

9/03

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Pour L'Obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Thème :

*Contribution à la Détermination
des Propriétés physiques des
Fractions Pétrolières par
Réseaux de Neurones Aritficiels*

Etudié par :
D.E.LAMOURI

Proposé et dirigé par :
Dr F.SOUAHI
Pr C.E.CHITOUR

Promotion 2003

مساهمة على التعرف على الخصائص الفيزيائية لتجزئات بترولية بتطبيق شبكة العصبونات الإصطناعية.

ملخص :

يتمثل عملنا هذا في محاولة إيجاد الخصائص الفيزيائية لتجزئات بترولية و هذا بتطبيق شبكة العصبونات الإصطناعية. ولهذا فقد أنجزنا شبكات للتقرب من الخصائص الفيزيائية بدلالة درجة حرارة الغليان المتوسطة والكثافة. لتقييم النتائج المحصل عليها حاولنا بعد ذلك مقارنتها مع الدراسات المعتمدة تقرب أكثر من الحالة الحقيقية و التي تستعمل عادة في المراجع. الكلمات المفتاحية : خصائص شبكة العصبونات الإصطناعية , تجزئات بترولية .

Contribution à la détermination des propriétés physiques des fractions pétrolières par réseaux de neurones artificiels.

Résumé :

Ce travail consiste à introduire une nouvelle approche qui est les Réseaux de Neurones Artificiels pour la détermination des propriétés physiques des fractions pétrolières. Pour cela nous avons établis des réseaux capables d'estimer avec un pourcentage d'erreur relativement faible les propriétés désirées en fonction de la température moyenne d'ébullition et de la densité.

Pour mieux apprécier les résultats obtenus nous les avons ensuite comparés avec les corrélations qui s'approchent le plus de l'état réel et qui sont le plus cités dans la littérature.

Mots clés : propriétés, réseaux de neurones, fraction pétrolières

Contribution to the determination of the properties of oil fractions with the use of artificial neuronal networks.

Abstract:

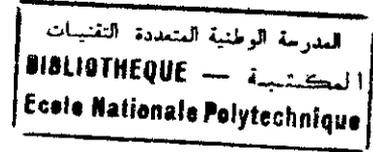
The aim of this work is to determine the properties of oil fractions with the use of artificial neuronal networks.

For this, we made networks able to estimate with a low error percentage, properties which are function of mean average boiling point and density.

To give more importance to the results, we compared them with correlations that give the lowest percentage error.

Key words: properties, neuronal networks, oil fractions

Remerciements



Ce travail a été réalisé au niveau du Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles du Département de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Je ne saurai exprimer ma profonde gratitude à Madame le Doctoresse Souahi ainsi qu'à Monsieur le Professeur Chitour pour leur gentillesse, patience ainsi qu'aux nombreuses discussions et conseils très utiles qu'ils n'ont cessé de me prodiguer tout au long de ce travail. Qu'ils trouvent ici mes respectueux remerciements. ...

Je tiens aussi à remercier Monsieur le Docteur Benyoussef pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens également à remercier Madame la Doctoresse Derriche et Monsieur le Docteur Boukhetala d'avoir donné un peu de leur précieux temps afin d'examiner ce travail et juger ses résultats.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, Dieu seul sait ô combien leur aide m'a été précieuse.

A ma très chère mère et mon père,
A ma sœur et mes frères,
A mes tantes et amis,
A tous ceux qui me sont chers,
Et à la mémoire de toutes les victimes
du terrible séisme qui a frappé le centre
du pays que, Dieu ait pitié de leur âme.

Terme	Signification
°API	Densité définie par l' American Petroleum Institut
C/H	Rapport carbone hydrogène
d	Densité 20°C/4°C
FP	Fraction pétrolière
Kuop	Facteur de caractérisation
M	Masse molaire
m	Paramètre de la corrélation de Dermoune-Chitour
Max	Maximale
Min	Minimale
Moy	Moyenne
n	Indice de réfraction
N°	Numéro de fraction
purelin	Fonction d'activation de type Linéaire
Ri	Refractivity intercept
RNA	Réseaux de Neurones Artificiels
SpGr, S	Specific gravity 60°F/60°F
Tanig	Fonction d'activation de type sigmoïde tangentielle
Teb	Température d'ébullition
Tmav	Température moyenne d'ébullition en °C
Xpa	composition molaire paraffinique dans la fraction pétrolière
Xna	composition molaire naphténique dans la fraction pétrolière
Xar	composition molaire aromatique dans la fraction pétrolière
Wij	Poids
Zc	Facteur de compressibilité critique
ω	Facteur acentrique

SOMMAIRE

الطبعة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction générale	1
Chapitre I : Les différentes méthodes de caractérisation des hydrocarbures	7
I.1. Introduction	7
I.2. Essais Préliminaires sur le Pétrole brut.....	7
I.2.1. Densité (specific gravity).....	8
I.2.2. Point d'écoulement.....	8
I.2.3. Viscosité.....	8
I.2.4. Point d'éclair.....	9
I.2.5. Dosage du soufre.....	9
I.3. Distillation Analytique du pétrole brut et analyses physico-chimiques des coupes pétrolières.....	10
I.3.1. Les différentes méthodes de distillation.....	10
I.3.2. Analyses physico-chimiques des coupes pétrolières.....	13
I.4. Différentes méthodes de caractérisation des hydrocarbures.....	14
I.4.1. Les équations d'état.....	14
I.4.2. Loi des états correspondants.....	17
I.4.2.1 Corrélations fondées sur le facteur de compressibilité critique.....	18
I.4.2.2. Corrélations fondées sur le facteur acentrique.....	19
I.4.3. Méthodes empiriques.....	20
I.4.3.1. Principe de la méthode de contribution de groupes.....	20
Chapitre II : Présentation des Réseaux de Neurones Artificiels.	
II.1. Définition.....	22
II.2. Historique.....	22
II.3. Le modèle biologique.....	24
II.4. Les modèles mathématiques.....	26
II.4.1. Composant (du neurone artificiel).....	27
II.4.2. Structure d'interconnexion.....	28
II.4.3. Apprentissage.....	29
II.4.3.1. Définition.....	29
II.4.3.2. Apprentissage supervisé.....	30
II.4.3.3. Problèmes d'apprentissage.....	31
II.4.4. Architecture des PMC (Perceptron Multi Couches).....	32
II.4.4.1. Approximation de fonction.....	34
II.4.4.2. Apprentissage.....	34
II.4.4.3. Principe de la rétropropagation du gradient.....	35
II.4.4.4. Des approximateurs universels.....	36
II.4.4.5. La base d'apprentissage.....	36
II.4.4.6. La base de test.....	37
Chapitre III : Présentation des propriétés étudiées et du logiciel utilisé pour leur calcul	39
III.1. Les propriétés étudiées.....	39

III.1.1. Introduction.....	39
III.1.2. Facteur de caractérisation Kuop.....	39
III.1.2.1. Définition.....	39
III.1.3. La specific gravity SpGr.....	40
III.1.4. La masse molaire.....	40
III.1.4.1. Définition.....	40
III.1.4.2. Corrélations utilisées pour la comparaison des résultats.....	40
III.1.5. Indice de réfraction.....	41
III.1.5.1. Définition.....	41
III.1.5.2. Corrélations utilisées pour la comparaison des résultats.....	42
III.1.6. La composition des fractions pétrolières.....	42
III.1.6.1. Introduction.....	42
III.1.6.2. Corrélations utilisées pour la comparaison des résultats.....	43
III.2. Présentation du logiciel.....	44
III.2.1. Création des données.....	44
III.2.2. Création du réseau.....	45
III.2.3. Mise en œuvre du réseau.....	47
Chapitre IV : Méthodologie de travail et résultats obtenus	
IV.1. Méthodologie de travail.....	50
IV.1.1. Choix de l'échantillon.....	50
IV.1.1.1. Origine de la banque de donnée.....	50
IV.1.1.2. Mise en œuvre de la banque de donnée.....	52
IV.1.2. Mise en oeuvre des réseaux de neurones.....	52
IV.2. Résultats et commentaires.....	55
IV.2.1. Facteur de caractérisation Kuop.....	55
1 ^{ère} partie.....	55
2 ^{ème} Partie.....	56
3 ^{ème} Partie.....	56
IV.2.2. La specific gravity SpGr.....	57
1 ^{ère} Partie.....	57
2 ^{ème} Partie.....	58
3 ^{ème} Partie.....	59
IV.2.3. La masse molaire M.....	60
1 ^{ère} Partie.....	60
2 ^{ème} Partie.....	60
3 ^{ème} Partie.....	61
IV.2.4. L'indice de réfraction n.....	62
1 ^{ère} Partie.....	62
2 ^{ème} Partie.....	63
3 ^{ème} Partie.....	63
IV.2.5. La composition.....	64
1 ^{ère} partie.....	64
2 ^{ème} Partie.....	66
3 ^{ème} Partie.....	67
Conclusion.....	70

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction Générale

Bien que la découverte du pétrole remonte à de nombreux siècles, son introduction à l'échelle industrielle se situe qu'à la fin du 19^{ème} voir même au début du 20^{ème} siècle, cette utilisation -bien que abusive- a donnée naissance à des sciences qui étudient ce précieux liquide telles que : la pétrochimie, le raffinage...

Ces domaines ont vu le jour dans le but de mieux connaître les caractéristiques du pétrole et en tirer partie, pour cela tous les moyens ont été mis en œuvre que ce soit matériels ou financiers et pour cause, toute nouvelle caractéristique découverte représentait une mine d'or.

De nos jours, dans la perspective d'un éventuel tarissement des sources et de l'avenu de la mondialisation, les investisseurs (pour cause de rentabilité à moindre coût) revoient à la baisse le financement de la recherche dans le domaine pétrolier ce qui a pour effet l'apparition de nouvelles méthodes dites prédictives qui permettent de gagner en temps et en argent, on peut citer comme exemple dans le domaine de la caractérisation du pétrole : la méthode de contribution de groupes, la méthode de nomographie ou encore la méthode des réseaux de neurones. Cette dernière qui fait l'objet de cette étude et considérée comme étant l'une des plus prometteuses.

Lorsqu' apparaît une nouvelle technique, l'ingénieur se demande naturellement en quoi cette nouveauté peut lui être utile. Si elle est dotée d'un nom plus métaphorique que technique – ce qui est évidemment le cas pour les réseaux de neurones – la réponse à cette question doit être particulièrement précise et motivée. De plus, la mise en œuvre des réseaux de neurones est très simple ; la tentation peut être grande, d'appliquer cette technique de manière irréfléchie ou inadaptée, ce qui ne peut conduire qu'à des déceptions. C'est pourquoi nous expliquerons ici les principes fondamentaux qui justifient l'intérêt pratique des réseaux de neurones.

Les réseaux de neurones sont devenus en quelques années des outils précieux dans des domaines très divers de l'industrie et des services. Néanmoins, ils n'ont pas encore atteint leur plein développement, pour des raisons plus psychologiques que techniques, liées aux connotations biologiques de terme, et au fait qu'ils sont considérées, à tort, comme des outils d'intelligence artificielle. Or l'intérêt des réseaux de neurones, dans le domaine des sciences de l'ingénieur, ne doit rien à la métaphore biologique : il est uniquement dû aux propriétés mathématiques spécifiques de ces réseaux.

Introduction Générale

Dans le but d'améliorer les résultats trouvés par les chercheurs au niveau du Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles, nous avons dans cette étude introduit une nouvelle technique d'approche pour la caractérisation des fractions pétrolières basée sur les réseaux de neurones artificiels.

1. Généralités sur le pétrole : [1]

1.1. Présentation:

Le pétrole, liquide brun plus ou moins visqueux d'origine naturelle, est un mélange complexe d'hydrocarbures, principalement utilisé comme source d'énergie. Il contient des hydrocarbures, saturés, à chaînes linéaires, ramifiés ou cycliques, ainsi que des traces de soufre, d'azote, d'oxygène, d'eau salée et de métaux (fer, nickel). On le trouve en grandes quantités dans des gisements enfouis sous la surface des continents ou au fond des mers.

