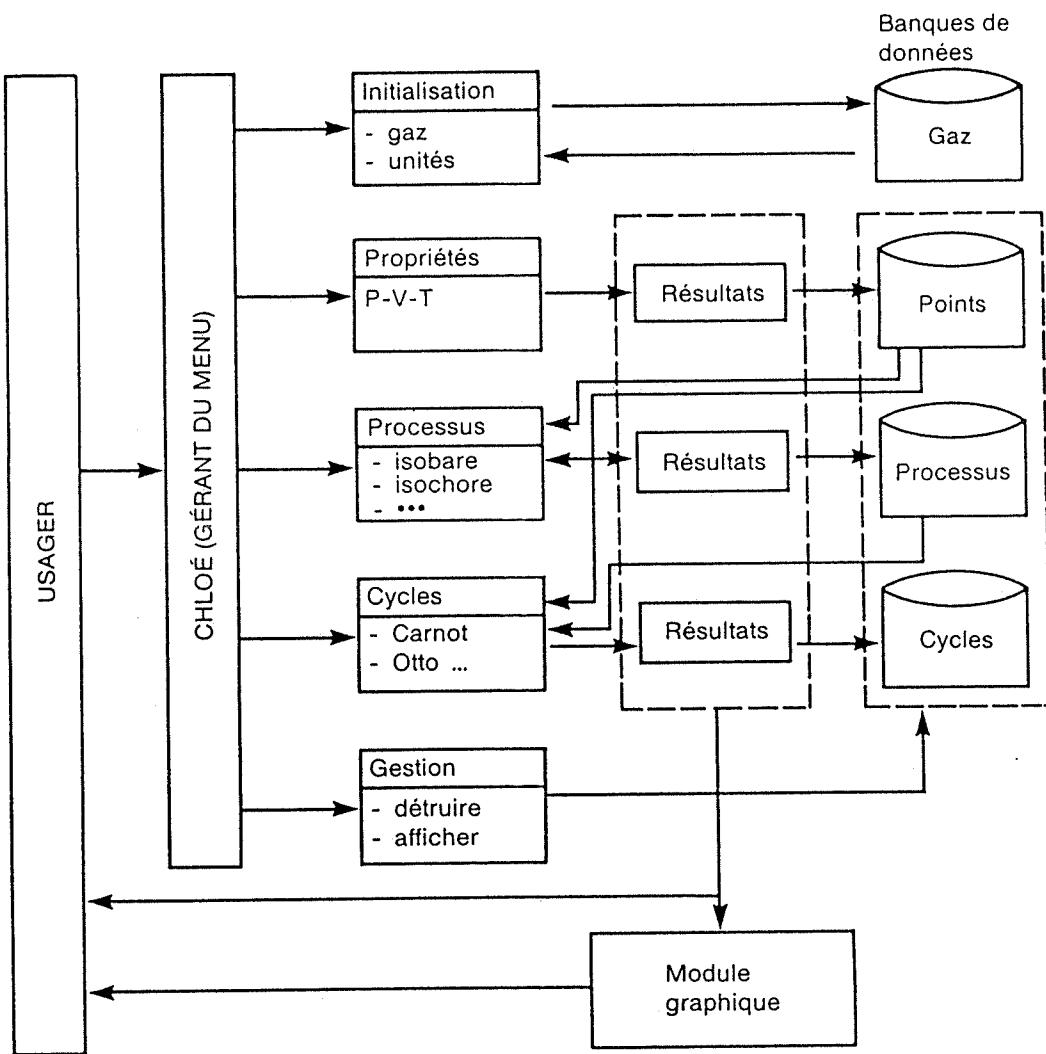


Figure 6.2 : Schéma structural du logiciel.

communiquent toutes avec un module graphique permettant une visualisation des résultats.

Avec toutes ces fonctions disponibles, les banques de données, les banques de résultats, un gérant de menus, on place ainsi l'usager dans un environnement optimale.

6.2 DIALOGUE

Le gérant d'interaction (chloé) contrôle tout le dialogue usager-logiciel. Il propose une série d'actions formant une structure en arbre (Fig. 6.3). L'usager effectue son choix parmi ces commandes.

Préciser de plus en plus l'action, implique descendre de plus en plus dans les ramifications de l'arbre. En certains endroits stratégiques, on demande à l'usager d'entrer des valeurs numériques. Celles-ci sont validées avant de poursuivre la spécification du problème. Lorsque le logiciel a suffisamment d'informations, il effectue les calculs et affiche les résultats numériquement et graphiquement. L'affichage graphique consiste à tracer deux axes ($P = fct (V)$) gradués et annotés, écrire les titres avec le facteur multiplicatif de l'échelle ($P*10^{**}X$), placer des carrés aux endroits où correspondent les points et, s'il y a lieu, relier ces points par des lignes.

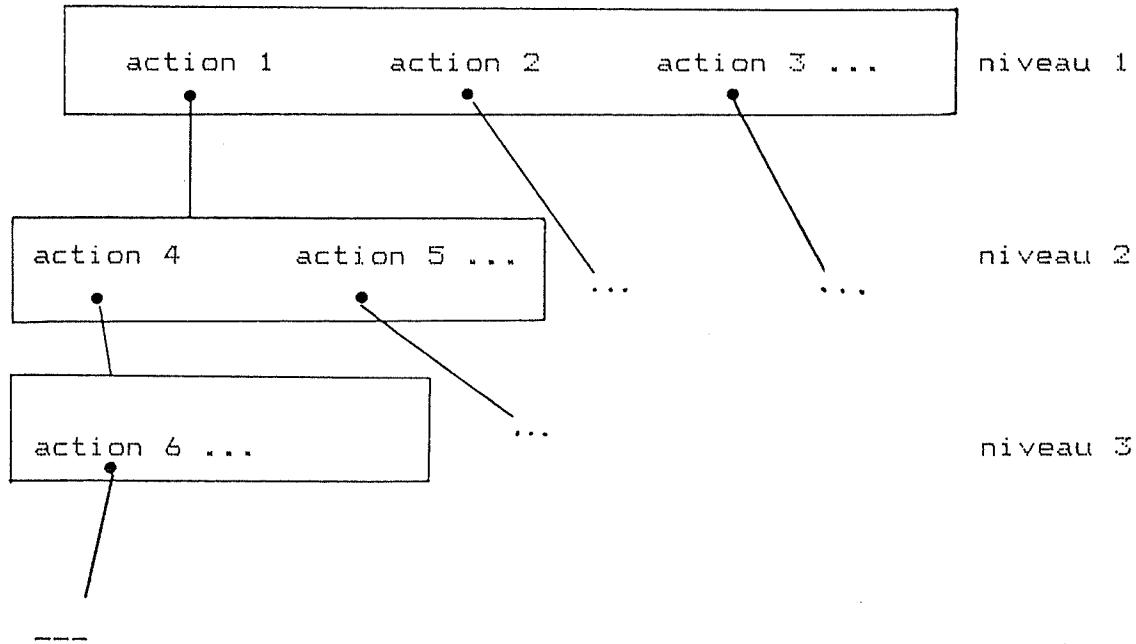


Figure 6.3: Structure en arbre

De ces résultats, l'usager les analyse et, à sa guise, recommence d'autres calculs.

Le support physique du dialogue, se compose:

- d'un écran (Fig. 6.4) servant à l'identification (gaz, unités et titre), la visualisation des résultats et l'affichage des messages
 - d'un clavier utilisé pour entrer les valeurs numériques et répondre aux questions

- d'une souris pour le choix du menu.

6.2.1 L'écran

Typiquement, l'écran se présente de la façon suivante.

A l'extrême gauche, on retrouve la zone de menu. En haut les zones d'identification, c'est-à-dire, le titre et la zone mémo qui rappelle à l'usager le gaz et les unités choisis. C'est au centre que s'affiche les graphiques et les banques de résultats provisoires. Au bas, à gauche, il y a la zone de commandes permanentes telles: STOP, ZOOM et RFRSH, surmontée de la zone d'interaction où apparaissent les messages et les sollicitations du programme. Enfin, dans le coin inférieur droit il y a la zone d'affichage des résultats numériques.

Tout au long de la séance de travail, l'écran garde toujours cette forme.

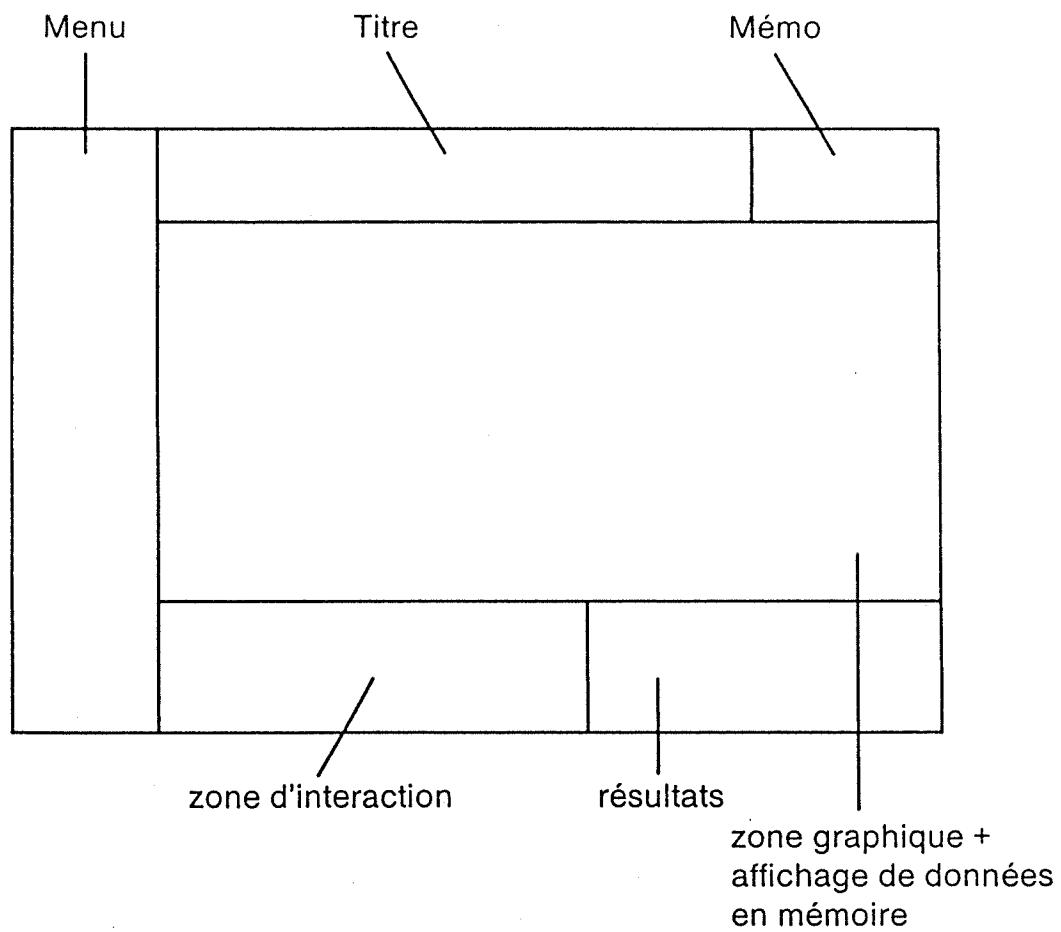


Figure 6.4 : L'écran.