1.2. Historique :

Les dépôts de surface de pétrole brut sont connus depuis *très* longtemps. La Bible mentionne le bitume, employé pour recouvrir l'arche de Noé. Le pétrole, remonté à la surface sous forme de suintement de bitume, était utilisé par les peuples de Mésopotamie, il y a plus de trois mille ans, comme mortier dans la construction des remparts, pour le calfatage des coques des navires et pour assurer l'étanchéité des citernes et conduites d'eau, comme source d'énergie et même comme médicament

Connues depuis l'Antiquité, les utilisations du pétrole à des fins médicales se sont développées dès le XV^e siècle. On attribuait alors au pétrole toutes les vertus.

Au Moyen Age, on utilisait des sortes de grenades en terre cuite remplies de pétrole et de salpêtre, appelées «feux grégeois», qui furent la hantise des marins : lancées d'un navire, elles explosaient en laissant échapper le pétrole, qui s'enflammait, se répandait sur l'eau et propageait le feu aux autres navires.

La révolution industrielle entraîna la recherche de nouveaux combustibles; les bouleversements sociaux qu'elle occasionna créèrent le besoin d'un pétrole peu onéreux et de bonne qualité pour les lampes. Toutefois, l'huile de baleine n'était accessible qu'aux riches, les bougies de suif avaient une odeur désagréable et les becs de gaz n'existaient que dans les maisons et appartements modernes des zones urbaines.

La recherche d'un meilleur combustible de lampe entraîna une forte demande d'«huile de roche» - c'est-à-dire de pétrole brut - et, vers le milieu du XIX^e siècle, de nombreux scientifiques mirent au point des procédés permettant d'en faire un usage commercial. C'est ainsi que James Young, en Angleterre, commença à fabriquer différents produits à partir de pétrole brut, mais il s'orienta par la suite vers la distillation du charbon et l'exploitation des schistes bitumeux. Le physicien et géologue canadien Abraham Gessner déposa, en 1852, un brevet pour obtenir, à partir du pétrole brut, un combustible peu onéreux pour lampe, brûlant sans résidu, appelé pétrole lampant; en 1855, le chimiste américain Benjamin Silliman publia un rapport indiquant la gamme de produits utiles pouvant être obtenus par distillation du pétrole.

C'est ainsi que débuta la recherche de plus importantes sources d'approvisionnement en pétrole brut. On savait que les puits creusés pour l'eau et le sel présentent parfois des infiltrations de pétrole. L'idée de forages pétroliers fit donc naturellement son chemin. Les premiers puits furent forés en *Allemagne, en 1857*. L'initiative qui rencontra le plus grand retentissement fut cependant celle d'Edwin L. Drake, le 27 août 1859, à Titusville, en Pennsylvanie. Drake procéda à des forages pour trouver la «nappe mère», origine des affleurements de pétrole de Pennsylvanie occidentale. Si Drake ne put extraire qu'un pétrole d'écoulement aisé et facile à distiller et si le puits était peu profond - 23 m seulement -, sa réussite n'en marquait pas moins le début de l'industrie pétrolière moderne. Cette découverte déclencha une véritable ruée vers l'«or noir».

Depuis, on a découvert du pétrole sur tous les continents, sauf en Antarctique. Le pétrole fit rapidement l'objet de toute l'attention de la communauté scientifique, et des hypothèses cohérentes furent émises quant à sa formation, sa remontée à travers les couches terrestres et son emprisonnement. Avec l'invention de l'automobile, en 1880, et les besoins en énergie issus de la Première Guerre industrielle du pétrole devint l'un des fondements de la société industrielle.

1.3. Raffinage :

L'objectif du raffinage est de transformer par des opérations physico-chimiques des pétroles bruts d'origines diverses en carburants, combustibles, lubrifiants, bitumes et de plus

en plus en produits de base pour la pétrochimie. Le commerce international porte sur plus de 100 qualités de pétrole brut différentes.

1.3.1. Distillation :

Le procédé de base du raffinage est la distillation atmosphérique. Le pétrole brut est tout d'abord chauffé dans un four à 370°C, où il se vaporise partiellement, et est amené dans la tour de distillation, appelée aussi colonne de fractionnement.

Les fractions les plus légères sont en haut de colonne. Il s'agit du gaz de raffinerie, qui sera utilisé sur place comme combustible. Parmi les autres fractions légères, on trouve le butane et le propane, les essences et le naphta, qui est la matière première de la pétrochimie. Ensuite vient le kérosène utilisé dans les moteurs à réaction, le gazole et le fioul domestique. Les produits lourds - les résidus - sont soutirés en bas de la colonne, puis redistillés sous vide pour permettre l'obtention des fiouls lourds, des lubrifiants et des bitumes.

Pour satisfaire aux besoins du marché actuel, il faut obtenir de plus grandes quantités d'essences avec des indices d'octanes élevés. D'autre part, on doit diminuer la teneur en soufre des gazoles. Il est alors nécessaire de procéder à des traitements de conversion des produits issus de la distillation.

1.3.2. Craquage et Reformage :

Le craquage consiste à fractionner les grosses molécules des fractions lourdes en molécules plus petites. Dans le craquage thermique, la transformation des molécules est effectuée par l'action de la chaleur. Le craquage catalytique permet de décomposer les fractions lourdes en présence d'un catalyseur, qui active la rupture des liaisons entre les atomes de carbone. L'hydrocraquage consiste à faire agir de l'hydrogène à forte pression (de 50 à 150 bars) et à des températures allant de 250 à 400°C. Enfin, au cours du vapocraquage, les réactions ont lieu en présence d'eau à très haute température (de l'ordre de 900°C).

Le reformage permet de convertir le naphta ou les essences provenant de la distillation en des essences de qualité supérieure, à haut indice d'octane. Ce procédé permet aussi d'obtenir des bases pour la pétrochimie.

1.3.3 Autres procédés :

Il existe d'autres procédés de raffinage, comme l'isomérisation et l'alkylation, qui permettent d'obtenir des essences à indice d'octane élevé, indispensable pour les essences sans plomb. Les produits subissent d'autres traitements permettant d'agir sur leur couleur, leur stabilité, leur odeur (élimination des mercaptans) et leur teneur en hétéroatomes, comme le soufre et l'azote.

1.4. Utilisation et importance du pétrole :

On emploie le pétrole comme matière première dans l'industrie chimique et dans la production de carburants. Le pétrole et ses dérivés sont utilisés dans la production de médicaments, de produits agrochimiques et alimentaires, de matières plastiques, de matériaux de construction, de peintures et de fibres synthétiques, de détergents et de caoutchouc, ainsi que dans la production électrique.

En fait, notre civilisation industrielle moderne dépend du pétrole et de ses dérivés; la structure physique et le mode de vie des communautés urbaines entourant les grandes villes sont le résultat d'un approvisionnement en pétrole à grande échelle et peu coûteux. C'est la première source d'énergie mondiale; il fournit près de la moitié de la demande totale d'énergie primaire. La vente des produits pétroliers participe de façon importante au budget des Etats. À titre d'exemple, la taxe intérieure sur les produits pétroliers est la troisième ressource fiscale de la France.

Le pétrole est devenu une arme politique, comme l'ont démontré les deux chocs pétroliers des années 1970. L'offre et la demande de pétrole, son prix, les solutions de remplacement et les économies d'énergie sont des questions constamment débattues. Les taxes qui frappent la production du brut et la vente des produits pétroliers participent de façon importante au budget des Etats. A titre d'exemple, la taxe intérieure sur les produits pétroliers est la troisième ressource fiscale en France.

Chapitre I

*Les Différentes Méthodes
de Caractérisation
des Hydrocarbures*

I.1.Introduction : [2]

Les pétroles bruts se trouvent dans des gisements souterrains décelés par différentes techniques de prospection et sont récupérés par le forage de puits pour servir de matière première aux industries de raffinage et de la pétrochimie. Ce sont des mélanges d'hydrocarbures, depuis les plus légers jusqu'aux plus lourds en C40 et plus (huiles, vaselines, paraffines, ...). Leurs propriétés (densité, point d'ébullition, point d'éclair etc.) sont très variables de même que leurs teneurs en composants purs.

Le pétrole du Moyen Orient (Koweït, Iran, Bahreïn, ...) contient environ 30% de légers pour 70% de lourds (gas-oil, goudrons, bitumes, ...) alors que le pétrole du Sahara (HassiMessaoud, In Amenas, ...) riche en légers (60%) est pauvre en lourds (40%) et contient très peu de soufre.

Du fait de leur diversité et de leur complexité, il s'est avéré nécessaire d'uniformiser les procédés de fractionnement et d'analyse par des protocoles précis. Des méthodes d'analyse ont été développées et normalisées pour déterminer les principales caractéristiques physico-chimiques des différents produits qui vont conditionner leurs traitements ultérieurs et pour que les contrôles effectués par les différentes parties (client et fournisseur, par exemple) soient comparables même s'ils sont faits en des endroits différents mais toujours dans des conditions strictement définies. Ces spécifications correspondent à des normes (ASTM, AFNOR, DIN, BSI, ISO, IP, ...).

I.2. Essais Préliminaires sur le Pétrole brut :

Les principales propriétés des pétroles bruts obtenues par différentes méthodes analytiques sont la densité, le point d'écoulement, la viscosité, la tension de vapeur, la teneur en soufre et la teneur en eau, sédiments et sels. Ces grandeurs, pour lesquelles il existe des méthodes d'essais normalisées, sont nécessaires pour interpréter les processus chimiques et pour apprécier l'efficacité des traitements lors du raffinage. Elles sont aussi déterminantes pour éviter, en amont, les incidents qui pourraient parfois se révéler très sérieux.

I.2.1. Densité (specific gravity) :

La première caractérisation est la classification des pétroles en fonction de leur densité (pétroles lourds, moyens et légers). Cette dernière varie de 0,7 à 1 suivant les proportions en hydrogène et carbone contenues dans les pétroles. Elle est souvent exprimée en degrés API (American Petroleum Institute) qui varie alors de 70 à 5:

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{SpGr} - 131.5$$

La densité standard ou specific gravity $SpGr$ est le rapport entre la masse volumique de l'hydrocarbure à 15,55°C (60°F) est celle de l'eau à la même température. Elle diffère légèrement de la grandeur d_4^{15} qui est le rapport entre la masse volumique de l'hydrocarbure à 15°C et celle de l'eau à 4°C.

$$SpGr = 1.002 d_4^{15}$$

La connaissance de cette propriété est d'une grande importance dans la cotation commerciale des pétroles bruts. Elle est obtenue par mesure au laboratoire à l'aide de pycnomètres et grâce aussi à l'utilisation de méthodes d'essai normalisées.

I.2.2. Point d'écoulement :

Les pétroles bruts sont des mélanges complexes et, quand ils sont exposés au froid, leur passage à l'état solide ne se fait pas à température constante, contrairement à un corps pur, mais dans un intervalle de température. Au fur et à mesure que la température diminue, ils cessent d'être des fluides et s'approchent de l'état solide en s'épaississant. La détermination de cette caractéristique permet d'apprécier les conditions de pompage en hiver. Les normes NFT 60-105 et ASTM D97 sont utilisées pour mesurer cette température.

I.2.3. Viscosité :

La viscosité traduit l'état d'un fluide qui, par suite d'un frottement interne de ses différentes couches entre elles, éprouve une difficulté plus ou moins grande à l'écoulement. La valeur de cette grandeur à différentes températures intervient dans la mise en place du mode de transport massif des pétroles bruts depuis les champs de production jusqu'aux centres

de raffinage (pipelines, navires...) faisant appel à des stations de pompage ou de compression dépendant de la viscosité des produits à acheminer. Elle est définie par les normes NFT60 - 100 ou ASTM D 445 et 446. Des tables de conversion entre les différentes unités sont utilisées et normalisées (ASTM D 2161).

I.2.4. Point d'éclair :

Le point d'éclair des pétroles bruts permet d'estimer la teneur en hydrocarbures légers c'est à dire la pression de vapeur qui règne au dessus du liquide saturé, en équilibre avec la phase vapeur qui le surmonte.

Les diverses manipulations du pétrole brut, telles que le remplissage et la vidange des citernes et des bacs, sont fonction de son point d'éclair qui est directement lié à la tension de vapeur définie par les normes NF M 07 - 007 et ASTM D 323. Les normes NFM 07 - 011 et ASTM D 56 sont utilisées pour mesurer le point d'éclair.

I.2.5. Dosage du soufre :

Le soufre contenu dans les pétroles bruts est l'un des éléments dont la connaissance est particulièrement importante. Il est présent sous forme inorganique (en particulier hydrogène sulfuré H_2S) ou encore se trouve dans des molécules organiques. Les problèmes posés par ces produits, d'odeur très désagréable, sont la production de SO_2 par combustion, qui peut générer une corrosion acide et l'empoisonnement des catalyseurs par le soufre.

La teneur totale en soufre d'un brut se fait par diverses méthodes d'essais normalisés chimiques et physiques ou par l'intermédiaire d'analyseurs automatiques utilisant un principe et des méthodes de dosage différentes. Elle est comprise entre 0,05 et 0,5% en poids. Il existe des cas particuliers comme le brut de Rozel Point (Utah, Etats Unis) avec 13,95% et le brut d'Etsel (Allemagne) avec 9,6%.

Les pétroles bruts contiennent, en très faibles quantités, de l'eau, des sédiments et des sels minéraux dont la majeure partie est dissoute dans l'eau, le reste se trouvant sous forme de cristaux très fins. La présence de tels produits dans les pétroles bruts peut détériorer les équipements (corrosion, érosion, dépôt, bouchage et empoisonnement de catalyseurs).

La teneur en eau et sédiments des pétroles bruts est mesurée selon des méthodes normalisées telles que NF M 07 - 200 et ASTM D 96 et D 1796. La mesure de la teneur en chlorure est aussi normalisée NFM 07 - 020 et ASTM D 3230.

I.3. Distillation Analytique du pétrole brut et analyses physico-chimiques des coupes pétrolières :

A la sortie du puits, le pétrole brut est un mélange de plus d'un millier d'hydrocarbures dont la plupart sont liquides aux conditions normales de température et de pression et contiennent en dissolution des produits gazeux (méthane, éthane, propane, butane, ...) et solides (bitumes, paraffines, asphaltènes, ...).

La connaissance de la composition d'un pétrole brut est indispensable pour déterminer les conditions optimales de raffinage et les meilleures températures pour pratiquer les coupes (gaz liquéfiés, essences, kérosènes, gasoils, ...). Ainsi, une distillation de ces mélanges complexes donnera des mélanges d'hydrocarbures (de nature voisine et de même utilisation) séparés en produits légers et lourds et permettra leur classement, non pas par le poids mais par la volatilité.

Nous distinguons plusieurs opérations de distillations susceptibles d'apporter une contribution importante à la connaissance des pétroles. Elles consistent à vaporiser une certaine quantité de matière première, suivies immédiatement de sa condensation provoquée, en vue de recueillir successivement les fractions de moins en moins volatiles. Elles se font à la pression atmosphérique ou sous un vide partiel selon le point d'ébullition du liquide ou la fragilité de sa molécule.

I.3.1. Les différentes méthodes de distillation :

Plusieurs types de distillation discontinues de laboratoire sont destinées soit à caractériser la charge elle même, soit à la séparer en fractions pour des analyses ultérieures.

a. Distillation ASTM: (American Society for Testing Materials)

Elle consiste en un appareil simple composé d'un ballon dans lequel on chauffe une prise d'échantillon de 100ml. Les vapeurs formées sont refroidies et condensées dans un tube baignant dans de la glace puis récupérées dans une éprouvette graduée. Les températures initiale, finale ainsi que celles correspondant à tous les 10% distillés sont notées.

Cette méthode normalisée (ASTM D 86 et NF M 07 - 002) est moins sélective que les autres modes de distillation mais présente l'avantage d'être plus rapide et permet d'obtenir les caractéristiques distillatoires de chaque brut à traiter.

b. Distillation TPB des pétroles bruts:

La distillation TBP (True Boiling Point) correspond à une technique de laboratoire permettant de donner une image plus exacte de la composition d'un pétrole brut, par la mesure de la température "d'ébullition" des constituants qui le composent.

Cette méthode présente une haute sélectivité de séparation, puisqu'elle décompose le pétrole en une cinquantaine de coupes ayant un intervalle de distillation très étroit. Ceci va nous permettre de les considérer comme des hydrocarbures purs fictifs, dont le point d'ébullition sera égal à la moyenne arithmétique des températures initiale et finale de distillation.

$$T_{mav} = \frac{(T_i - T_f)}{2}$$

Généralement, on opère soit en fixant l'intervalle de distillation à 5°C, soit en prenant des fractions de pourcentage en volume, selon la quantité initiale distillée, ceci dans le but de disposer d'une fraction de volume suffisante pour procéder aux essais normalisés.

Cet appareil de fractionnement, comporte principalement :

- ✦ Un bouilleur équipé d'un dispositif de chauffage.
- ✦ Une colonne remplie d'un garnissage (généralement des anneaux de Raschig).
- ✦ Une tête de colonne, qui comprend un diviseur de reflux et un condenseur, munie d'un piège pour condenser les hydrocarbures les plus légers.
- ✦ Une recette de distillat.

- ↳ Une pompe à vide.
- ↳ Des éléments de mesure des températures et/ou des pressions dans le bouilleur, en tête de colonne, dans le condenseur et dans la recette de distillat.

Les caractéristiques de distillation dite TBP, c'est à dire le profil de répartition des hydrocarbures contenus dans le brut en fonction de leurs différentes températures d'ébullition, sont d'une grande importance lors de l'évaluation des pétroles bruts pour leur mise en oeuvre. Les courbes de distillation donnent les rendements en différentes coupes en fonction de l'intervalle de distillation choisi et permettent au raffineur de fixer les conditions opératoires de soutirage de l'unité de distillation en fonction des produits souhaités (essence légère, essence lourde, kérosène, gasoil, ...).

c. Distillation simulée par chromatographie gazeuse:

L'analyse des pétroles par CPG (Chromatographie en Phase Gazeuse) a fait l'objet de nombreux travaux, depuis l'apparition de cette technique dans les années cinquante, utilisant les divers procédés : analyse isotherme et programmation de température. C'est une méthode de séparation dans laquelle les hydrocarbures se partagent entre une phase stationnaire constituée par un solvant et une phase mobile gazeuse, désignée sous le nom de gaz vecteur. La séparation se fait soit le long d'une colonne analytique remplie de longueur de l'ordre de quelques mètres et de diamètre intérieur de 2,5 à 4 mm, soit en utilisant une colonne capillaire de quelques dizaines de mètres et de 0,1 à 0,5 mm de diamètre.

Dans la distillation simulée, on utilise principalement des colonnes capillaires ; on injecte 1 μ l de pétrole brut puis on établit le chromatogramme. On introduit ensuite, dans les mêmes conditions, une série de n-alcanes pour définir les pourcentages distillés pour chaque apparition de pic. On établit ainsi une TBP en portant les températures des fractions, tous les 5%, en fonction du pourcentage distillé. La distillation simulée par chromatographie en phase gazeuse est une technique répandue dans les laboratoires d'analyse. Elle possède un pouvoir de séparation élevé et présente l'avantage d'être rapide et de n'utiliser qu'une très faible quantité d'échantillon (1 μ l).

I.3.2. Analyses physico-chimiques des coupes pétrolières :

Les différentes techniques de fractionnement mises en jeu dans la caractérisation des pétroles sont généralement suivies par des analyses pour définir la qualité de chaque fraction issue de la distillation. Cette caractérisation (distillation et analyse élémentaire sur coupes) donne une bonne évaluation du pétrole brut. Ces analyses s'imposent en vue d'une valorisation complète des pétroles bruts.

En effet, les produits du pétrole brut sont préparés à partir d'un intervalle de distillation et doivent satisfaire à des critères imposés par les différentes utilisations (combustion, mise en oeuvre et protection de l'environnement). Ces exigences sont définies par le biais de mesures conventionnelles normalisées.

En plus des méthodes normalisées citées dans le paragraphe 1.1 qui sont applicables à toutes les coupes obtenues, on fait appel à d'autres essais standards pour définir les qualités.

a. Le point d'aniline :

Le point d'aniline permet de caractériser la teneur en aromatiques. C'est la température la plus basse à laquelle la fraction pétrolière et l'aniline pure, mélangées en volumes égaux, sont parfaitement miscibles.

b. La tension superficielle :

La tension superficielle exprime la tendance que possède un liquide à former une interface (assimilée à une membrane élastique tendue) dont la surface est minimale. Elle diminue lorsque la température augmente et s'exprime en dyne/cm. Cette grandeur intervient entre autres dans les phénomènes de transfert et les phénomènes de "surface" lors de la récupération tertiaire du pétrole.

c. Le pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique massique ou volumique indique la quantité de chaleur dégagée par unité de masse ou de volume du combustible lors de la réaction chimique de combustion complète conduisant à la formation de CO_2 et H_2O . Le combustible est pris à l'état liquide et à une température de référence, généralement 25°C . L'air et les produits de combustion sont considérés à cette même température.

On fait la distinction entre le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI), selon que l'eau obtenue par combustion se trouve à l'état liquide ou à l'état gazeux.

La mesure du pouvoir calorifique s'effectue au laboratoire (norme ASTM D240) et présente non seulement une réelle importance économique, mais conditionne aussi le système de transport.

d. L'indice de réfraction :

C'est le changement de direction que fait la lumière en passant d'un milieu transparent à un autre milieu. L'indice de réfraction n des hydrocarbures varie à la fois avec la structure chimique ($n_{\text{paraffines}} < n_{\text{naphtènes}} < n_{\text{aromatiques}}$) et avec la masse moléculaire avec laquelle il croît. Il faut préciser aussi que c'est une des déterminations les plus précises qui puisse être conduite sur une coupe pétrolière. En effet, la méthode ASTM D1 248 indique une reproductibilité de 0,00006, ce qui est exceptionnel.

I.3. Différentes méthodes de caractérisation des hydrocarbures :

I.3.1. Les équations d'état :

L'intérêt d'une équation d'état est de permettre de prévoir avec une assez bonne précision le comportement volumétrique des fluides, l'évolution des fonctions thermodynamiques avec la température et la pression ainsi que les équilibres de phases.

Une équation d'état est une relation entre les variables de pression, volume, température et composition, de forme générale :

$$f(P, V, T, x_i) = 0$$

La plus simple des équations d'état est représentée par l'équation des gaz parfaits $P V = n R T$, cette équation représente une approximation d'autant meilleure que la pression est faible. Dans le cas des fluides réels, de nombreuses équations d'état ont été proposées visant à améliorer la représentation de ces fluides pour lesquels les forces d'interaction entre molécules ne sont plus négligeables. Parmi les équations d'état qui existent, les équations d'état cubiques sont très largement utilisées dans les modèles de simulation, en production et dans le traitement des hydrocarbures de gisements.

Les équations d'état cubiques se présentent sous la forme d'une série en volume de puissance un, deux et trois. Parmi ce type d'équations, les plus connues sont celles de Van Der Waals (1873), Redlich-Kwong (1949), Soave-Redlich-Kwong (1972) et Peng-Robinson (1976). Les deux dernières équations ont connu cependant le plus grand succès. Ce type d'équations a, pour forme générale l'expression suivante:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{v^2 + ubV + wb^2}$$

u et w sont des constantes qui dépendent de l'équation d'état. Les paramètres a et b s'expriment en fonction des coordonnées critiques.

$$a = a_c \cdot \alpha \quad \alpha = [1 + m(1 - T_r)^{0.5}]^2$$

$$b = \Omega_b \cdot \frac{RT_c}{P_c} \quad a_c = \Omega_a \cdot \frac{(RT_c)^2}{P_c}$$

Ω_a et Ω_b dépendent de l'équation d'état et m est une fonction du facteur acentrique.