CHAPITRE VII

LE PROGRAMME

Pour chacune des fonctions, on analysera le rôle jouant celles-ci dans l'ensemble du programme et, on décrira de façon globale, leur fonctionnement interne.

Les sous-programmes utilisés se regroupent en 3 grandes familles; les sous programmes:

- graphiques
- utilitaires servant à écrire et à lire à l'écran
- propres au logiciel

Seuls les sous-programmes se rattachant étroitement aux fonctions thermodynamiques seront considérés.

7.1 INITIALISATION

7.1.1 Rôle

La fonction initialisation détermine le gaz (réel ou parfait) et les unités pour les calculs. Une liste de huit gaz et de trois systèmes d'unités est proposée à l'usager (Tableaux 7.1 et 7.2).

Tableau 7.1 : Liste des gaz proposés

GAZ:

Argon (Ar)
Azote (N₂)
Bioxyde de carbone (CO₂)
Ethane (C₂H₆)
Ethylène (C₂H₄)
Méthane (CH₄)
Monoxyde de carbone (CO)
Propane (C₃H₈)

Tableau 7.2 : Liste des systèmes d'unités proposés

UNITES:

SI (MPa, m³/kg, °K)
atm, l/kg, °K
Anglais (Psf, lbm/kg, °K)

En cas de non-initialisation du système, le choix se fixe par défaut à de l'Argon (Ar) réel et au système international d'unités (SI).

7.1.2 Fonctionnement

Selon le choix d'unités effectué, on puise dans la banque de données les facteurs de conversion appropriés (pour la pression, le volume, la température, l'énergie, et l'entropie).

On retrouve également dans cette banque de données les caractéristiques du gaz choisi. Ces caractéristiques sont:

- poids moléculaire
- les paramètres a et b de l'équation de Redlich-Kwong (Eq. 4.19)
- les bornes de pression, volume et température
- la constante R du gaz, (différente pour chaque gaz étant par unité de masse)
- la précision de la méthode de Newton pour le calcul de la température
- coefficient de l'équation de la chaleur spécifique, c_p

La conversion d'unités intervient seulement à ce niveau en multipliant les grandeurs caractéristiques du gaz par les facteurs appropriés.

Chaque fois qu'un nouveau gaz ou que de nouvelles unités sont choisis, les banques de résultats provisoires (points, processus et cycles) se vident.

Dans un mémo, le symbole du gaz, son type (R pour réel et P pour parfait) et les unités de pression, volume,

température et travail sont affichées dans la zone à cet effet.

Au niveau du programme, on observe la même procédure pour un gaz réel ou parfait. Seuls diffèrent les paramètres a et b de l'équation qui, dans le cas d'un gaz parfait, valent zéro.

7.2 PROPRIETES

7.2.1 Rôle

Le calcul d'une propriété d'état d'une substance simple, requiert la connaissance de deux autres grandeurs physiques et d'un modèle de calcul (une équation d'état ou une table). On considère ici comme propriétés primaires la pression, le volume et la température: tous les autres calculs, (enthalpie, entropie ...) en dérivent.

Cette fonction sert de pilier aux fonctions de calcul de processus et de cycles qui en font usage de façon interne pour des calculs intermédiaires.

7.2.2 Fonctionnement

Le programme réclame deux grandeurs connues et les valide après chaque entrée afin qu'elles demeurent à l'intérieur de la zone permise. Pour une entrée non validée, les bornes inférieures et supérieures sont affichées et une nouvelle grandeur est demandée. Ceci,

jusqu'à un test satisfaisant.

D'autres sous-routines sont appelées pour les calculs. Pour la pression, on utilise l'équation de Redlich-Kwong sous la forme de l'équation 4.19. Cette équation exprimée en fonction du volume prend la forme d'un polynôme du 3^e degré (Eq. 7.1).

$$v^3 + c_3v^2 + c_2v + c_1 = 0 \quad (7.1)$$

où $c_3 = \frac{-RT}{p}$ (7.2)

$$c_2 = -b^2 - \frac{RTb}{p} + \frac{a}{p\sqrt{T}} \quad (7.3)$$

$$c_1 = \frac{-ab}{p\sqrt{T}} \quad (7.4)$$

On détermine les racines de façon exacte à l'aide d'une méthode analytique. Dans le cas d'une racine réelle et de deux complexes, le volume à calculer est la racine réelle. Pour trois racines réelles, on considère celle à l'intérieur de la zone permise, cette zone étant assez étroite. Les équations de cette méthode sont:

Pour une racine réelle

$$v = (\sqrt{D} + R)^{1/3} - \frac{Q}{(\sqrt{D} + R)^{1/3}} - \frac{c_3}{3} \quad (7.5)$$

Pour trois racines réelles

$$v_1 = \sqrt[3]{-Q} \cos (\theta/3) - c_3/3 \quad (7.6)$$

$$v_2 = \frac{(-c_3 - v_1 + \sqrt{Discr.})}{2} \quad (7.7)$$

$$v_3 = \frac{(-c_3 - v_1 - \sqrt{Discr.})}{2} \quad (7.8)$$

où

(7.9)

$$Q = \frac{(3c_2 - c_3^2)}{9}$$

$$R = \frac{(9c_3c_2 - 27c_1 - 2c_3^3)}{54} \quad (7.10)$$

$$D = Q^3 + R^2 \quad (7.11)$$

$$\theta = \text{Arc cos} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{-Q^3}} \right) \quad (7.12)$$

$$\text{Discr} = (c_2 + v_1)^2 - 4[c_2 + (c_2 + v_1)v_1] \quad (7.13)$$

Pour le calcul de la température, on ne peut exprimer l'équation 4.19 sous forme linéaire. On doit alors avoir recours à une méthode numérique. Newton-Raphson fût choisi (Eq. 7.14).

$$\Delta T = \frac{f(T)}{f'(T)} \quad (7.14)$$

$$T^{n+1} = T^n - \Delta T \quad (7.15)$$

Elle converge rapidement et donne une bonne précision. Le critère d'arrêt choisi est le suivant:

$$\frac{T^{n+1} - T^n}{T^n} = .01 \quad (7.16)$$

où n+1 et n représentent deux itérations successives.

Une précision de 1% a été jugé satisfaisante, une plus grande précision affectant très peu la valeur de T.

Lorsque le résultat est dans la zone permise, il s'affiche graphiquement. S'il est en dehors de cette zone un signal sonore avertit l'usager. Le résultat peut, à la discréption de l'usager, être conservé ou non.

7.3 PROCESSUS

7.3.1 Rôle

Un processus consiste en une transformation de l'état initial d'une substance. Cette transformation peut être quelconque ou s'effectuer selon des conditions particulières telles:

- pression constante (isobare)
- volume constante (isochore ou isométrique)
- température constante (isotherme)
- sans échange de chaleur (adiabatique ou isentrope, si réversible).

D'autres propriétés thermodynamiques, dérivées des relations de Maxwell et de la première loi, découlent de la connaissance de l'état initial et final de la transformation.

Ces propriétés sont l'enthalpie (H), l'entropie (S), l'énergie interne (U) du système, le travail (W) produit ou reçu et la chaleur (Q) rejetée ou absorbée. On admet la convention d'un signe positif pour un travail effectué et pour de la chaleur rejetée.

Les calculs de cycles se réalisent essentiellement à partir de calculs de processus.

7.3.2 Fonctionnement

Pour tout processus choisi, l'état initial se

détermine par deux paramètres (p et v ou, p et T ou, T et v) ou directement par un point déjà en mémoire. Pour deux paramètres fournis, l'usager les redéfini jusqu'à ce qu'ils soient jugés satisfaisant (dans la zone permise).

La coordonnée du point final est déterminée selon les caractéristiques de la transformation choisie. Des sous-routines d'aiguillage, appellent les blocs de calcul correspondant qui, à leur tour, calculent l'état final, et appellent les énoncés de calcul pour U , H , S , W et Q . L'usager conserve ou non en mémoire le processus. Les résultats sont affichés numériquement et graphiquement.

7.4 CYCLES

7.4.1 Rôle

Les cycles consistent en une série de transformation où le point final coïncide avec le point de départ. L'usager peut soit concevoir son propre cycle ou choisir parmi une liste proposée. Il obtient ainsi le rendement du cycle ainsi que son affichage à l'écran.

7.4.2 Fonctionnement

On demande de fixer un point de départ dans chacun des cas (Carnot, Otto ou quelconque). Pour les cycles connus, l'entrée se fait par la suite de façon standard. On voudra,

pour un cycle de Carnot, connaître les rapports de compression adiabatique et de détente thermique et pour un cycle d'Otto, la température maximum et le rapport de compression adiabatique.

Quant au cycle quelconque, l'usager entre le point initial, en le calculant, le choisissant dans la banque de points ou en choisissant un processus initial en mémoire.

Les autres points sont calculés selon une séquence de processus composée au fur et à mesure par l'usager.

Pour boucler le cycle, l'usager pointe "FIN CYCLE" dans le menu. Trois points n'étant pas sur une même ligne de pression, volume, température ou isentropique sont requis.

Le cycle se trace au fur et à mesure des calculs. Les résultats sont affichés (W_{net} , rendement thermique et point initial).

Le travail d'un cycle se calcule par la sommation des travaux effectués par les processus le composant.

$$W_{net} = \sum_i w_i \quad (7.17)$$

Le rendement thermique s'évalue selon l'équation (7.18) [17].

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{absorbé}} \quad (7.18)$$

Les résultats finaux peuvent être conservés.

7.5 GESTION

7.5.1 Rôle

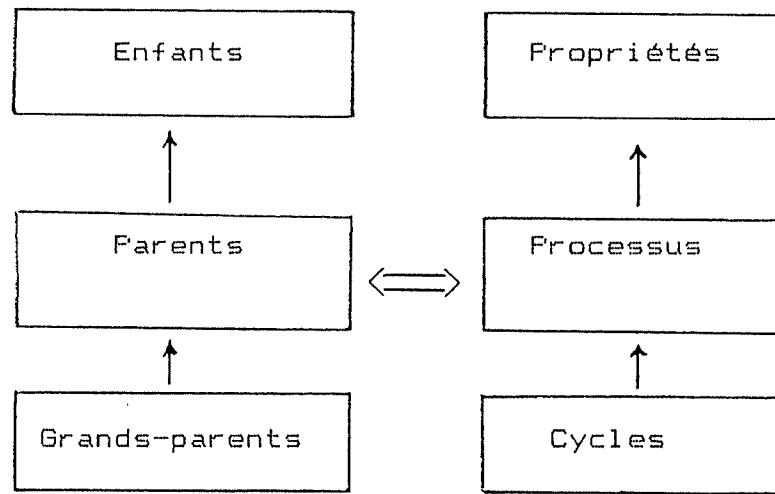
Le module gestion gère les résultats conservés en mémoire indépendamment de la façon dont ils ont été créés. Il permet de les visualiser ou de les détruire.

7.5.2 Fonctionnement

A chacune des fonctions de calcul correspond un espace mémoire où les résultats obtenus peuvent y être conservées. Un lien analogue à une structure parentale (Fig. 7.1) existe entre elles.

Cette analogie peut être perçue de deux façons. On considère dans le premier cas, selon le déroulement des calculs, que les parents engendrent des enfants, c'est-à-dire, qu'un calcul de propriétés crée des points. Vu d'un autre angle, selon la structure des résultats en mémoire, les points sont à l'origine de la composition des processus et des cycles. Ils sont donc les parents ou les grands-parents.

L'une et l'autre aboutissent à un même résultat. Cependant la première se prête mieux à la description du fonctionnement du module de gestion.



ou

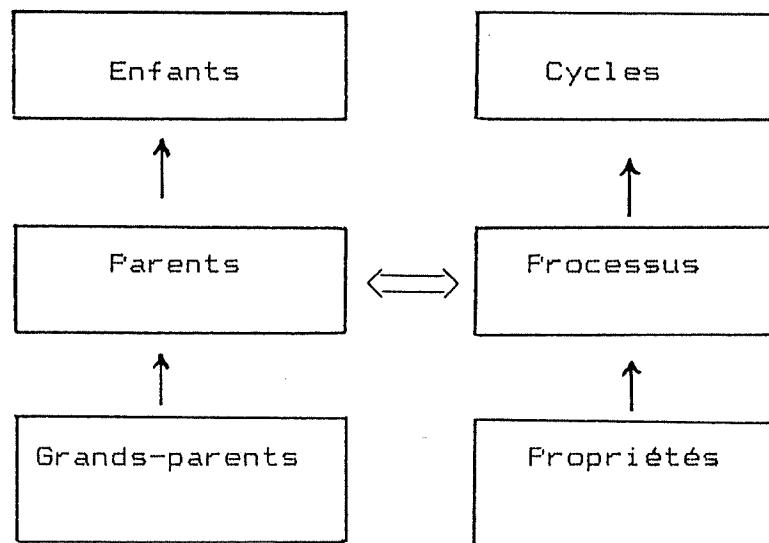


Figure 7.1 : Structure parentale des fonctions de calculs

Donc, si les parents existent, ils engendrent des enfants qui ne peuvent être éliminés tant que ceux-ci

existent. Cependant, un parent peut être détruit sans que cela affecte les enfants. Dans certains cas les enfants sont complètement indépendants des parents.

Exemple d'un calcul de cycle.

Soit un cycle de Carnot (voir Annexe A-2.2) formé de quatre processus et quatre points. La banque de cycles réfère aux numéros des processus le composant eux-mêmes accumulés dans la banque de processus. Ces processus, à leur tour, réfèrent aux numéros des points les constituant contenus dans la banque de points.

On ne peut ainsi détruire un point lié à un cycle sans détruire ce dernier. Cependant l'élimination d'un cycle n'entraîne pas celle des points et processus le formant.

Les structures de données sont illustrées à la figure 7.2.

Un maximum de vingt points, dix processus et de deux à trois cycles peut être conservé.

No	F	V	T
----	---	---	---

Propriétés

No	No point 1	No point 2	H	U	S	W	Q	Type de processus

Processus

No	No des processus	W	R	Type des processus

Cycles

Figure 7.2 : Structure d'informations des banques de résultats

CHAPITRE VIII

RECOMMANDATIONS

Le développement de ce logiciel fut l'objet d'une maîtrise. Ayant été développé dans un but d'enseignement, il serait souhaitable de le tester en l'introduisant auprès des étudiants. Cependant, son implantation doit se faire progressivement.

8.1 UTILISATION

Pour bien rencontrer les objectifs établis, dont principalement accroître la compréhension de la thermodynamique, il est essentiel de faire bon usage du logiciel.

Parceque l'étudiant soumet lui-même son problème, on doit veiller à ce qu'il en expérimente bien toutes les facettes. Une voie trop facile peut être alléchante et bien que peu fructueuse. On recommande donc d'utiliser ce logiciel durant des séances d'exercices dirigées par le professeur ou un démonstrateur. Dans le cas d'utilisation à la maison, un manuel accompagnateur d'exercices est de rigueur.

8.2 IMPLANTATION

Avant d'employer ce logiciel en classe, les professeurs devraient y être introduits. Par la suite, il faudrait le tester auprès d'une classe pilote. Naturellement on s'attend à beaucoup de commentaires et de remarques. Suite à ceci, des modifications s'effectueront afin de mieux répondre aux besoins.

8.3 COMMENTAIRES DES USAGERS

Il serait bon d'analyser spécifiquement les points suivants :

1. Les usagers ont-ils une attention plus élevée (durée)?
2. Les usagers expérimentent-ils vraiment?
3. Quelles variables font-ils jouer?
4. Quelles sont les genres de décisions prises?
5. Quels jugements portent-ils, suite aux résultats numériques et graphiques qu'ils obtiennent?

8.4 ENRICHISSEMENT

Afin de s'adapter encore mieux au cours de thermodynamique de base donné, il serait souhaitable

d'ajouter des modules traitant de la vapeur d'eau (liquide + vapeur), des réfrigérants et des mélanges.

De par sa structure modulaire, greffer de nouveaux modules au logiciel devient facile.

CHAPITRE IX

CONCLUSION

Ce logiciel a été créé dans le but d'apporter un support aux méthodes traditionnelles d'enseignement. Il se veut un outil de calcul facilement accessible aux non-initiés à la programmation et à l'utilisation d'ordinateurs.

Tous les calculs reposent sur l'équation de Redlich-Kwong qui après étude, s'est avérée la plus appropriée à ce type d'application.

De par sa forme et sa structure interne il contribue à un nouvel apport. Par sa modularité, on pourrait aisément ajouter d'autres fonctions telles: les mélanges gazeux, la vapeur d'eau et les réfrigérants.

Ce projet peut être perçu comme un tremplin vers un effort d'assistance par ordinateur dans l'enseignement ou dans le travail quotidien de l'ingénieur.

REF E R E N C E S

1. SEGUIN, Claude, - La production de didacticiels, Gouvernement du Québec, Ministère de l'éducation, Direction générale des moyens d'enseignement, 1984.
2. JOLLS, Kenneth R., - Computer-generated phase diagrams for use in teaching thermodynamics - Final report, Department of Chemical engineering, Engineering Research Institute, Iowa State University, Ames, Juin 1981.
3. SPARKS, J.F., BROWN, E.F., - Thermodynamics tutorial, Computers in education division of ASEE, Application Note, 1979.
4. KLEIN, S.A., and BECKMAN, W.A., - Teaching thermodynamics by the book on a Micro, Computers in Mechanical Engineering, mai 1985, page 24-28.
5. HENDERSON, Douglas, - Practical calculations of the equations of state of fluids and fluid mixtures using perturbations theories, Advances in Chemistry serie 182, American Chemical Society, Washington D.C, 1979.
6. OBERT and YOUNG, - Elements of thermodynamics and heat transfer, Robert E. Krieger publishing Co., Huntington, New York, 1962, page 159-177.
7. TSONOPPOULOS, C. and PRAUSNITZ, J.M. - Equations of state : A review for engineering applications, Cryogenics, Oct., 1969, page 315-325.
8. ELLENWOOD, Frank O., - The specific heats of certain gases over wide ranges of pressures and temperatures, Cornell University engineering experiment station, Oct., 1942.
9. YAMADA, Tomoyoshi - An improved generalized equation of state, AICHE Journal, vol 19, No 2, 1973, page 286.
10. STORVICK and SANDLER, - Phase equilibria and fluid properties in the chemical industry, ACS Symposium séries 60, Washington D.C., 1977, page 150-171 et 326-327.
11. OBERT and YOUNG, - Elements of thermodynamics and heat transfer, Robert E. Krieger publishing Co., Huntington, New York, 1962, page 506.
12. HOKVATH, H.L.,- Redlich-Kwong equation of state : review

for chemical engineering calculations, Chemical Engineering Science, 1974, vol. 29, page 1334-1340. Pergamon Press.

13. ABOTT, Michael M., Cubic Equations of state : An interpretive review, Advances in Chemistry series 182, American Chemical Society, Washington D.C., 1979, page 47.
14. VARGAFTIK, N.B., - Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases, deuxième édition, Hemisphere, Washington, 1975.
15. REID, PRAUSNITZ, SHERWOOD, - The properties of gases and liquids, Mc Graw Hill, troisième édition, 1977.
16. CHLOE ; Manuel de l'usager, Rapport technique, Ecole Polytechnique de Montréal, à paraître.
17. FAIRES, V.M. and SIMMANG, C.M. - Thermodynamics , sixième édition, Macmillan Publishing Co., inc., New York, 1978.

ANNEXE A

COMPARAISON DES RÉSULTATS DE L'ÉQUATION DE REDLICH-KWONG AUX VALEURS CORRESPONDANTES DES TABLES POUR TOUS LES GAZ CHOISIS

Une étude comparative fût réalisée afin d'être en mesure d'évaluer la validité de l'équation choisie parmi une liste de 12 gaz. Cette étude permet également de définir une région de travail optimale.

Exemples:

- Soit du méthane (CH_4) à une pression de 1 bar et une température de 200°K.

On retrouve dans les tables un volume de 1.03 m^3/kg .

Le volume calculé par l'équation de Redlich-Kwong montre une erreur relative de .18% par rapport à 1.03.

- Soit du méthane (CH_4) à une pression de 1 bar et un volume de 1.03 m^3/kg . Les tables donnent une température de 200°K.

L'erreur relative du résultat de l'équation de Redlich-Kwong est de .04%.

TABLE DE PROPRIETES AMMONIAC (NH3)
 PRESSION(BAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M**3/KG)

T\P	5.00	10.00	50.00	100.00	120.00	200.00	400.00	700.00	900.00
320.	0.2997	0.1429	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015
340.	0.3212	0.1551	0.0019	0.0018	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016
360.	0.3422	0.1665	0.0020	0.0020	0.0020	0.0019	0.0018	0.0017	0.0017
400.	0.3835	0.1884	0.0313	0.0087	0.0027	0.0023	0.0020	0.0019	0.0018
440.	0.4241	0.2094	0.0373	0.0155	0.0117	0.0037	0.0024	0.0021	0.0019
500.	0.4843	0.2403	0.0450	0.0207	0.0166	0.0082	0.0033	0.0024	0.0022
560.	0.5439	0.2706	0.0520	0.0243	0.0203	0.0111	0.0048	0.0030	0.0026

Ammoniac

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	5.00	10.00	50.00	100.00	120.00	200.00	400.00
320.	1.09	2.53	34.88	33.91	36.96	32.14	30.29
340.	0.71	1.45	37.14	35.30	35.37	32.98	30.52
360.	0.48	0.91	41.00	38.03	36.36	33.45	30.09
400.	0.09	0.21	2.40	17.01	40.29	35.14	29.64
440.	0.05	0.01	0.27	0.57	1.50	17.31	26.17
500.	0.15	0.19	0.67	2.08	2.52	2.14	15.45
560.	0.18	0.24	0.88	2.15	2.65	2.73	4.56

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	5.00	10.00	50.00	100.00	120.00	200.00	400.00
320.	1.05	2.36	8331.92	4787.04	6078.38	3007.00	2402.44
340.	0.69	1.37	4557.02	2640.97	2458.20	1734.83	1372.37
360.	0.47	0.86	2340.91	1528.24	1316.22	1010.72	820.42
400.	0.19	0.29	1.93	3.75	208.16	335.45	357.01
440.	0.06	0.08	0.27	0.38	0.86	22.53	141.50
500.	0.04	0.10	0.57	1.70	1.98	1.52	29.45
560.	0.06	0.14	0.78	1.89	2.29	2.25	5.25