Dans le tableau I.1, nous donnons les valeurs de constantes u, w, Ω_a et Ω_b ainsi que les expressions de m pour les quatre équations d'état cubiques précédentes.

Equations d'état	u	w	Ω_a	m
Van Der Waals (1873)	0	0	27/64	0
Redlich-Kwong (1949)	1	0	0.42748	0
Soave-Redlich-	1	0	0.42748	$0.48 + 1.574\omega - 0.76\omega^2$
Peng-Robinson (1976)	2	-1	0.45724	$0.37464 + 1.5422\omega - 0.2699\omega^2$

Tableau I.1 : valeurs de constantes u, w, Ω_a et Ω_b et expressions de m.

Des équations plus complexes que les équations précédentes, faisant intervenir un nombre plus important de paramètres, ont été proposées pour des situations particulières. Ces équations dites équations d'état non cubiques présentent l'inconvénient d'être en général d'ordre supérieur à trois et de conduire, de ce fait, à des calculs plus fastidieux. Parmi elles, nous pouvons citer les équations d'état du Viriel, Benedict, Webb et Rubin BWR (1951) ou encore de Beattie-Bridgeman (1928) etc.

Les équations d'état présentées précédemment peuvent être étendues aux mélanges en utilisant des règles de mélanges permettant de relier les paramètres des équations d'état appliquées aux mélanges à ceux des corps purs. Dans le cas des équations d'état cubiques, les règles de mélanges usuelles sont les suivantes lorsque la composition est définie en fractions molaires x_i :

$$b = \sum b_i \cdot x_i \qquad a = \sum \sum x_i \cdot x_j \cdot \sqrt{a_i \cdot a_j} \cdot (1 - k_{ij})$$

Les termes k_{ij} sont des termes correctifs appelés coefficients d'interaction, caractéristiques du binaire ij considéré. L'introduction de ce terme est nécessaire lorsque les constituants i et j sont formés par des molécules très dissemblables, soit par leur volume molaire, soit par leur nature chimique.

Une autre façon d'étendre les équations d'état aux mélanges, consiste à considérer les paramètres pseudo-critiques. Cette procédure est généralement appliquée dans le cas des mélanges complexes dont la composition n'est pas connue, tels que les fractions pétrolières.

A partir des équations d'état, il est possible de calculer les fonctions thermodynamiques telles que l'enthalpie, l'entropie ou l'énergie libre pour des conditions de température et de pression fixées, en se référant aux conditions du gaz parfait. En effet, connaissant l'équation d'état, il est possible d'intégrer les expressions donnant l'enthalpie et l'entropie molaires, soient :

$$H = H^\circ + \int_0^P \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) \right] dP$$

$$S = S^\circ + \int_0^P \left[\frac{R}{P} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) \right] dP - R \cdot \ln \frac{P}{P^\circ}$$

H° représente l'enthalpie d'une mole de gaz parfait qui n'est fonction que de la température et S° l'entropie d'une mole de gaz parfait à la température T et à la pression de référence P° (habituellement $P^\circ=10 \text{ Pa}$).

L'application des équations d'état aux hydrocarbures lourds est une opération délicate, due principalement aux propriétés critiques et au facteur acentrique de ces hydrocarbures qui sont difficilement accessibles expérimentalement. Pour résoudre ce problème, certains auteurs se sont proposés de modifier les équations d'état en appliquant les méthodes de contributions de groupes pour la détermination de leurs paramètres et éviter ainsi l'utilisation des paramètres critiques.

Parmi ces auteurs, nous citons Bondi (1964) qui a proposé une méthode de contributions de groupes pour la détermination du paramètre b de l'équation d'état de Van Der Waals. Carrier et coll. (1988) ont proposé quant à eux une modification de l'équation de Peng-Robinson dans laquelle le paramètre b et le facteur acentrique sont exprimés en terme de contributions. Coniglio et coll. (1993) ont amélioré la méthode de Carrier en appliquant des contributions de type Bondi aux deux paramètres a et b . Enfin, plus récemment, Soave et coll.(1995) ont proposé une méthode de contributions de groupes pour la détermination du covolume de l'équation d'état de RedlichKwong.

I.3.2. Loi des états correspondants :

La loi des états correspondants constitue un élément de simplification dans la prévision des propriétés thermodynamiques des fluides réels. Cette loi affirme que les propriétés dépendantes des forces intermoléculaires sont reliées aux paramètres critiques de la même manière pour tous les composés; autrement dit, la fonction reliant les propriétés réduites est indépendante de la nature de la substance, soit :

$$f(T_r, P_r, V_r) = 0$$

Les termes T_r , P_r et V_r représentent respectivement les température, pression et volume réduits.

Sur la base de cette loi, de nombreuses corrélations ont été développées pour l'estimation des propriétés thermodynamiques et volumétriques des corps purs et des mélanges de corps purs.

La première application de la loi des états correspondants consiste dans la corrélation des données P-V-T, en exprimant le facteur de compressibilité Z comme fonction des paramètres réduits P_r et T_r . Cette corrélation a été traduite sous forme de diagrammes généralisés.

Cependant, il a été démontré que cette loi à deux paramètres ne s'applique que pour les molécules bob polaires; c'est le cas par exemple des molécules sphériques telles que le méthane, l'azote, l'argon, etc.

C'est ainsi, qu'il a été proposé d'introduire un troisième paramètre pour représenter l'ensemble des fluides, en plus de la pression et de la température réduite.

Parmi les corrélations à 3 paramètres, les plus connues sont celles utilisant, soit le facteur de compressibilité critique, soit le facteur acentrique comme troisième paramètre.

I.3.2.1 Corrélations fondées sur le facteur de compressibilité critique :

Le facteur de compressibilité critique est défini par :

$$Z_c = \frac{P_c \cdot V_c}{R \cdot T_c}$$

Le choix de ce facteur comme troisième paramètre pour développer des corrélations des états correspondants, repose sur l'examen des divergences entre le comportement des fluides réels et la loi des états correspondants à deux paramètres. En effet, cette dernière prévoit qu'au point critique, le facteur de compressibilité critique a la même valeur pour tous les corps, soit $Z_c = Z(1,1) = 0.27$. Or, il n'en est rien, puisque celui varie de 0.232 pour l'eau à 0.3 pour l'hydrogène, tout en restant néanmoins voisin de 0.27. L'application de cette loi à 3 paramètres aux données P-V-T des fluides réels implique l'existence d'une fonction unique $Z = f(T_r, P_r, Z_c)$ pour représenter chaque classe de composés ayant même facteur de compressibilité critique. Lydersen Greenkom et Hougen (1955) ont développé des tables donnant les valeurs de Z en fonction de P_r et T_r pour différentes valeurs de Z_c .

I.3.2.2. Corrélations fondées sur le facteur acentrique :

Le second paramètre utilisé dans la nouvelle formulation de la loi des états correspondants est le facteur acentrique ω , défini par Pitzer (1955) pour exprimer la bob sphéricité des molécules:

$$\omega = -\log P_r^s - 1 \quad \text{à} \quad T_r = 0.7$$

P_r^s est la pression de saturation réduite et T_r la température réduite.

Appliquée au facteur de compressibilité Z , la loi des états correspondants exprime Z comme une fonction linéaire du facteur acentrique:

$$Z = Z^{(0)} + \omega \cdot Z^{(1)}$$

$Z^{(0)}$ est un terme relatif au fluide simple obéissant à la loi des états correspondants à deux paramètres et $Z^{(1)}$ un terme correctif tenant compte des déviations par rapport à cette dernière loi, dues à la forme et à la dimension des molécules.

Les applications fructueuses de cette loi aux propriétés P-V-T des fluides réels a encouragé le développement de corrélations similaires pour d'autres propriétés qui dépendent des forces intermoléculaires. Ainsi, Curl et Pitzer (1958) ont développé des corrélations sous la forme :

$$L = L^{(0)} + \omega \cdot L^{(1)}$$

L est une propriété thermodynamique donnée, tels que l'enthalpie résiduelle et l'entropie résiduelle ou encore le coefficient de fugacité.

Sur la base de cette corrélation, Lee et Kesler (1975) ont traduit les valeurs des termes $L^{(0)}$ et $L^{(1)}$ sous forme tabulée et sous forme graphique pour différentes valeurs de la température et pression réduites. Ces tables et diagrammes de maniement aisé, concernent différentes propriétés.

Ces auteurs ont proposé une nouvelle formulation de l'équation de Pitzer qui consiste à calculer la valeur L d'une propriété thermodynamique exprimée en fonction des coordonnées réduites, pour un fluide dont le facteur acentrique est ω , à partir des valeurs respectives $L^{(0)}$ et $L^{(1)}$ de cette propriété pour un fluide simple tel que $\omega = 0$ et pour un fluide de référence (n-octane) tel que $\omega = \omega^{(r)}$ en posant:

$$L = L^{(0)} + \frac{\omega}{\omega^{(r)}} (L^{(r)} - L^{(0)})$$

Dans le cas du facteur de compressibilité Z , l'équation précédente prend la forme suivante:

$$Z = Z^{(0)} + \frac{\omega}{\omega^{(r)}} (Z^{(r)} - Z^{(0)})$$

Les termes $Z^{(0)}$ et $Z^{(1)}$ s'expriment en fonction des coordonnées réduites en choisissant une équation d'état.

En appliquant cette méthode à l'équation de Benedict-Webb-Rubin (BWR), Lee et Kesler (1975) ont développé une équation d'état modifiée dans laquelle les paramètres numériques qui interviennent dans l'équation d'état sont exprimés en fonction des coordonnées réduites.

I.3.3. Méthodes empiriques :

Ce sont des méthodes basées essentiellement sur l'expérience où l'on essaie de caractériser les hydrocarbures à partir de propriétés facilement accessibles par expériences. Parmi elles, il y a la méthode de contribution de groupes.

I.3.3.1. Principe de la méthode de contribution de groupes : [3]

A côté de la loi des états correspondants qui a contribué à l'établissement de corrélations pour l'estimation des propriétés physiques et thermodynamiques des corps purs et de leurs mélanges, un second concept dit de contributions de groupes est lui aussi à la base de plusieurs méthodes prédictives.

Ce principe postule que chaque liaison ou atome ou groupement d'atomes constitutif d'une molécule apporte sa contribution aux propriétés macroscopiques de la substance étudiée. Les méthodes qui en découlent portent le nom de méthodes de contributions de groupes.

Par leur principe même, ces méthodes ont pour objectif de rapporter les propriétés des corps à leur structure moléculaire. Leurs formes sont assez variées, et dépendent des types de

groupements et d'environnements choisis pour évaluer les contributions qui sont généralement additives.

La précision de ces méthodes dépend fortement des données expérimentales des propriétés des corps purs utilisées pour déterminer les valeurs des contributions de groupes.

Chapitre II

*Présentation
des Réseaux De Neurones
Artificiels*

II.1. Définition : [4]

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau.

II.2. Historique :

- ✦ **1890** : W. James, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative, et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb.
- ✦ **1943** : J. Mc Culloch et W. Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique. Ceux sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique).
- ✦ **1949** : D. Hebb, physiologiste américain explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. Ainsi, un conditionnement de type pavlovien tel que, nourrir tous les jours à la même heure un chien, entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux.
- ✦ **1957** : F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuroordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance de formes. Notons qu'à cette époque les moyens à sa disposition sont limités et c'est une prouesse technologique que de réussir à faire fonctionner correctement cette machine plus de quelques minutes.

- ✦ **1960** : B. Widrow, un automaticien, développe le modèle Adaline (Adaptative Linear Element). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de rétropropagation de gradient très utilisé aujourd'hui avec les Perceptrons multicouches. Les réseaux de type Adaline restent utilisés de nos jours pour certaines applications particulières.
- ✦ **1969** : M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en exergue les limitations théoriques du perceptron. Limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires. Ils étendent implicitement ces limitations à tous modèles de réseaux de neurones artificiels. Leur objectif est atteint, il y a abandon financier des recherches dans le domaine (surtout aux U.S.A.), les chercheurs se tournent principalement vers l'IA (Intelligence Artificielle) et les systèmes à bases de règles.
- ✦ **1967-1982** : Toutes les recherches ne sont, bien sûr, pas interrompues. Elles se poursuivent, mais déguisées, sous le couvert de divers domaines comme : le traitement adaptatif du signal, la reconnaissance de formes, la modélisation en neurobiologie, etc. De grands noms travaillent durant cette période tels : S. Grossberg, T. Kohonen, ... dont nous reparlerons.
- ✦ **1982** : J. J. Hopfield est un physicien reconnu à qui l'on doit le renouveau d'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels. A cela plusieurs raisons : Au travers d'un article il présente une théorie du fonctionnement et des possibilités des réseaux de neurones. Il faut remarquer la présentation anticonformiste de son article. Alors que les auteurs s'acharnent jusqu'alors à proposer une structure et une loi d'apprentissage, puis à étudier les propriétés émergentes ; J. J. Hopfield fixe préalablement le comportement à atteindre pour son modèle et construit à partir de là, la structure et la loi d'apprentissage correspondant au résultat escompté. Ce modèle est aujourd'hui encore très utilisé pour des problèmes d'optimisation. D'autre part, entre les mains de ce physicien distingué, la théorie des réseaux de neurones devient respectable. Elle n'est plus l'apanage d'un certain nombre de psychologues et neurobiologistes hors du coup. Enfin, en commentaire dans son article

initial, met en avant l'isomorphisme de son modèle avec le modèle d'Ising (modèle des verres de spins). Cette idée va drainer un flot de physiciens vers les réseaux de neurones artificiels. Notons qu'à cette date, l'IA est l'objet d'une certaine désillusion, elle n'a pas répondu à toutes les attentes et s'est même heurtée à de sérieuses limitations. Aussi, bien que les limitations du Perceptron mise en avant par M. Minsky ne soient pas levées par le modèle d'Hopfield, les recherches sont relancées.

- ✦ 1983 : La Machine de Boltzmann est le premier modèle connu apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du perceptron. Mais l'utilisation pratique s'avère difficile, la convergence de l'algorithme étant extrêmement longue (les temps de calcul sont considérables).
- ✦ 1985 : La rétropropagation de gradient apparaît. C'est un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches (aussi appelés Perceptrons multicouches). Sa découverte réalisée par trois groupes de chercheurs indépendants indique que "la chose était dans l'air". Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. De nos jours, les réseaux multicouches et la rétropropagation de gradient reste le modèle le plus étudié et le plus productif au niveau des applications.

Aujourd'hui, dans le monde et en particulier aux U.S.A, l'intérêt pour les réseaux de neurones prend de l'ampleur. Dès 1986, de 600 à 2000 visiteurs participent aux quelques grands congrès annuels. Au niveau commercial, plus de 200 compagnies sont aujourd'hui impliquées dans des développements d'applications connexionnistes. Les prévisions du marché se chiffrent déjà en dizaines de millions de dollars. Il devrait dépasser les 100 millions de dollars dès 1992.

II.3. Le modèle biologique :

Le cerveau se compose d'environ 10^{12} neurones (mille milliards), avec 1000 à 10000 synapses (connexions) par neurone. Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et

d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone. L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angstrom (10^{-9} m) entre l'axone du neurone afférent et les dendrites (on dit *une* dendrite) du neurone efférent. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse (fig. 1).

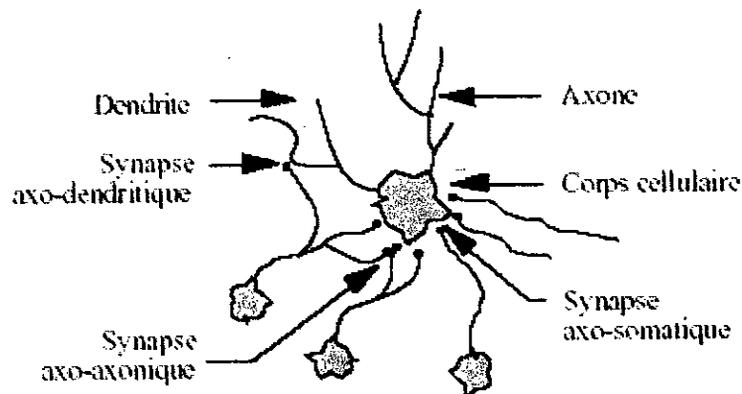


Figure.II.1: Un neurone avec son arborisation dendritique.

Selon le type du neurone, la longueur de l'axone peut varier de quelques microns à 1,50 mètres pour un moto-neurone. De même les dendrites mesurent de quelques microns à 1,50 mètres pour un neurone sensoriel de la moelle épinière. Le nombre de synapses par neurone varie aussi considérablement de plusieurs centaines à une dizaine de milliers.

La physiologie du neurone est liée aux propriétés de la membrane nerveuse et au métabolisme de la cellule. La différence de potentiel mesurée entre le milieu intérieur de la cellule et le milieu extérieur est de -60 mV. Pour maintenir une telle différence de potentiel, la cellule fait appel à des pompes ioniques (Na^+ , K^+ , ...). Cependant, une faible dépolarisation de la membrane entraîne une certaine perméabilité aux ions sodiums (Na^+), dont l'effet peut être catastrophique au niveau cellulaire. En effet, à partir d'une certaine valeur seuil de dépolarisation de la membrane, il y a rupture des équilibres ioniques et création d'un potentiel d'action (aussi nommé "spike" en anglais, fig. 2). Les ions, Na^+ en particulier, s'engouffrent en nombre dans la

cellule (aidés en cela par l'ouverture des canaux Na^+ et une différence de potentiel très attirante de -60 mV). En une milliseconde, la différence de potentiel devient égale à $+60 \text{ mV}$. En fait, à partir d'une valeur de potentiel nulle, l'équilibre ionique est établi et les ions ne devraient plus pénétrer dans la cellule. Cependant, l'effet d'entraînement est tel que cette valeur d'équilibre théorique est largement dépassée. Les différents canaux ioniques se referment alors, les pompes ioniques se remettent à fonctionner, rejetant à l'extérieur de la cellule les ions en excès. Là aussi, on constate un certain effet d'entraînement : le retour à la normale passe d'abord par une phase d'hyperpolarisation. Le potentiel de repos (-60 mV) est dépassé jusqu'à atteindre (-70 mV).

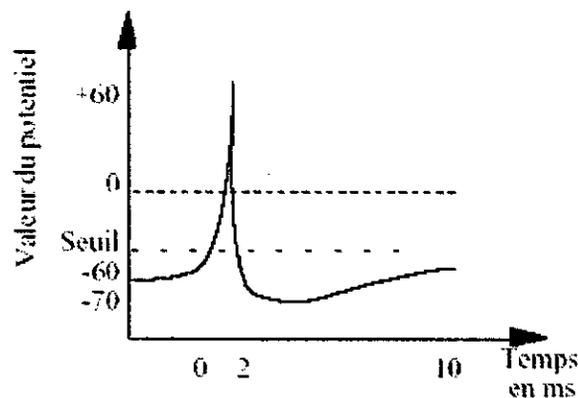


Figure.II.2 : Un potentiel d'action

II.4. Les modèles mathématiques :

Les réseaux de neurones biologiques réalisent facilement un certain nombre d'applications telles que la reconnaissance de formes, le traitement du signal, l'apprentissage par l'exemple, la mémorisation, la généralisation. Ces applications sont pourtant, malgré tous les efforts déployés en algorithmique et en intelligence artificielle, à la limite des possibilités actuelles. C'est à partir de l'hypothèse que le comportement intelligent émerge de la structure et du comportement des éléments de base du cerveau que les réseaux de neurones artificiels se sont développés. Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles, à ce titre ils peuvent être décrits par leurs composants, leurs variables descriptives et les interactions des composants.

II.4.1. Composant (du neurone artificiel) :

La figure-3- montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associée un poids w abréviation de weight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associée un poids.

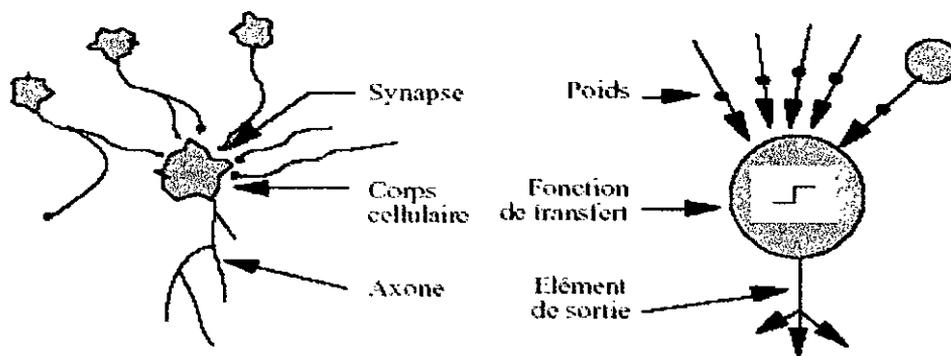


Figure.II.3: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel

On distingue deux phases. La première est habituellement le calcul de la somme :

$$a = \sum w_i \times e_i$$

A partir de cette valeur, une fonction de transfert calcule la valeur de l'état du neurone. C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones avals. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. Les plus courantes sont présentées sur la figure 4. On remarquera qu'à la différence des neurones biologiques dont l'état est binaire, la plupart des fonctions de transfert sont continues, offrant une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle $[-1, +1]$; $[0, +1]$ ou même $[-\infty, +\infty]$.

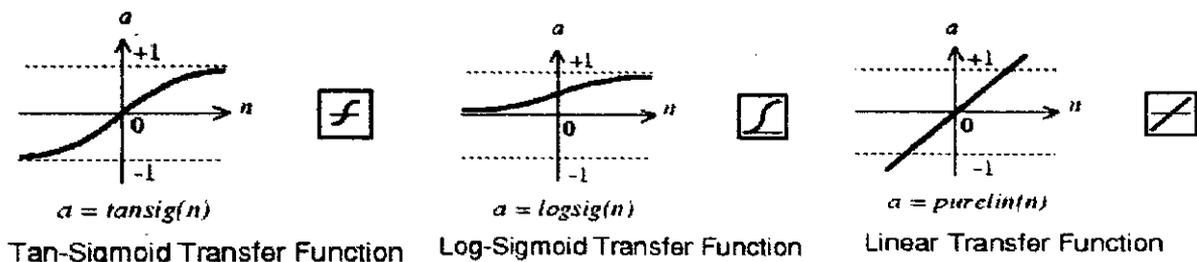


Figure.II.4 : Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel.

Nous constatons que les équations décrivant le comportement des neurones artificiels n'introduisent pas la notion de temps. En effet, et c'est le cas pour la plupart des modèles actuels de réseaux de neurones, nous avons affaire à des modèles à temps discret, synchrone, dont le comportement des composants ne varie pas dans le temps. Ces variables décrivent l'état du système. Dans le cas des réseaux de neurones qui sont des systèmes non autonomes, un sous-ensemble des variables descriptives est constitué par les variables d'entrée, variables dont la valeur est déterminée extérieurement au modèle.

II.4.2. Structure d'interconnexion :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité.

Réseau multicouche (au singulier) : les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales (fig. 5). Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelés couches cachées.

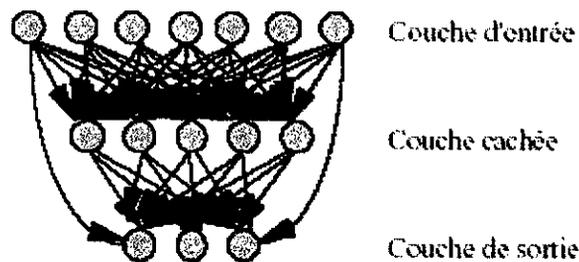


Figure.II.5 : Définition des couches d'un réseau multicouche.