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	5.00	10.00	50.00	100.00	120.00	200.00	400.00
320.	0.99	2.06	44.20	46.64	54.67	50.64	58.93
340.	0.65	1.23	34.18	36.49	38.39	40.98	48.91
360.	0.45	0.79	24.73	28.35	28.73	32.26	39.84
400.	0.19	0.27	1.32	1.04	10.22	18.52	27.23
440.	0.06	0.07	0.20	0.21	0.40	3.33	16.73
500.	0.04	0.10	0.48	1.20	1.29	0.68	6.63
560.	0.06	0.14	0.69	1.49	1.72	1.36	1.98

Argon

TABLE DE PROPRIETES ARGON (AR)
PRESSION(PAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M**3/KG)

T\P	1.00	45.00	500.00	700.00	800.00	900.00	1000.00
230.	0.4778	0.0098	0.0011	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009
250.	0.5197	0.0109	0.0012	0.0010	0.0010	0.0010	0.0009
300.	0.6241	0.0135	0.0014	0.0012	0.0011	0.0011	0.0010
700.	1.4570	0.0327	0.0034	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020
1300.	2.7060	0.0607	0.0060	0.0044	0.0040	0.0036	0.0033

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	45.00	500.00	700.00	800.00	900.00	1000.00
230.	0.01	0.03	1.72	3.25	3.71	4.03	4.26
250.	0.03	0.12	1.60	3.07	3.60	3.96	4.22
300.	0.03	0.22	1.77	3.00	3.48	3.86	4.15
700.	0.00	0.25	2.65	3.42	3.63	3.88	3.99
1300.	0.01	0.20	1.74	2.37	2.70	2.99	3.31

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	45.00	500.00	700.00	800.00	900.00	1000.00
230.	0.01	0.02	3.81	8.69	10.61	12.20	13.53
250.	0.03	0.11	3.10	7.26	9.14	10.69	12.00
300.	0.03	0.21	2.75	5.67	7.08	8.36	9.53
700.	0.00	0.25	3.06	4.20	4.60	5.09	5.40
1300.	0.01	0.20	1.89	2.67	3.09	3.48	3.92

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	45.00	500.00	700.00	800.00	900.00	1000.00
230.	0.01	0.02	1.83	4.63	5.91	7.09	8.16
250.	0.03	0.10	1.62	4.10	5.38	6.51	7.56
300.	0.03	0.19	1.73	3.67	4.69	5.66	6.60
700.	0.00	0.25	2.89	3.95	4.33	4.79	5.07
1300.	0.01	0.20	1.89	2.67	3.09	3.49	3.94

Azote

TABLE DE PROPRIETES AZOTE (N2)
PRESSION(BAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M**3/KG)

T\P	1.00	25.00	100.00	400.00	700.00	1000.00
150.	0.4426	0.0151	0.0024	0.0015	0.0014	0.0013
300.	0.8902	0.0355	0.0089	0.0028	0.0020	0.0018
450.	1.3360	0.0539	0.0139	0.0041	0.0028	0.0023
600.	1.7810	0.0720	0.0186	0.0054	0.0035	0.0028
750.	2.2270	0.0899	0.0232	0.0066	0.0042	0.0032
900.	2.6720	0.1078	0.0277	0.0077	0.0049	0.0037
1300.	3.8590	0.1554	0.0397	0.0108	0.0066	0.0050

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	25.00	100.00	400.00	700.00	1000.00
150.	0.05	0.87	5.07	1.91	2.79	2.48
300.	0.05	0.47	1.55	3.73	4.80	5.16
450.	0.04	0.41	1.55	4.29	5.59	6.08
600.	0.01	0.35	1.34	4.09	5.45	6.07
750.	0.05	0.30	1.17	3.74	5.09	5.72
900.	0.03	0.25	0.99	3.41	4.73	5.38
1300.	0.03	0.19	0.69	2.69	3.94	4.64

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	25.00	100.00	400.00	700.00	1000.00
150.	0.05	0.72	7.67	7.65	13.54	13.91
300.	0.05	0.47	1.58	5.48	9.37	12.18
450.	0.04	0.41	1.60	5.34	8.38	10.60
600.	0.01	0.36	1.38	4.82	7.34	9.20
750.	0.05	0.30	1.21	4.28	6.47	8.01
900.	0.03	0.25	1.02	3.82	5.79	7.15
1300.	0.03	0.19	0.71	2.93	4.56	5.70

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	25.00	100.00	400.00	700.00	1000.00
150.	0.05	0.52	1.86	3.01	6.91	8.14
300.	0.05	0.45	1.34	4.04	7.20	9.88
450.	0.04	0.40	1.52	4.80	7.58	9.79
600.	0.01	0.35	1.36	4.63	7.08	8.99
750.	0.05	0.30	1.20	4.23	6.43	8.02
900.	0.03	0.25	1.02	3.83	5.84	7.26
1300.	0.03	0.19	0.71	2.97	4.67	5.87

Bioxyde de CarboneTABLE DE PROPRIETES BIOXYDE DE CARBONE (CO2)
PRESSION(BAR) . TEMPERATURE(K) . VOLUME(M**3/KG)

T\P	35.00	200.00	400.00	600.00
310.	0.0138	0.0012	0.0010	0.0010
400.	0.0202	0.0026	0.0015	0.0012
600.	0.0321	0.0055	0.0029	0.0021
800.	0.0434	0.0078	0.0041	0.0029
1000.	0.0543	0.0100	0.0052	0.0037
1400.	0.0762	0.0138	0.0073	0.0051
1800.	0.0979	0.0177	0.0092	0.0064

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	35.00	200.00	400.00	600.00
310.	0.09	11.10	6.68	4.90
400.	0.80	2.84	1.44	1.18
600.	0.80	3.41	4.65	4.62
800.	0.65	2.96	4.72	5.62
1000.	0.47	3.38	4.11	5.16
1400.	0.36	1.81	3.26	4.36
1800.	0.29	1.49	2.71	3.71

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	35.00	200.00	400.00	600.00
310.	0.07	53.68	39.07	30.79
400.	0.75	2.60	2.89	3.25
600.	0.78	3.37	5.28	6.33
800.	0.65	3.02	5.16	6.76
1000.	0.47	3.47	4.45	5.96
1400.	0.36	1.87	3.49	4.86
1800.	0.29	1.54	2.87	4.06

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	35.00	200.00	400.00	600.00
310.	0.05	6.50	7.12	7.12
400.	0.64	1.08	0.97	1.17
600.	0.75	2.67	3.67	4.18
800.	0.63	2.74	4.41	5.60
1000.	0.46	3.34	4.11	5.41
1400.	0.36	1.84	3.41	4.73
1800.	0.29	1.53	2.86	4.05

TABLE DE PROPRIETES ETHANE (C₂H₆)
 PRESSION (BAR), TEMPERATURE (K), VOLUME (M^{**3}/KG)

T\P	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	100.00	250.00	500.00
310.	0.8511	0.1654	0.0797	0.0364	0.0077	0.0029	0.0024	0.0022
330.	0.9072	0.1773	0.0861	0.0403	0.0118	0.0035	0.0026	0.0023
340.	0.9352	0.1832	0.0892	0.0420	0.0131	0.0040	0.0026	0.0023
350.	0.9632	0.1891	0.0923	0.0438	0.0142	0.0046	0.0027	0.0024
400.	1.1025	0.2179	0.1074	0.0520	0.0188	0.0079	0.0033	0.0026
450.	1.2416	0.2464	0.1220	0.0598	0.0226	0.0103	0.0041	0.0029
470.	1.2972	0.2577	0.1278	0.0629	0.0240	0.0112	0.0045	0.0030
500.	1.3805	0.2747	0.1365	0.0674	0.0260	0.0124	0.0050	0.0032

Ethane

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	100.00	250.00	500.00
310.	0.00	0.01	0.13	0.02	2.10	7.65	3.15	0.34
330.	0.02	0.06	0.18	0.56	0.07	8.62	4.09	0.18
340.	0.02	0.08	0.20	0.40	0.54	6.63	4.08	0.02
350.	0.02	0.10	0.23	0.45	0.86	3.92	4.30	0.22
400.	0.02	0.12	0.26	0.51	1.10	1.03	3.00	0.01
450.	0.02	0.12	0.24	0.47	1.09	1.61	0.34	0.50
470.	0.02	0.11	0.23	0.44	1.03	1.61	0.53	0.59
500.	0.03	0.10	0.20	0.40	0.96	1.60	1.31	0.83

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	100.00	250.00	500.00
310.	0.00	0.01	0.12	0.02	0.44	28.68	16.77	1.97
330.	0.02	0.06	0.17	0.48	0.04	15.92	17.25	0.91
340.	0.02	0.08	0.19	0.35	0.35	8.26	15.20	0.08
350.	0.02	0.10	0.21	0.41	0.60	3.60	14.29	0.96
400.	0.02	0.12	0.26	0.48	0.93	0.81	5.95	0.04
450.	0.02	0.12	0.23	0.45	0.99	1.40	0.48	1.24
470.	0.02	0.11	0.22	0.43	0.95	1.44	0.70	1.33
500.	0.03	0.10	0.20	0.39	0.90	1.48	1.62	1.71

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	100.00	250.00	500.00
310.	0.00	0.01	0.11	0.02	0.12	3.31	3.26	0.60
330.	0.02	0.06	0.15	0.38	0.02	2.46	3.67	0.29
340.	0.02	0.08	0.17	0.28	0.18	1.58	3.43	0.03
350.	0.02	0.09	0.19	0.33	0.34	0.86	3.40	0.33
400.	0.02	0.12	0.24	0.42	0.65	0.39	1.92	0.01
450.	0.02	0.11	0.22	0.41	0.77	0.86	0.21	0.56
470.	0.02	0.11	0.21	0.39	0.77	0.94	0.33	0.63
500.	0.03	0.10	0.19	0.36	0.75	1.04	0.86	0.87

EthanolTABLE DE PROPRIETES ETHANOL(96%) (C₂H₆O)
PRESSION(BAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M³/KG)

T\P	1.00	35.00	60.00	70.00	80.00	100.00	350.00
533.	1.0590	0.0247	0.0112	0.0082	0.0048	0.0025	0.0017
553.	1.0900	0.0265	0.0131	0.0102	0.0080	0.0045	0.0018
573.	1.1290	0.0281	0.0144	0.0116	0.0094	0.0063	0.0019
623.	1.2290	0.0316	0.0170	0.0141	0.0119	0.0089	0.0023

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	35.00	60.00	70.00	80.00	100.00	350.00
533.	9.69	10.40	12.72	18.52	16.49	26.90	22.53
553.	8.92	10.82	13.74	16.17	20.68	12.48	21.18
573.	8.85	10.49	13.16	14.92	17.07	20.17	19.07
623.	8.87	9.86	11.61	12.59	13.67	15.97	9.76

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	35.00	60.00	70.00	80.00	100.00	350.00
533.	9.65	8.35	6.98	6.90	5.44	79.19	200.84
553.	8.88	9.01	9.03	9.15	9.70	7.49	149.70
573.	8.81	8.97	9.49	9.85	10.20	10.73	106.72
623.	8.85	8.82	9.45	9.84	10.27	11.26	30.61

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	35.00	60.00	70.00	80.00	100.00	350.00
533.	10.59	6.47	3.59	2.74	1.18	7.01	24.43
553.	9.68	7.33	5.48	4.77	4.23	1.78	20.85
573.	9.60	7.53	6.30	5.85	5.36	4.16	17.15
623.	9.66	7.84	7.14	6.96	6.78	6.43	7.32

TABLE DE PROPRIETES ETHYLENE (C₂H₄)
 PRESSION(BAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M^{**3}/KG)