Réseau à connexions locales : Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale (fig. 6). Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

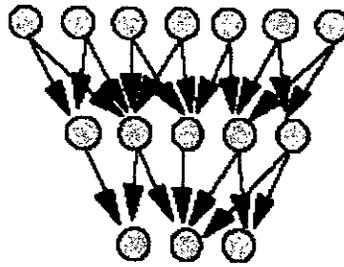


Figure.II.6 : Réseau à connexions locales

Réseau à connexions récurrentes : les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales (fig. 7).

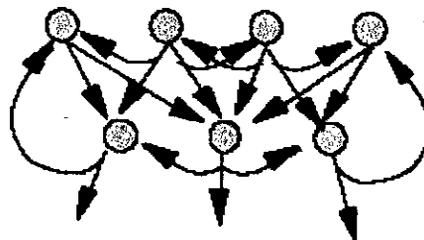


Figure.II.7 : Réseau à connexions récurrentes

II.4.3. Apprentissage :

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Elle ne concerne cependant pas tous les modèles, mais les plus utilisés.

II.4.3.1. Définition :

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement.

Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, on ajoute souvent à la description du modèle l'algorithme d'apprentissage. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt.

Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions. L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience. Il est souvent impossible de décider a priori des valeurs des poids des connexions d'un réseau pour une application donnée. A l'issue de l'apprentissage, les poids sont fixés : c'est alors la phase d'utilisation. Certains modèles de réseaux sont improprement dénommés à apprentissage permanent. Dans ce cas il est vrai que l'apprentissage ne s'arrête jamais, cependant on peut toujours distinguer une phase d'apprentissage (en fait de remise à jour du comportement) et une phase d'utilisation. Cette technique permet de conserver au réseau un comportement adapté malgré les fluctuations dans les données d'entrées.

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il a été défini deux grandes classes selon que l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé. Cette distinction repose sur la forme des exemples d'apprentissage. Dans le cas de l'apprentissage supervisé, les exemples sont des couples (Entrée, Sortie associée) alors que l'on ne dispose que des valeurs (Entrée) pour l'apprentissage non supervisé.

Nous allons mieux expliciter l'apprentissage supervisé car ce dernier étant utilisé lors de l'établissement du réseau de neurones pour l'estimation des propriétés des fraction pétrolières et donne un aperçu sur le réel avantage des R.N.A.

II.4.3.2. Apprentissage supervisé :

Le but de l'apprentissage supervisé est d'inculquer un comportement de référence au réseau. On suppose alors qu'à chaque patron d'entrée I^t est associée une sortie désirée D^t , un patron est présenté aux neurones d'entrée, puis l'activation est propagée à travers le réseau. La réponse des neurones de sortie est alors comparée aux valeurs désirées ; ceci détermine l'erreur du réseau E^t pour le patron donné. Il s'agit alors de répartir cette erreur à chaque poids du réseau

en fonction de la part qu'il a ajoutée dans la production de l'erreur. On procède alors à une modification des poids qui vise à réduire l'erreur ainsi calculée.

En partie, on procède par série d'approximations successives, où l'ensemble des patrons est présenté plusieurs fois au réseau et où les poids synaptiques sont modifiés de façon à améliorer graduellement le comportement global du réseau.

En général, pour un apprentissage, on utilise la méthode du gradient (descente de gradient) (fig. 8).

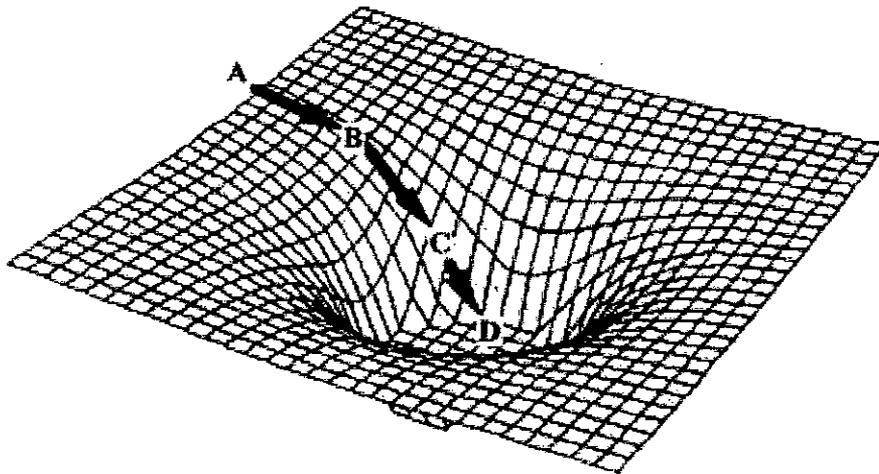


Figure.II.8 : La descente de gradient trouve, à partir d'une solution initiale(A) des solutions successivement meilleures, en effectuant des « sauts » (B,C) dans la direction opposée au gradient de la fonction E. La solution finale (D) est un minimum de E.

II.4.3.3. Problèmes d'apprentissage : [5]

Il est clair qu'un grand nombre de choix s'imposent à celui qui voudrait entraîner un réseau neuromimétique. Chaque choix compte plus d'un écueil potentiel, dont par exemple :

- ↳ **Insuffisance de la règle d'apprentissage :** Plusieurs réseaux sont capables en principe de calculs élaborés. En revanche, rien ne garantit que la règle d'apprentissage soit capable de tirer profit du plein potentiel du réseau.

- ✦ **Minima locaux :** La majorité des apprentissages supervisés procèdent par descente de gradient. Ce type de techniques peut conduire à une solution sous optimale. Ce problème est du au fait que la surface d'erreur n'est généralement pas connue.
- ✦ **Mauvais choix des paramètres :** Le comportement des réseaux est gouverné par un ensemble de paramètres architecturaux, pour lesquels un mauvais choix de valeurs peut compromettre l'apprentissage. Parmi ceux là, on peut citer le nombre de neurones cachés, pas d'apprentissage...
- ✦ **Surapprentissage :** Quand l'apprentissage d'un réseau est prolongée, son choix de poids reflète de trop près les particularités du corpus d'apprentissage, au détriment de la tâche réelle.
- ✦ **Mauvais échantillonnage :** Les corpus d'apprentissage ne reflètent pas toujours adéquatement la tâche, soit par mauvais échantillonnage, soit tout simplement parce qu'ils sont trop petit, il résulte que le réseau généralise mal, il se comporte incorrectement quand il est mis en situation réelle.
- ✦ **Oubli et interférence :** Certains patrons peuvent interférer avec l'apprentissage des patrons. Cela est particulièrement vrai lorsque le corpus d'apprentissage est grand, ou que le comportement à apprendre comprend plusieurs cas exceptionnels. Ces derniers sont alors difficiles à apprendre par le réseau et peuvent nécessiter un traitement particulier.
- ✦ **Mauvais codage :** Il se peut que la technique de codage choisie occulte ou rende inutilement obscure l'information nécessaire à la résolution du problème.

II.4.4. Architecture des PMC (Perceptron Multi Couches) :

Le PMC a une structure bien particulière : ses neurones sont organisés en couches successives comme présenté sur la Figure.9. Chaque neurone d'une couche reçoit des signaux de la couche précédente et transmet le résultat à la suivante, si elle existe. Les neurones d'une même

couche ne sont pas interconnectés. Un neurone ne peut donc envoyer son résultat qu'à un neurone situé dans une couche postérieure à la sienne. L'orientation du réseau est fixée par le sens, unique, de propagation de l'information, de la couche d'entrée vers la couche de sortie. Pour les réseaux considérés, les notions de couches d'entrée et de sortie sont donc systématiques. Ces dernières constituent l'interface du réseau avec l'extérieur. La couche d'entrée reçoit les signaux (ou variables) d'entrée et la couche de sortie fournit les résultats. Enfin, les neurones des autres couches (couches cachées) n'ont aucun lien avec l'extérieur et sont appelés neurones cachés.

Par convention, les neurones d'entrée ont toujours une fonction d'activation «identité», laissant passer l'information sans la modifier. En ce qui concerne le neurone de sortie, on peut lui associer une fonction d'activation linéaire ou non, dérivable ou non, suivant la nature du problème à résoudre. En ce qui concerne la fonction d'activation associée aux neurones cachés, on utilise dans le cadre de cette thèse une fonction d'activation de la famille des sigmoïdes.

Le perceptron multicouches décrit en Figure 9 comporte p unités en entrée, recevant respectivement p variables $\{X_1, X_2, \dots, X_p\}$, et une seule unité de sortie, qui produit la variable Y . Ce modèle réalise une application de \mathbb{R}^p dans \mathbb{R} . L'architecture du réseau, déterminée par le schéma de connexion des neurones, fige ainsi une composition de fonction élémentaire et représente une famille $G(., W)$ de fonctions non linéaires et dont les paramètres sont les poids de connexions du réseau W .

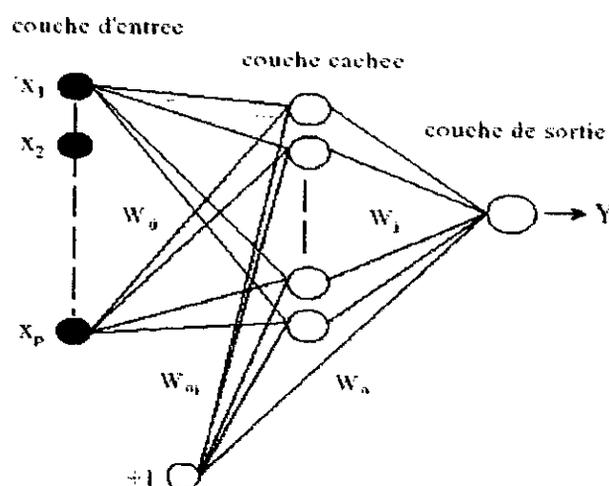


Figure.II.9 : Architecture d'un PMC à une couche cachée (n neurones cachés sigmoïdes) avec p neurones d'entrée et ($q=1$) neurone de sortie linéaire.

La sortie du réseau aura une expression de la forme suivante dépendant du nombre de couches le composant :

$$y = \sum_{i=1}^N W_i \times f_i \left[\sum_{j=1}^p W_{ij} \times X_j + W_{i0} \right] + W_0$$

II.4.4.1. Approximation de fonction :

La détermination d'une fonction neuronale à partir d'observations se ramène au problème classique de la détermination des paramètres du modèle (les poids de connexions) par régression au sens des moindres carrés. Pour construire cette fonction, deux choses sont indispensables : un ensemble de fonctions candidates (définie par l'architecture du réseau), parmi lesquelles on va rechercher celle qui nous intéresse, et un critère d'apprentissage permettant d'en choisir une. Le but de l'apprentissage est donc de déterminer un modèle qui va généraliser un processus décrit par un nombre fini N de comportements qui composent l'ensemble d'apprentissage.

II.4.4.2. Apprentissage :

Approximer une fonction T de \mathbb{R}^p dans \mathbb{R}^q à l'aide d'un PMC revient à utiliser une fonction g choisie au sein d'une famille $G(\cdot, W)$ associée à une architecture de réseau dont les couches d'entrée et de sortie comportent respectivement p et q neurones.

$$\begin{aligned} A \in \mathbb{R}^p &\rightarrow B \in \mathbb{R}^q \\ \vec{X} &\rightarrow \vec{Y} = G(\vec{X}, W) \end{aligned}$$

La famille $G(\cdot, W)$ est donc un système paramétré qui associe un espace de sortie $B \in \mathbb{R}^q$ un espace d'entrée $A \in \mathbb{R}^p$. Approximer T à partir de $G(\cdot, W)$ revient ainsi à rechercher la fonction $g \in G(\cdot, W)$ telle que :

$$g(\vec{X}) = G(\vec{X}, W^*) \approx T(\vec{X}) \quad \forall \vec{X} \in A$$

où W représente l'ensemble des poids du réseau.

Le nombre de couches cachées et le nombre de neurones des couches cachées sont à déterminer de manière optimale suivant la difficulté de la fonction à approximer et l'ensemble

d'apprentissage dont on dispose. Le choix de l'architecture du réseau définit de façon implicite la famille de fonction $G(.,W)$.

L'étape suivante est la détermination des poids optimaux W^* et donc de la fonction g dans $G(.,W)$ qui approche au mieux la fonction T étudiée. Ces poids sont déterminés par un algorithme dit d'apprentissage qui correspond à la phase d'estimation des paramètres du modèle. Cette détermination se fait à partir de N exemples $((x_k, y_x), k=1,N)$ qui décrivent la fonction recherchée. La fonction $g(x)$ obtenue en fin d'apprentissage est continue, elle permet donc d'interpoler la fonction entre les N points utilisés durant l'apprentissage. L'algorithme d'adaptation des poids est connu sous le nom d'algorithme de rétropropagation du gradient (Rumelhart *et al.*, 1986 ; Le Cun *et al.*, 1985). La précision de l'approximation va dépendre de l'ensemble d'apprentissage et donc de la manière dont le problème est décrit par les données.

II.4.4.3. Principe de la rétropropagation du gradient :

Lorsque que la fonction g est non linéaire, la minimisation de la fonction coût (3) fait appel à des algorithmes itératifs basés sur un calcul du gradient. Un algorithme très simple et devenu célèbre, la rétropropagation du gradient, à été proposé par Rumelhart *et al.* (1986) et LeCun, (1985). Cette algorithme est présenté dans la plupart des livres et thèses consacrés aux réseaux de neurones (par exemple, Tran, 1999), il est basé sur l'idée suivante : au départ, les poids $\{W_{ij}\}$ sont initialisés à des valeurs aléatoires. Le but de la méthode d'apprentissage est de les faire évoluer de façon à ce que le réseau soit capable, étant donné un vecteur d'entrée, de calculer le bon vecteur de sortie. L'algorithme de rétropropagation du gradient est un algorithme itératif, les poids sont modifiés à chaque étape selon la règle suivante :

$$W_{ij}(t) = W_{ij}(t-1) + \Delta W_{ij}(t)$$

Les poids à l'itération t correspondent aux poids à l'itération $t-1$ plus une correction dépendant du signal d'erreur. Définissons la fonction de coût suivante (algorithme stochastique) :

$$E_N(W) = \sum_{k=1}^N E_N^k(W)$$

L'erreur est minimisée à chaque présentation d'un exemple x_k en faisant évoluer les $\{W_{ij}\}$ suivant la courbe de plus grande pente sur la surface définie par la fonction d'erreur E_N^k . ΔW_{ij} est proportionnelle à l'opposé du gradient :

$$\Delta W_{ij} = -\eta \frac{\partial E_N^k(\bar{x}_k, W)}{\partial W_{ij}}$$

avec η un facteur choisi de pondération, nommé pas d'apprentissage. En adoptant une formulation quadratique de l'écart, on a :

$$E_N^k(W) = (y_k - G(\bar{x}_k, W))^2$$

en supposant que la sortie est à une dimension.

II.4.4.4. Des approximateurs universels :

Vingt ans après la publication de l'ouvrage où Minsky et Papert (1969) exposaient les limitations de Perceptron simple, Cybenko *et al.* (1989) et Hornik *et al.* (1989) établissent les réseaux de neurones comme une classe d'approximateurs universels. Il a été ainsi démontré qu'un perceptron multicouches avec une seule couche cachée pourvue d'un nombre suffisant de neurones, peut approximer n'importe quelle fonction avec la précision souhaitée. Néanmoins, cette propriété ne permet pas de choisir, pour un type de fonction donné, le nombre de neurones optimal dans la couche cachée. Autrement dit ce résultat ne mène pas vers une technique de construction d'architecture.

II.4.4.5. La base d'apprentissage :

La base d'apprentissage est une base de données contenant des couples d'entrées-sorties servant à déterminer les valeurs des paramètres d'un réseau de neurones lors de la phase d'apprentissage supervisé. Le PMC est un interpolateur imparfait des observations contenues dans cette base, puisqu'il commet une erreur aux points d'observations. Or, la base d'exemples n'échantillonne jamais l'espace des données de manière parfaite. Il est souhaitable, pour bien contraindre un PMC, que le nombre de contraintes (nombre d'exemples dans la base d'apprentissage) imposées soit très supérieur au nombre de degrés de liberté du réseau (nombre

de poids). Le nombre minimum souhaitable d'exemples est lié à la complexité de la fonction à simuler et à l'architecture du réseau choisie.

En effet, un bon estimateur g est caractérisé par une bonne précision, c'est-à-dire un faible biais et une bonne stabilité, c'est-à-dire une variance faible. Or, ces deux objectifs sont contradictoires. Geman *et al.* (1992) ont développé l'idée suivante : pour un problème donné et des échantillons de taille fixe, un réseau sous-dimensionné aura un biais important et un terme de variance faible. A contrario, un réseau surdimensionné possédera un grand nombre de degrés de liberté et l'optimisation conduira à des solutions pouvant être très différentes, ce qui correspond à une composante de variance importante. L'idée est donc que le biais diminue et que la variance augmente lorsque la taille du réseau augmente. Il y aurait donc une « zone » de bon compromis correspondant à une bonne taille du réseau pour le problème traité et le nombre d'exemples d'apprentissage. Il est généralement bien accepté qu'il soit nécessaire de disposer d'un échantillon de taille N qui soit au minimum de l'ordre de dix fois le nombre de paramètres à déterminer (les poids). Derrière ces considérations générales se dissimule l'irrégularité fréquente de l'échantillonnage : plus dense dans certaines régions de l'espace des données que dans 'autres. La méthode d'échantillonnage apparaît primordiale.

II.4.4.6. La base de test :

Du fait des capacités d'approximation universelle des modèles neuronaux, l'apprentissage peut mener à un sur ajustement de la fonction, on parle aussi de sur apprentissage. On observe ce genre de problème lorsque l'on utilise un modèle comportant un grand nombre de paramètres pour modéliser une fonction de trop faible complexité. Pour mettre en évidence ce problème on utilise une base de test, autre échantillonnage de l'espace des données. Lors de l'étape d'estimation des paramètres, le phénomène de sur apprentissage.

Chapitre III

*Présentation des
Propriétés Étudiées et
du Logiciel Utilisé
pour leur Calcul*

III.1. Les propriétés étudiées :

III.1.1. Introduction :

Dans le souci de mieux connaître les propriétés du pétrole les ingénieurs et chercheurs ont sans cesse essayé de modéliser le comportement de ce fluide, des modèles mathématiques ont vu le jour pour faciliter l'accès à certaines données qui en temps normale ne peuvent être obtenues qu'à l'aide d'expérimentations très coûteuses en argent et en main d'œuvre.

Le choix de ces propriétés est dû au fait que la banque de donnée utilisée ne propose qu'un nombre restreint de propriétés, mais son avantage est de posséder une éventail très large de 235 fractions pétrolières [35- 523,89°C].

III.1.2. Facteur de caractérisation Kuop : [7]

III.1.2.1. Définition :

A partir de l'examen de la variation de la specific gravity ou de l'inverse de la densité (°API) en fonction de la température d'ébullition à pression atmosphérique, pour différentes familles d'hydrocarbures Nelson Watson et Murphy de la société UOP (Universal Oil Product) ont remarqué que les hydrocarbures se superposaient régulièrement sur des courbes différentes selon la famille considérée.

Ces auteurs ont alors proposé en 1937 la formule suivante qui définit le facteur de caractérisation Kuop. Pour pouvoir rendre compte de la tendance de la fraction pétrolière ou du pétrole brut.

$$Kuop = \frac{(T_{mav} \text{ en } ^\circ R)^{1/3}}{SpGr (60^\circ / 60^\circ F)}$$

SpGr : specific gravity.

T_{mav} : température d'ébullition moyenne d'une fraction pétrolière.

On peut avoir une estimation du comportement de la fraction pétrolière relativement aux différentes familles en connaissant le Kuop.

Exemple:

Kuop \approx 13: paraffines et isoparaffines.

Kuop \approx 12: hydrocarbures mixtes où le cycle et la chaîne sont équivalents

Kuop \approx 11: naphènes purs ou aromatiques légèrement substitués.

Kuop \approx 10: aromatiques purs.

III.1.3. La specific gravity SpGr :

La specific gravity est équivalente à la densité, d'après la terminologie anglo-saxons, définie pour deux températures standards identiques, soit 60°F : (SpGr 60/60 °F), c'est-à-dire environ la densité à 15°C.

Excepté pour les calculs nécessitant une très grande précision, nous pourrions toujours confondre la specific gravity 60/ 60°F et la densité à 15°C.

III.1.4. La masse molaire :

III.1.4.1. Définition :

La masse molaire d'une substance est définie comme étant la masse d'une mole de molécules de cette substance. Evidement, il est plus facile de déterminer la masse molaire si on connaît la formule brute de la substance.

Du point de vu analytique on dispose de différentes méthodes dérivées des propriétés thermodynamiques comme la cryoscopie, la tonométrie, l'osmométrie...

De nombreuses équations et méthodes graphiques ont été proposées pour l'estimation de la masse molaire des corps purs, mélanges et fractions pétrolières, permettant ainsi d'éviter l'expérience qui n'est pas toujours disponible ou alors nécessitant beaucoup de temps. Ces méthodes permettent en général d'approcher cette grandeur rapidement et avec une assez bonne précision.

III.1.4.2. Corrélations utilisées pour la comparaison des résultats :

Le choix des corrélations ci-dessous est dû à leur bons résultats, c'est-à-dire une erreur moyenne acceptable, à leur condition d'utilisation et aussi parce qu'elles ne nécessitent pas

des propriétés non disponibles au niveau de la banque de donnée. On peut éventuellement accéder aux propriétés manquantes par l'intermédiaire d'autres corrélations mais cela diminuera de leur efficacité du fait du cumul d'erreurs de chaque corrélation introduite.

Corrélation de Winn : Il propose de relier la masse molaire à la température moyenne d'ébullition et à la specific gravity.

$$M = \frac{5.805 E^{-5} \times (T_{eb})^{2.3776}}{(SpGr)^{0.9371}}$$

avec T_{eb} en °R

Corrélation de Kuppou-Bardon (K-B) : Ces deux auteurs une corrélation liant la masse molaire au facteur de caractérisation K_{uop} et à la température moyenne d'ébullition.

$$M = \left(\frac{T_{eb}}{A} \right)^B$$

avec :

$$A = 22.31 + 1.68 K_{uop}$$

$$B = 1.27 + 0.071 K_{uop}$$

T_{eb} : température d'ébullition en °R

III.1.5 Indice de réfraction :

III.1.5.1. Définition :

Les rayons lumineux changent de vitesse et de direction en passant d'un milieu à un autre: ce phénomène est appelé réfraction.

On définit l'indice de réfraction n d'une substance par le rapport du sinus de l'angle de - r et du sinus de l'angle d'incidence, soit :

$$n = \frac{\sin r}{\sin i}$$

où r et i représentent respectivement les angles de réfraction et d'incidence.

Généralement, l'indice de réfraction est mesuré par rapport à la raie jaune du sodium D de longueur d'onde 589.3 nm ; il est noté n_D^T , où T est la température de mesure.

Une augmentation de la température entraîne la diminution de l'indice de réfraction. Cet effet par la relation suivante:

$$n_D^{20} = n_D^T - 0.004(20 - T)$$

n_D^{20} étant l'indice de réfraction à 20°C.

La mesure expérimentale des indices de réfraction des liquides est effectuée grâce à un appareil Appelé réfractomètre d'ABBE, dont la manipulation est régie par des normes telle que la norme ASTM D1218.

III.1.5.2. Corrélations utilisées pour la comparaison des résultats :

En première approximation l'indice de réfraction des fractions pétrolières peut être calculé en utilisant la règle d'additivité. On choisira la corrélation de Dermoune Chitour pour effectuer la comparaison

$$n_P = 4.062 E^{-4} \times M + 2.001 E^{-4} \times T_{eb} + 1.3235$$

$$n_N = 1.336 E^{-4} \times M + 0.739 E^{-4} \times T_{eb} + 1.4063$$

$$n_A = -9.993 E^{-5} \times M - 5.313 E^{-5} \times T_{eb} + 1.510$$

avec

$$n = n_P \times X_P + n_N \times X_N + n_A \times X_A$$

III.1.5. La composition des fractions pétrolières :

III.1.5.1. Introduction :

Le pétrole brut est composé en presque totalité d'hydrocarbures, nous y trouvons essentiellement les trois familles d'hydrocarbures (Paraffines, Naphtènes et Aromatiques), en général les fractions pétrolières mêmes étroites sont des mélanges assez complexes d'hydrocarbures et de leurs dérivés hétéro-atomiques, et comme il est bien souvent difficile de connaître individuellement les constituants d'une fraction pétrolière si ce n'est dans les cas favorables par un couplage chromatographie spectrométrie de masse, nous devons souvent nous contenter de connaître la composition globale en chacune des familles d'hydrocarbures.