T\P	1.00	50.00	100.00	200.00	400.00	500.00	600.00	800.00
298.	0.8787	0.0111	0.0030	0.0025	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020
323.	0.9536	0.0143	0.0045	0.0028	0.0025	0.0023	0.0022	0.0020
348.	1.0284	0.0168	0.0065	0.0032	0.0027	0.0024	0.0023	0.0021
373.	1.1030	0.0190	0.0081	0.0038	0.0030	0.0025	0.0024	0.0022
398.	1.1776	0.0210	0.0094	0.0044	0.0033	0.0027	0.0025	0.0023
423.	1.2520	0.0230	0.0106	0.0050	0.0037	0.0028	0.0026	0.0024

Ethylène

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	50.00	100.00	200.00	400.00	500.00	600.00	800.00
298.	0.23	0.22	11.30	5.52	1.92	1.16	0.69	0.22
323.	0.24	0.88	4.66	5.61	4.70	3.62	0.43	0.12
348.	0.24	0.94	0.06	4.68	6.89	0.73	0.14	0.49
373.	0.24	0.93	0.86	2.97	9.44	0.40	0.17	0.84
398.	0.24	0.94	1.14	1.32	12.04	0.03	0.52	1.19
423.	0.23	0.91	1.30	0.09	14.50	0.37	0.89	1.55

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	50.00	100.00	200.00	400.00	500.00	600.00	800.00
298.	0.09	0.11	27.41	23.49	9.96	6.32	3.90	1.30
323.	0.09	0.61	3.89	15.60	16.29	14.10	1.97	0.67
348.	0.09	0.72	0.05	8.93	18.90	2.64	0.56	2.19
373.	0.08	0.76	0.66	4.28	21.16	1.23	0.56	3.25
398.	0.09	0.80	0.94	1.62	22.86	0.09	1.52	4.06
423.	0.08	0.79	1.12	0.12	24.19	0.86	2.32	4.73

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	50.00	100.00	200.00	400.00	500.00	600.00	800.00
298.	0.09	0.05	3.54	4.11	2.59	1.87	1.27	0.49
323.	0.09	0.35	0.95	3.34	5.58	5.19	0.70	0.27
348.	0.09	0.48	0.02	2.39	7.46	0.94	0.22	0.95
373.	0.08	0.54	0.33	1.43	9.62	0.48	0.23	1.51
398.	0.09	0.61	0.54	0.65	11.89	0.04	0.68	2.00
423.	0.08	0.63	0.72	0.06	14.23	0.39	1.11	2.45

Hydrogène

TABLE DE PROPRIETES HYDROGENE (H2)
PRESSION(BAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M***3/KG)

T\P	1.00	10.00	20.00	100.00	250.00	500.00	1000.00
200.	16.6400	1.6738	0.8425	0.1786	0.0804	0.0485	0.0325
240.	19.9670	2.0082	1.0106	0.2132	0.0945	0.0555	0.0359
300.	24.9580	2.4660	1.2617	0.2643	0.1152	0.0657	0.0410
350.	29.1160	2.9253	1.4703	0.3065	0.1322	0.0742	0.0452
400.	33.2730	3.3416	1.6788	0.3485	0.1491	0.0827	0.0511
450.	37.4310	3.7577	1.8870	0.3904	0.1660	0.0911	0.0535
500.	41.5880	4.1737	2.0951	0.4322	0.1827	0.0995	0.0576

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	10.00	20.00	100.00	250.00	500.00	1000.00
200.	0.02	0.07	0.17	0.82	1.69	2.63	5.15
240.	0.02	0.03	0.09	0.51	1.20	2.15	4.59
300.	0.02	1.74	0.03	0.30	0.79	1.80	3.98
350.	0.02	0.00	0.02	0.21	0.65	1.56	3.66
400.	0.02	0.01	0.00	0.17	0.56	1.41	0.13
450.	0.02	0.01	0.00	0.13	0.46	1.29	3.29
500.	0.02	0.01	0.00	0.12	0.46	1.21	3.14

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	10.00	20.00	100.00	250.00	500.00	1000.00
200.	0.02	0.07	0.17	0.90	2.14	4.30	12.13
240.	0.02	0.03	0.09	0.55	1.47	3.19	9.53
300.	0.02	1.75	0.03	0.32	0.93	2.49	7.25
350.	0.02	0.00	0.02	0.23	0.75	2.06	6.18
400.	0.02	0.01	0.00	0.18	0.64	1.80	0.20
450.	0.02	0.01	0.00	0.14	0.51	1.61	5.00
500.	0.02	0.01	0.00	0.12	0.51	1.48	4.60

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	10.00	20.00	100.00	250.00	500.00	1000.00
200.	0.02	0.07	0.17	0.86	1.95	3.78	9.97
240.	0.02	0.03	0.09	0.53	1.37	2.90	8.15
300.	0.02	1.72	0.03	0.31	0.89	2.32	6.44
350.	0.02	0.00	0.02	0.22	0.73	1.96	5.61
400.	0.02	0.01	0.00	0.17	0.62	1.72	0.20
450.	0.02	0.01	0.00	0.14	0.50	1.55	4.65
500.	0.02	0.01	0.00	0.12	0.50	1.44	4.31

TABLE DE PROPRIETES METHANE (CH4)
PRESSION(BAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M**3/KG)

T\P	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	80.00	100.00	500.00	1000.00
200.	1.0300	0.2007	0.0969	0.0447	0.0117	0.0042	0.0038	0.0027	0.0025
300.	1.5520	0.3083	0.1528	0.0751	0.0286	0.0171	0.0133	0.0037	0.0029
340.	1.7600	0.3506	0.1744	0.0863	0.0336	0.0205	0.0162	0.0041	0.0031
360.	1.8640	0.3716	0.1851	0.0918	0.0360	0.0221	0.0175	0.0044	0.0033
400.	2.0720	0.4136	0.2064	0.1027	0.0406	0.0252	0.0201	0.0049	0.0035
500.	2.5910	0.5183	0.2591	0.1296	0.0519	0.0325	0.0261	0.0062	0.0041
600.	3.1100	0.6225	0.3116	0.1561	0.0628	0.0395	0.0318	0.0075	0.0047
700.	3.6290	0.7266	0.3638	0.1825	0.0736	0.0464	0.0374	0.0087	0.0053
800.	4.1470	0.8306	0.4160	0.2087	0.0843	0.0532	0.0428	0.0099	0.0059
900.	4.6660	0.9450	0.4681	0.2348	0.0949	0.0599	0.0482	0.0111	0.0066
1000.	5.1840	1.0380	0.5201	0.2610	0.1055	0.0666	0.0536	0.0122	0.0072

Méthane

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	80.00	100.00	500.00	1000.00
200.	0.18	0.21	0.30	0.46	2.15	10.78	8.45	0.29	1.33
300.	0.17	0.16	0.16	0.23	0.29	0.13	0.10	0.23	1.96
340.	0.17	0.17	0.19	0.22	0.33	0.32	0.26	0.00	2.17
360.	0.17	0.16	0.20	0.23	0.35	0.37	0.35	0.26	2.25
400.	0.18	0.16	0.22	0.22	0.38	0.47	0.53	0.88	2.44
500.	0.18	0.20	0.21	0.31	0.52	0.70	0.78	2.42	3.15
600.	0.20	0.20	0.25	0.34	0.60	0.82	0.95	3.31	4.11
700.	0.21	0.21	0.25	0.39	0.67	0.92	1.07	3.73	4.98
800.	0.20	0.22	0.27	0.39	0.70	0.98	1.15	3.92	5.61
900.	0.22	1.33	0.28	0.37	0.72	1.01	1.18	4.00	6.02
1000.	0.21	0.19	0.28	0.41	0.77	1.02	1.21	3.98	6.24

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	80.00	100.00	500.00	1000.00
200.	0.04	0.12	0.22	0.36	0.92	21.08	23.81	1.71	8.75
300.	0.02	0.06	0.08	0.16	0.23	0.10	0.11	0.47	6.68
340.	0.02	0.07	0.11	0.16	0.27	0.28	0.23	0.04	6.23
360.	0.02	0.05	0.11	0.16	0.30	0.33	0.31	0.48	6.01
400.	0.03	0.05	0.13	0.15	0.33	0.43	0.50	1.41	5.77
500.	0.02	0.09	0.12	0.24	0.47	0.66	0.75	3.28	5.99
600.	0.03	0.08	0.15	0.26	0.55	0.79	0.93	4.18	6.83
700.	0.04	0.09	0.15	0.31	0.61	0.89	1.06	4.53	7.57
800.	0.03	0.09	0.16	0.30	0.64	0.94	1.13	4.63	8.03
900.	0.04	1.20	0.17	0.28	0.67	0.98	1.16	4.65	8.25
1000.	0.03	0.06	0.16	0.31	0.71	0.98	1.19	4.56	8.27

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	5.00	10.00	20.00	50.00	80.00	100.00	500.00	1000.00
200.	0.04	0.11	0.20	0.27	0.34	2.68	3.18	0.55	4.06
300.	0.02	0.06	0.07	0.15	0.19	0.07	0.07	0.23	3.94
340.	0.02	0.07	0.10	0.15	0.23	0.22	0.17	0.02	3.95
360.	0.02	0.05	0.11	0.15	0.26	0.27	0.24	0.28	3.93
400.	0.03	0.05	0.12	0.14	0.30	0.37	0.41	0.91	4.00
500.	0.02	0.09	0.11	0.23	0.44	0.61	0.68	2.52	4.66
600.	0.03	0.08	0.15	0.25	0.53	0.75	0.88	3.56	5.80
700.	0.04	0.09	0.14	0.31	0.60	0.87	1.02	4.10	6.84
800.	0.03	0.09	0.16	0.30	0.64	0.93	1.11	4.35	7.58
900.	0.04	1.22	0.17	0.28	0.66	0.96	1.14	4.47	8.02
1000.	0.03	0.06	0.16	0.31	0.71	0.97	1.18	4.46	8.21

Monoxyde de CarboneTABLE DE PROPRIETES MONOXYDE DE CARBONE (CO)
PRESSION(BAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M**3/KG)

T\P	1.00	10.00	40.00	70.00	100.00
280.	0.8310	0.0827	0.0204	0.0120	0.0081
300.	0.8900	0.0888	0.0221	0.0126	0.0088
350.	1.0400	0.1040	0.0261	0.0150	0.0106
400.	1.1870	0.1190	0.0300	0.0173	0.0123
500.	1.4850	0.1490	0.0377	0.0219	0.0155
1000.	2.9700	0.2980	0.0750	0.0436	0.0308
1500.	4.4540	0.4470	0.1130	0.0649	0.0458
2000.	5.9380	0.5950	0.1500	0.0861	0.0607
2500.	7.4200	0.7430	0.1870	0.1074	0.0755
3000.	8.9070	0.8920	0.2240	0.1285	0.0903

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	10.00	40.00	70.00	100.00
280.	0.08	0.22	0.57	4.40	1.16
300.	0.01	0.21	0.66	1.07	0.89
350.	0.14	0.25	0.78	1.15	1.57
400.	0.01	0.19	0.69	1.04	1.82
500.	0.06	0.19	0.66	1.45	1.61
1000.	0.05	0.16	0.07	1.02	1.16
1500.	0.04	0.22	0.76	0.69	0.93
2000.	0.03	0.09	0.48	0.48	0.74
2500.	0.00	0.02	0.32	0.46	0.51
3000.	0.03	0.08	0.22	0.29	0.37

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	10.00	40.00	70.00	100.00
280.	0.08	0.21	0.56	4.33	1.16
300.	0.01	0.21	0.65	1.06	0.90
350.	0.14	0.25	0.78	1.17	1.61
400.	0.01	0.19	0.69	1.06	1.87
500.	0.06	0.19	0.66	1.48	1.66
1000.	0.05	0.16	0.07	1.04	1.19
1500.	0.04	0.22	0.76	0.70	0.95
2000.	0.03	0.09	0.48	0.48	0.75
2500.	0.00	0.02	0.32	0.46	0.52
3000.	0.03	0.08	0.22	0.30	0.37

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	10.00	40.00	70.00	100.00
280.	0.08	0.21	0.50	3.81	0.92
300.	0.01	0.21	0.60	0.93	0.74
350.	0.14	0.25	0.74	1.07	1.42
400.	0.01	0.18	0.67	0.99	1.73
500.	0.06	0.19	0.65	1.44	1.60
1000.	0.05	0.16	0.07	1.04	1.20
1500.	0.04	0.22	0.77	0.71	0.95
2000.	0.03	0.09	0.48	0.48	0.75
2500.	0.00	0.02	0.32	0.46	0.52
3000.	0.03	0.08	0.22	0.30	0.37

TABLE DE PROPRIETES OXYGENE (O2)
 PRESSION(BAR), TEMPERATURE(K), VOLUME(M**3/KG)

T\P	1.00	10.00	80.00	200.00	500.00	700.00	900.00	1000.00
200.	0.5181	0.0504	0.0049	0.0017	0.0012	0.0011	0.0010	0.0010
260.	0.6748	0.0668	0.0078	0.0030	0.0015	0.0013	0.0012	0.0018
300.	0.7790	0.0775	0.0094	0.0037	0.0018	0.0015	0.0014	0.0013
400.	1.0390	0.1039	0.0130	0.0054	0.0025	0.0020	0.0017	0.0016
900.	2.3390	0.2345	0.0298	0.0123	0.0054	0.0040	0.0033	0.0031
1100.	2.8590	0.2865	0.0364	0.0150	0.0064	0.0048	0.0039	0.0036
1300.	3.3780	0.3385	0.0429	0.0176	0.0075	0.0056	0.0045	0.0042

Oxygène

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	10.00	80.00	200.00	500.00	700.00	900.00	1000.00
200.	0.03	0.22	0.66	4.23	1.38	2.49	2.67	2.74
260.	0.04	0.18	0.67	0.73	1.75	2.93	3.73	3.94
300.	0.03	0.15	0.61	1.42	2.35	3.22	3.86	4.13
400.	0.00	0.10	0.61	1.67	3.31	4.08	4.57	4.76
900.	0.02	0.11	0.51	1.20	3.09	4.04	4.65	4.88
1100.	0.03	0.08	0.44	1.00	2.65	3.59	4.26	4.53
1300.	0.01	0.07	0.37	0.90	2.29	3.18	3.89	4.15

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	10.00	80.00	200.00	500.00	700.00	900.00	1000.00
200.	0.03	0.21	0.51	6.61	4.25	8.92	10.69	11.46
260.	0.04	0.17	0.62	0.77	3.31	6.76	9.85	11.00
300.	0.03	0.15	0.59	1.48	3.71	6.20	8.54	9.69
400.	0.00	0.10	0.61	1.76	4.32	6.13	7.75	8.50
900.	0.02	0.11	0.52	1.25	3.47	4.76	5.74	6.17
1100.	0.03	0.08	0.45	1.04	2.92	4.12	5.08	5.50
1300.	0.01	0.07	0.38	0.94	2.50	3.58	4.52	4.91

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	10.00	80.00	200.00	500.00	700.00	900.00	1000.00
200.	0.03	0.20	0.28	2.04	1.68	4.08	5.39	6.02
260.	0.04	0.17	0.48	0.45	1.76	3.85	6.01	6.91
300.	0.03	0.14	0.50	1.03	2.30	3.95	5.70	6.61
400.	0.00	0.10	0.56	1.49	3.37	4.77	6.10	6.75
900.	0.02	0.11	0.52	1.24	3.41	4.69	5.67	6.10
1100.	0.03	0.08	0.45	1.03	2.91	4.12	5.11	5.54
1300.	0.01	0.07	0.38	0.93	2.50	3.60	4.58	4.98

TABLE DE PROPRIETES PROPANE (C3H8)
PRESSION (BAR), TEMPERATURE (K), VOLUME (M***3/KG)

T\P	1.00	5.00	10.00	25.00	50.00	70.00	80.00	90.00	100.00	
370.	0.6920	0.1337	0.0638	0.0210	0.0033	0.0026	0.0026	0.0025	0.0025	Propane
400.	0.7490	0.1459	0.0704	0.0248	0.0087	0.0041	0.0035	0.0032	0.0030	
440.	0.8257	0.1619	0.0790	0.0291	0.0122	0.0075	0.0061	0.0050	0.0045	
500.	0.9393	0.1857	0.0914	0.0349	0.0159	0.0108	0.0091	0.0079	0.0070	
560.	1.0537	0.2091	0.1035	0.0402	0.0189	0.0133	0.0114	0.0100	0.0089	
600.	1.1290	0.2245	0.1113	0.0435	0.0208	0.0147	0.0127	0.0112	0.0100	

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LE VOLUME

T\P	1.00	5.00	10.00	25.00	50.00	70.00	80.00	90.00	100.00
370.	0.02	0.04	0.09	1.30	9.07	15.13	14.22	11.51	10.69
400.	0.03	0.00	0.02	0.08	0.70	7.41	9.98	10.18	11.00
440.	0.03	0.03	0.14	0.39	0.12	1.88	1.32	1.99	2.17
500.	0.04	0.13	0.23	0.73	0.43	2.41	2.37	2.37	2.29
560.	0.04	0.15	0.25	0.65	0.10	2.01	2.33	2.58	2.80
600.	0.01	0.11	0.13	0.36	0.12	1.46	1.70	1.99	2.31

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA PRESSION

T\P	1.00	5.00	10.00	25.00	50.00	70.00	80.00	90.00	100.00
370.	0.02	0.04	0.08	0.93	16.06	64.62	67.83	56.10	54.56
400.	0.02	0.00	0.02	0.07	0.34	6.34	14.60	20.07	26.79
440.	0.03	0.02	0.14	0.34	0.08	1.22	0.90	1.59	2.09
500.	0.04	0.13	0.22	0.67	0.36	1.96	1.91	1.93	1.93
560.	0.04	0.15	0.25	0.62	0.09	1.79	2.06	2.29	2.50
600.	0.01	0.11	0.13	0.35	0.11	1.34	1.55	1.83	2.13

POURCENTAGE D'ERREUR SUR LA TEMPERATURE

T\P	1.00	5.00	10.00	25.00	50.00	70.00	80.00	90.00	100.00
370.	0.02	0.03	0.07	0.57	1.51	5.62	6.26	5.71	5.90
400.	0.02	0.00	0.02	0.05	0.13	1.13	2.28	3.03	3.98
440.	0.03	0.02	0.12	0.26	0.05	0.51	0.32	0.48	0.58
500.	0.04	0.12	0.21	0.56	0.25	1.18	1.07	1.00	0.94
560.	0.04	0.14	0.24	0.54	0.07	1.26	1.39	1.47	1.55
600.	0.01	0.11	0.12	0.31	0.09	1.01	1.12	1.28	1.44

ANNEXE B

EXEMPLES

Voici quelques exemples permettant de mieux saisir le fonctionnement du logiciel.

B.1 Soit 1 kg d'azote à 1.134 MPa et 180°C est comprimé dans un processus adiabatique réversible jusqu'à 5.171 MPa.

Calculer le travail et la température finale.

Utilisons THERMO-MAITRE pour résoudre ce problème.

Tout d'abord initialisons le système en choisissant le gaz et les unités.

*INITIALIS. PROPRIETES PROCESSEUS CYCLES GESTION	THERMO-MAITRE 2.0	CHLOE 1.1	N2 R
			P=MPa V=m**3/Kg
			T=K W=MJ/Kg

Figure B-1 : Choix de gaz

On pique dans le menu principal "INITIALIS" à l'extrême gauche de l'écran, suivi de "GAZ REELS" et de "AZOTE" dans la liste de gaz. Rappelons que, par défaut, le système d'unité est le système international.

Si on désire travailler avec des degrés Rankine, une pression en lb/pi² et un volume en pi³/lbm, on choisit à ce moment "UNITES" puis "ANGLAIS".

On retrouve dans la zone mémo les choix effectués.

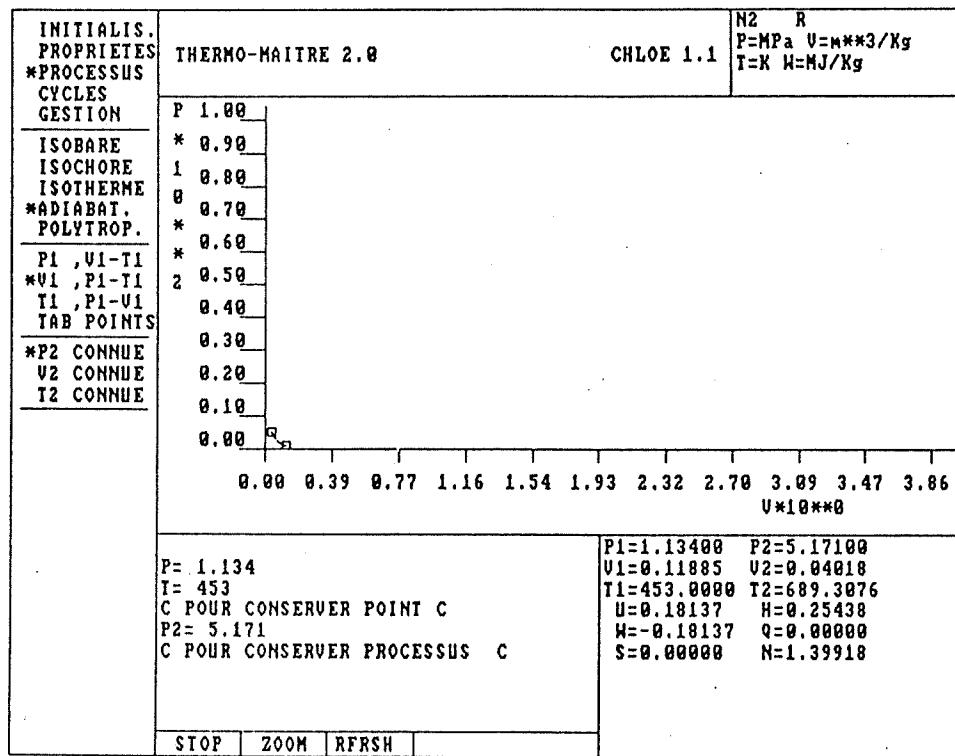


Figure B-2 : Calcul d'un processus

On veut calculer un processus adiabatique, on pique donc dans le menu principal l'item "PROCESSUS", puis, "ADIABATIQUE". L'état initial est déterminé par deux propriétés connues (volume, pression, température), ou par un calcul de propriétés déjà en mémoire.

Dans ce problème on évalue le volume du point de départ connaissant P_1 et T_1 . On choisit donc, "V1, P1-T1".

Dans la zone de messages, THERMO-MAITRE sollicite alors l'usage pour la pression et la température.

On entre : $P = 1.134$

$T = 453$

Ces valeurs sont testées.

Une fois le calcul effectué et les résultats affichés, on répond "C", pour conserver le point. Selon son choix, l'usager peut ne pas vouloir conserver ce résultat et appuie "RETURN".

Revenant au menu, on indique une coordonnée de l'état final connue, ici: " P2 CONNUE". On entre la valeur de P_2 , 5.171 et une fois le calcul effectué et les résultats affichés, on entre "C" pour conserver le processus (sinon RETURN).

Si l'état initial n'a pas été conservé lors du calcul, il le sera ainsi que l'état final lorsqu'on conserve le processus.

On peut effectuer un zoom en piquant "ZOOM" au bas.

On demandera de piquer dans la zone graphique les coins inférieur gauche et supérieur droit de la nouvelle fenêtre. (Voir Fig. B-3).

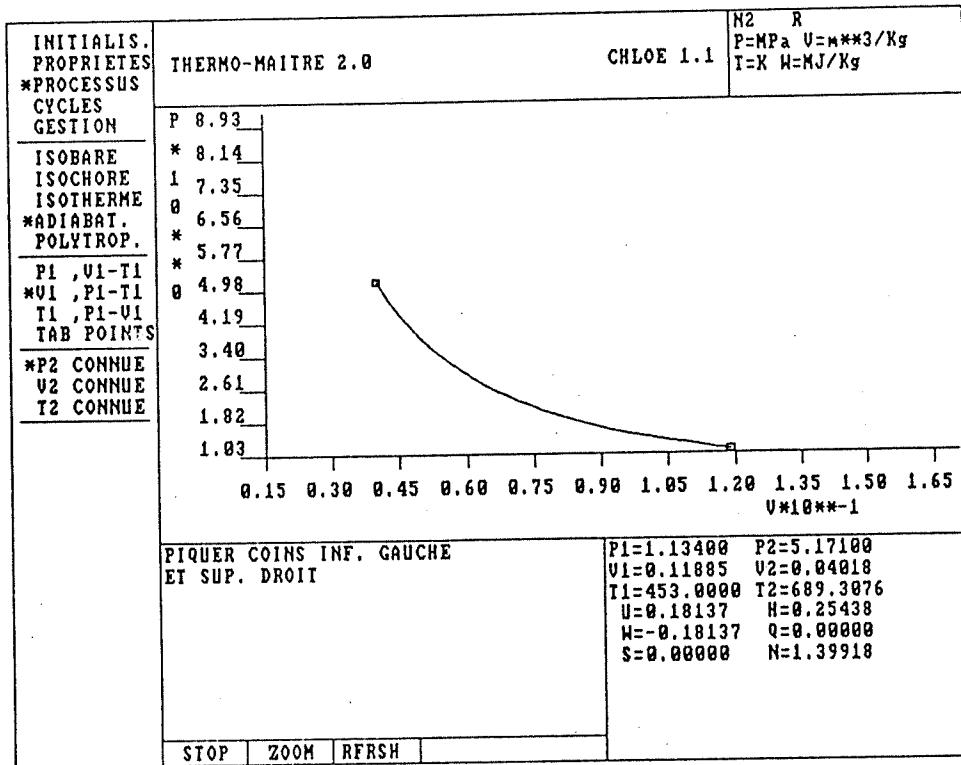


Figure B.3 : Zoom sur un processus

Avec la fonction "GESTION", on peut vérifier les points, les processus ou les cycles en mémoire tel qu'illustrés à la figure B-4.

<u>INITIALIS.</u> <u>PROPRIETES</u> <u>PROCESSUS</u> <u>CYCLES</u> <u>*GESTION</u> <u>*TAB POINTS</u> <u>TAB PROC</u> <u>TAB CYCLE</u> <u>DETRUIRE</u> <u>AFFICHER</u>	THERMO-MAITRE 2.0				CHLOE 1.1	N2 R P=MPa V=m**3/Kg T=X H=MJ/Kg
	NO P V T					
	1 1.13400 0.11885 453.0000					
	2 5.17100 0.04018 689.3076					
PIQUER COINS INF. GAUCHE ET SUP. DROIT				P1=1.13400 P2=5.17100 V1=0.11885 V2=0.04018 T1=453.0000 T2=689.3076 U=0.18137 H=0.25438 W=-0.18137 Q=0.00000 S=0.00000 N=1.39918		
STOP		ZOOM	RFRSH			

Figure B-4 : Banque de résultats des points

Avec TAB PROC on peut examiner les processus,
(Fig. B-5).

INITIALIS. PROPRIETES PROCESSUS CYCLES *GESTION TAB POINTS *TAB PROC TAB CYCLE DETRUIRE AFFICHER	THERMO-MAITRE 2.0							N2 R P=MPa U=H**3/Kg I=K H=MJ/Kg	
	NO	PT1PT2	U	H	S	W	Q	TYPE	
	1	1 2	0.18137	0.25438	0.00000	-0.18137	0.00000	ADIA	
$P_1=1.13400 \quad P_2=5.17100$ $V_1=0.11885 \quad V_2=0.04018$ $T_1=453.0000 \quad T_2=689.3076$ $U=0.18137 \quad H=0.25438$ $W=-0.18137 \quad Q=0.00000$ $S=0.00000 \quad N=1.39918$									

Figure B-5 : Banque de résultats des processus

L'information donnée comprend: le numéro du processus, le numéro des points de départ et d'arrivée se référant au tableau de propriétés en mémoire, le type de transformation: adiabatique, les différences d'énergie interne, d'enthalpie et d'entropie, le travail et la chaleur.

Comparant les résultats obtenus avec THERMO-MAITRE à ceux obtenus à l'aide des tables, on constate des erreurs relatives tout à fait acceptables (voir Tableau B-1).

Tableau B-1 : Comparaison des résultats avec THERMO-MAITRE
aux résultats avec les tables.

	VALEURS		ERREUR RELATIVE (%)
	THERMO-MAITRE	TABLES	
v_1	0,11885	0,12300	3,370
v_2	0,04018	0,04060	1,030
T_2	689,30760	689,00000	0,045
ΔU	0,18137	0,18360	1,215
ΔH	0,25438	0,25480	0,165
ΔS	0,00000	0,00000	0,000
w	-0,18137	-0,18436	0,165
Q	0,00000	0,00000	0,000

Solution avec tables de propriétés

1. Loi de thermodynamique

$$Q = \Delta U + W$$

Processus adiabatique : $Q = 0$; $m = 1 \text{ kg}$

Donc:

$$W = -\Delta U = -(U_2 - U_1) = -[H_2 - p_2 V_2 - (H_1 - p_1 V_1)]$$

$$p_1 = 11.34 \text{ bar} \quad T_1 = 180 + 273 = 453^\circ\text{K}$$

1. $H_1 = ?$ Double interpolation

10 bar		15 bar	
T	H	T	H
450	467.3	450	466.8
475	493.6	475	493.3
453	470.4	453	469.9

$$p_1 = 11.34 \text{ bar}$$

$$\underline{H_1 = 470.2 \text{ kJ}}$$

2. $s_1 = ?$ Double interpolation

10 bar

T	S
450	6.582
475	6.639
453	6.589

15 bar

T	S
450	6.461
475	6.518
453	6.468

$$p_1 = 11.34 \text{ bar}$$

$$\underline{s_1 = 6.557 \text{ kJ/}^\circ\text{K}}$$

3. $v_1 = ? \text{ (m}^3\text{)}$ Double interpolation

10 bar		15 bar	
T	V	T	V
450	.1340	450	.08991
475	.1415	475	.09492
453	.1349	453	.09051

$$p_1 = 11.34 \text{ bar}$$

$$v_1 = .1230 \text{ m}^3$$

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1$$

$$= 470.2 - 1.13 \times 10^3 \times .1230$$

$$u_1 = 330.7 \text{ kJ}$$

$$s_2 = s_1 = 6.557 \text{ kJ/}^\circ\text{K}$$

$$p_2 = 51.71 \text{ bar}$$

4. $T_2 = ? \text{ Simple interpolation}$

50 bar	
T	S
650	6.493
700	6.575
T_2	6.557

$$T_2 = 689^\circ\text{K}$$

5. $H_2 = ?$ Double interpolation

50 bar		60 bar	
T	H	T	H
650	681.9	650	682.1
700	737.0	700	737.4
689	724.9	689	725.2

$$p_2 = 51.71 \text{ bar}$$

$$H_2 = 725 \text{ kJ}$$

6. $V_2 = ?$ Double interpolation

50 bar		60 bar	
T	V	T	V
650	.03941	650	.03298
700	.04242	700	.03550
689	.04176	689	.03495

$$p_2 = 51.71 \text{ bar}$$

$$V_2 = .0406 \text{ m}^3$$

$$U_2 = H_2 - p_2 V_2$$

$$= 725 - 5.171 \times 10^3 \times .0406$$

$$U_2 = 515.06 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned}W &= -\Delta U = -(U_2 - U_1) \\&= -(515.06 - 330.7) \\W &= \underline{-184.36 \text{ kJ}}\end{aligned}$$

B-2 Soit une machine opérant selon un cycle de Carnot avec un rapport de détente thermique de trois et un rapport de compression adiabatique de trois. Initialement la pression est de 5.171 MPa et la température 689.3°K. Le gaz utilisé est l'azote (N_2).

Calculer le travail effectué par le cycle ainsi que le rendement thermique.

Après l'initialisation du système, on choisit la fonction "CYCLES" suivie du qualificatif "CARNOT". Tout d'abord, on spécifie l'état initial de la substance. Selon les données du problème, celui-ci correspond à un calcul déjà effectué et conservé en mémoire, on sélectionne "TAB POINTS" puis le numéro du point correspondant (No. 2).

Le type du premier processus n'étant pas spécifié dans le problème, on pose arbitrairement "Proc 1 : ISOT" (les deux rapports d'expansion et de compression étant de même grandeur).

On entre ces rapports, obtient les résultats, puis on tape "C" pour conserver le cycle (sinon Return).

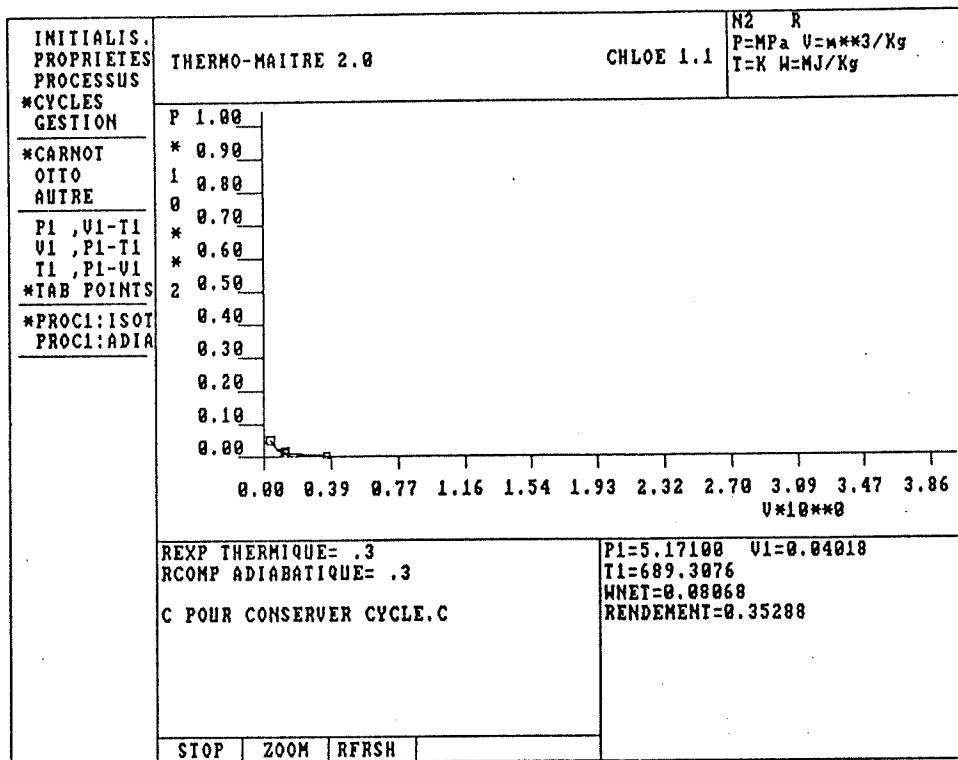


Figure B-6 : Calcul d'un cycle de Carnot

En effectuant un zoom on retrouve la figure B-7.

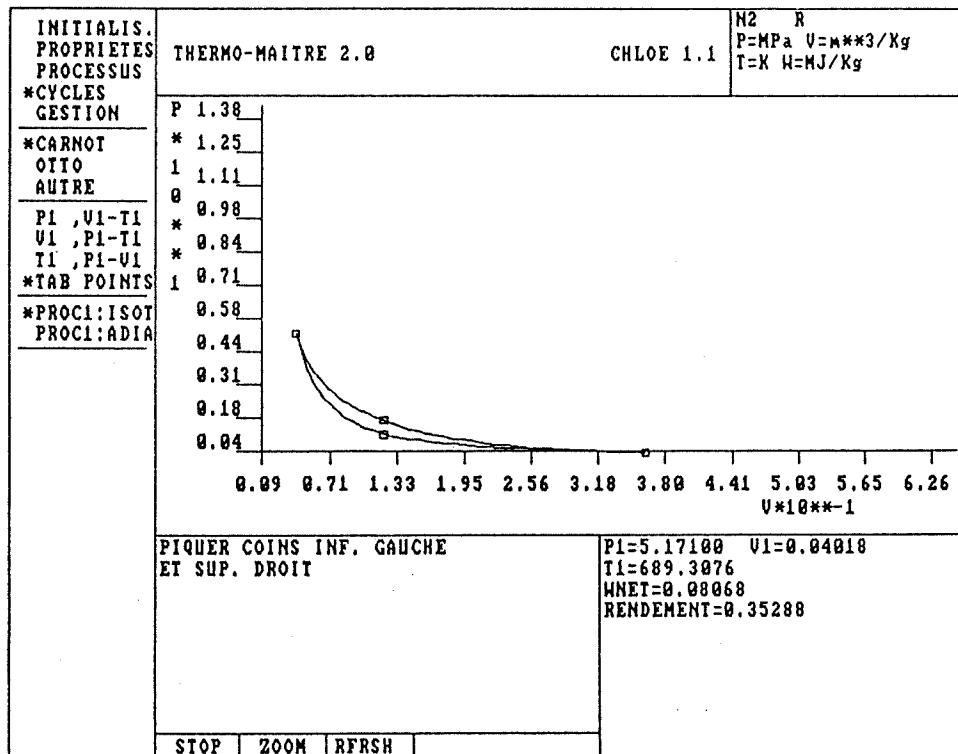


Figure B-7 : Zoom sur un cycle de Carnot

En examinant la banque de processus provisoire, on remarque que les processus composant le cycle de Carnot se sont ajoutés à la suite du processus calculé au problème précédent. (Fig. B-8)

INITIALIS. PROPRIETES PROCESSUS CYCLES *GESTION	THERMO-MAITRE 2.0							CHLOE 1.1	N2 R P=MPa V=m**3/Kg T=K H=MJ/Kg
TAB POINTS	NO	PT1	PT2	U	H	S	H	Q	TYPE
	1	1	2	0.18137	0.25438	0.00000	-0.18137	0.00000	ADIA
	2	2	3	0.00177	-0.00041	0.00033	0.22685	0.22863	ISOT
*TAB PROC	3	3	4	-0.18402	-0.25572	0.00000	0.18402	0.00000	ADIA
TAB CYCLE	4	4	5	-0.00074	-0.00051	-0.00033	-0.14721	-0.14795	ISOT
DETRUIRE	5	5	6	0.18298	0.25664	0.00000	-0.18298	0.00000	ADIA
AFFICHER									
	PIQUER COINS INF. GAUCHE ET SUP. DROIT							P1=5.17100 V1=0.04018 T1=689.3076 WNET=0.00068 RENDEMENT=0.35288	
	STOP	ZOOM	RFRSH						

Figure B-8 : Banque de résultats des processus après calcul
d'un cycle

Le premier processus du cycle (le deuxième dans le tableau) est en effet composé du point final calculé au problème précédent.

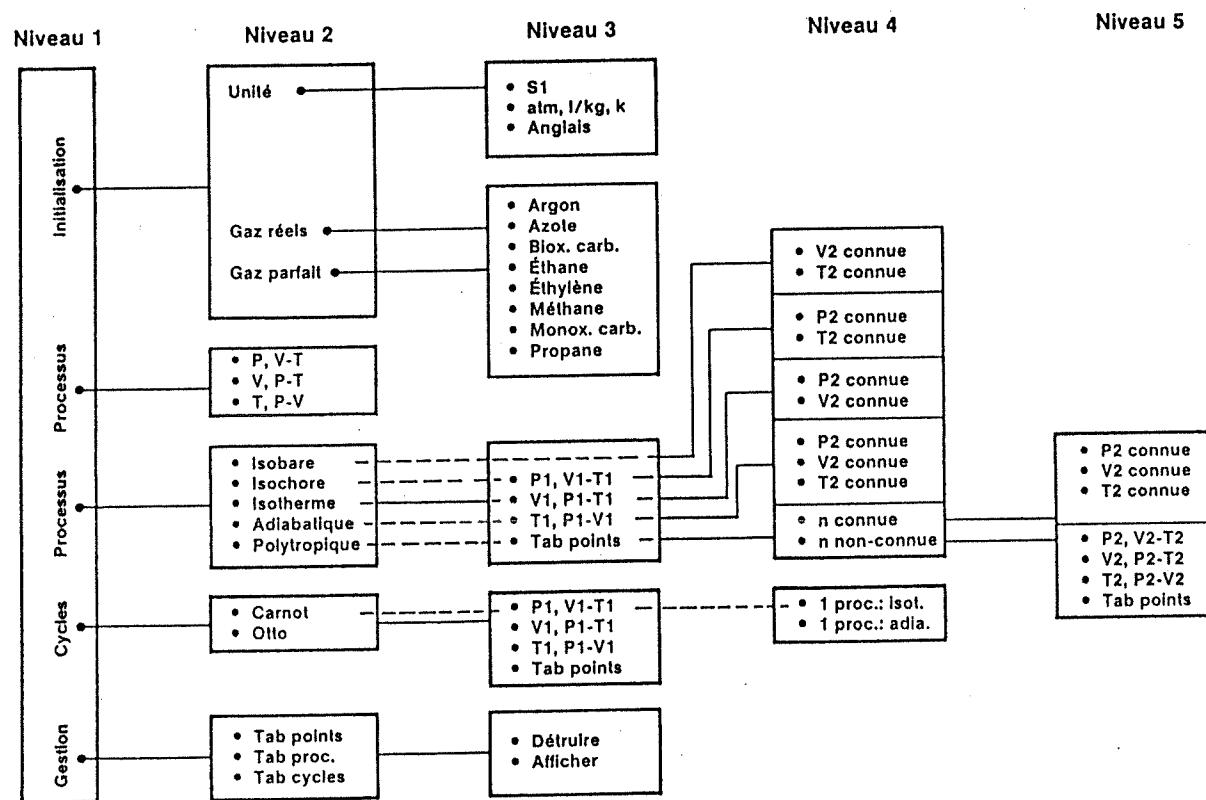
Voyons maintenant la banque de cycles provisoire, (Fig. B-9). Le cycle numéro 1 est composé des processus 2, 3, 4 et 5 de la banque de processus ci-haut.

INITIALIS. PROPRIETES PROCESSUS CYCLES *GESTION <hr/> TAB POINTS TAB PROC *TAB CYCLE <hr/> DETRUIRE AFFICHER	THERMO-MAITRE 2.0					CHLOE 1.1	N2 R P=MPa V=m**3/Kg T=K W=MJ/Kg
	NO	WCY	REND	NPTCY	PROC		
	1	0.08068	0.35288	4	2	3	4
	PIQUER COINS INF. GAUCHE ET SUP. DROIT					P1=5.17100 V1=0.04018 T1=689.3076 WNET=0.08068 RENDEMENT=0.35288	
	STOP	ZOOM	RFRSH				

Figure B-9 : Banque de résultats de cycles

ARBRE DU MENU DU LOGICIEL

A N N E X E C



ANNEXE D

ENVIRONNEMENT

- Micro-ordinateur IBM
 - 256 K de mémoire
 - coprocessor 8087
 - écran mono-chrome et carte graphique tecmar
 - ou écran couleur et carte graphique IBM
 - souris (optionnel)
- OU
- coprocessor 8086
- écran couleur et carte graphique IBM
- ou écran mono-chrome et carte graphique tecmar
- souris (optionnel)

FONCTIONNEMENT

- Insérer une disquette DOS, puis la disquette THERMO-MAITRE.
- Taper Thermo.
- Pointer l'item voulu de la colonne de gauche

Ce logiciel comprend cinq fonctions principales:

- Initialisation : choix d'unités, et du gaz (réel ou parfait). Par défaut les unités et le gaz sont: SI et Argon réel (Ar R).

Note: chaque nouvelle initialisation videra les banques de résultat.

- Propriétés : A partir de deux propriétés soient la pression, le volume ou la température, on calcule la troisième avec l'équation d'état de Redlich-Kwong.

Exemple: P, V-T, on veut calculer la pression connaissant V et T. On peut conserver les résultats en mémoire (maximum 20 points) en tapant C, sinon, "RETURN" pour continuer.

- Processus : On a un choix parmi cinq. L'usager spécifie l'état initial du gaz et une propriété de l'état final. Procédant comme précédemment les résultats peuvent être conservés en mémoire (maximum de 10 processus).

- Cycle : Dans le cas d'un cycle connu, tel Carnot et Otto, l'entrée des données se fait selon les caractéristiques du cycle. Tandis que, pour un cycle quelconque, après avoir déterminé l'état initial, on compose le cycle à l'aide d'une liste de processus. On boucle le cycle par la commande "FIN CYCLE". Un minimum de trois points est nécessaire. On peut

conserver deux à trois cycles en mémoire.

Gestion : Gère les résultats conservés en mémoire en permettant de les visualiser ou de les détruire.

Commandes permanentes

STOP : A la fin de chaque séance d'exercices pointer cette case.

ZOOM : Effet d'agrandissement sur un affichage graphique.

Il faut au moins un point affiché. Piquer la borne inférieure gauche du cadre désiré et la borne supérieure droite.

RFRSH : Permet de revenir à l'affichage initial.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00289330 1