Dans le but de répondre à ce besoin, plusieurs méthodes ont été développées, parmi ces méthodes on distingue les méthodes expérimentales qui nécessitent un temps long et un matériel coûteux (Chromatographie, Spectrométrie de masse, Infrarouge, RMN, etc.) et les méthodes utilisant les corrélations empiriques qui reposent sur les résultats de corrélations sur le comportement de mélanges d'hydrocarbures. Les données expérimentales accumulées ont permis de trouver des corrélations entre la répartition du carbone dans les différentes familles et les constantes physiques des hydrocarbures et de leurs mélanges. Cependant souvent les méthodes déjà développées présentent des contraintes que nous expliquerons par la suite.

III.1.5.2. Corrélations utilisées pour la comparaison des résultats :

Ce sont des méthodes simples, rapides, peu onéreuses; elles permettent d'avoir rapidement une idée de la composition. Leur précision sans être parfaite, permet néanmoins d'approcher la composition du pétrole brut ou de la fraction pétrolière.

Méthode de S.m.Ri.C/H :

•Pour $m < 200$ (fractions légères) :

$$\begin{aligned} X_P &= 373.87 - 408.29 \times S + 1.4772 \times m \\ X_N &= -150.27 + 210.152 \times S - 2.388 \times m \\ X_A &= 100 - (X_P - X_N) \end{aligned}$$

•Pour $m > 200$ (fractions lourdes) :

$$\begin{aligned} X_P &= 198.42 - 27.722 \times R_i + 15.643 \times C/H \\ X_N &= 59.77 - 76.174 \times R_i - 6.80048 \times C/H \\ X_A &= 100 - (X_P - X_N) \end{aligned}$$

avec :

$$m = M \times (n - 1.4750)$$

$$R_i = \frac{n_d^{20} - d_4^{20}}{2}$$

$$C/H = \frac{100}{2.5531 \times K_{uop} - 0.0022248 \times T_{eb} (^{\circ}R) - 14.77732618} - 1$$

III.2. Présentation du logiciel :

Pour l'établissement des Réseaux de Neurones Artificiels et dans le but d'approximer des fonctions capables de prédire une propriété spécifique préalablement choisie, nous avons utilisé le logiciel de calcul Matlab® dans sa version 6.5.

Le programme permettant la création des réseaux de neurones appelé NNTOOL (version 4.0b4) tourne sous environnement du logiciel précédemment cité, pour le lancer il suffit d'introduire le nom du programme dans la fenêtre de commande et de valider. Ce dernier présente une interface simple et facile à manipuler (fig.1)

Une fois le programme lancé, il nous permettra de créer un réseau, le visualiser, l'entraîner, le simuler, et exporter les valeurs de sortie. De même on peut importer des valeurs d'entrée ou sauvegardées.

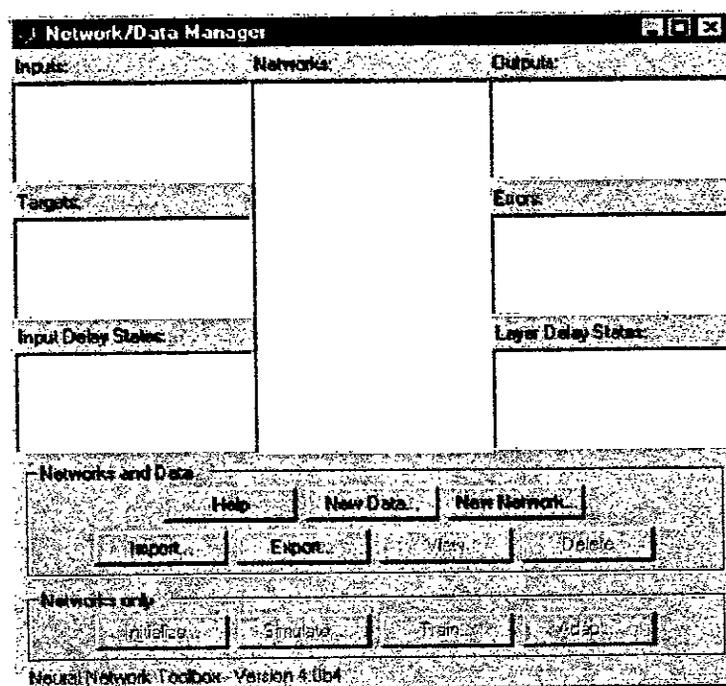


Figure.III.1:interface du programme « NNTOOL »

III.2.1. Création des données :

Avant de créer un réseau il faut d'abord introduire les données d'entée qui sont dans notre cas la température moyenne d'ébullition T_{mav} et la densité d des fractions pétrolières,

elles permettent l'apprentissage du réseau. Il peut y avoir plusieurs types d'entrées, mais celles utilisées dans notre cas sont:

- ✦ **Inputs** : qui représente les données utilisées pour l'apprentissage du réseau et celles utilisées pour les valeurs tests (le couple $[T_{max}, d]$).
- ✦ **Targets** : ce sont les valeurs qui doivent être atteinte par le réseau.

Après avoir cliqué sur import, une fenêtre apparaît qui nous permet d'introduire les le type de données désirés (fig.2)

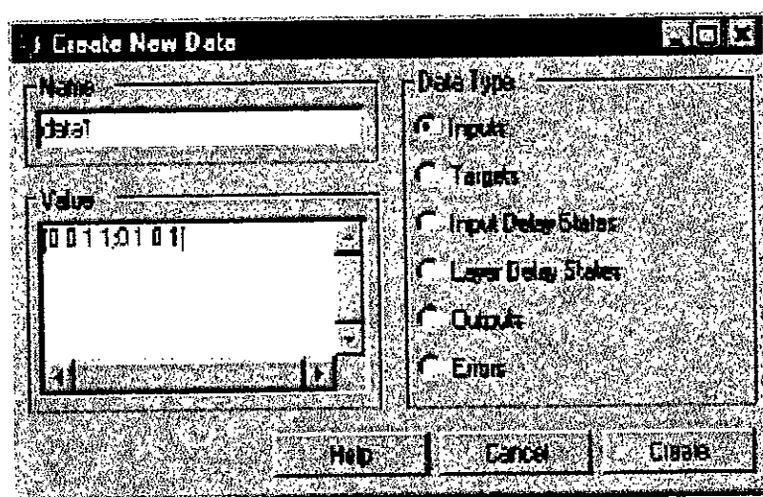


Figure.III.2:fenêtre de données

III.2.2. Création du réseau :

Pour créer un réseau, on clique sur New Network, on obtient alors la fenêtre Create New Network (fig.3), on donne un nom au réseau, puis on choisit le type de réseau préprogrammé. Le Feed foward Propagation (rétropropagation de gradient) et tout désigné pour ses propriétés de convergence et ses capacités d'approximations. Puis on sélectionne les données d'entrée.

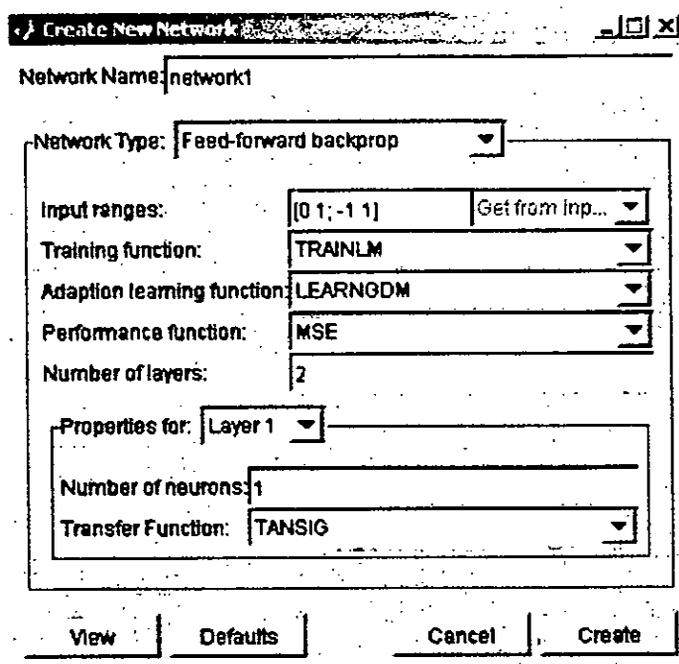


Figure.III.3:fenêtre de création de réseaux.

Il reste alors à déterminer les composantes du réseau : la fonction d'entraînement, la fonction d'apprentissage, la fonction de performance, le nombre de couches de neurones, les fonctions d'activation ainsi que le nombre de neurones dans chaque couche.

Dans le cadre de notre projet, ces paramètres considérés comme étant des variables, ont été choisis de telle sorte que les réseaux établis soient optimisés et donnent les meilleurs résultats.

✚ Pour les trois premières, et d'après la littérature [10], les variables choisies sont comme suit :

variables	Choix	avantages
fonction d'entraînement	l'algorithme de Levenberg-Marquardt (trainlm)	<ul style="list-style-type: none"> • Très grande vitesse de convergence. • Grandes capacités d'approximation
fonction d'apprentissage	Leangdm	—
la fonction de performance	SSE	—

- ✚ Pour ce qui est du nombre de couches de neurones il est de deux comme le présente la figure 4.

Remarque : l'entrée n^1 est pas considérée comme étant une couche du réseau, la première représente la couche caché et la seconde représente la sortie du réseau.

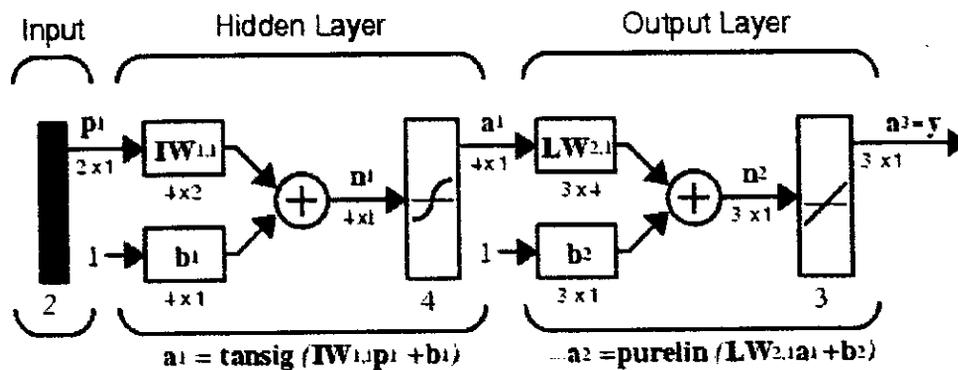


Figure.III.4:représentation schématique d'un Réseau de Neurones Artificiel.

- ✚ Plusieurs études ont montrés que l'apprentissage des réseaux multicouches converge plus rapidement quand la fonction sigmoïde tangentielle est employée plutôt que la sigmoïde exponentielle. La fonction de transfert choisie pour la couche cachée est la fonction sigmoïde tangentielle.

Pour la fonction de sortie, il est clair qu'on ne peut qu'utiliser la fonction linéaire dite : *Purlin* du fait que les autres fonction sont bornées et cela limite la plage des données de sortie ($[-\infty, +\infty]$ pour la *Purlin*).

- ✚ Le nombre de neurones caché étant dépendant de la quantité de données d'entrée et la et la structure de réseau nous contraint à optimiser ce paramètre pour obtenir le réseau optimum. Cette partie sera développée dans le chapitre suivant.

III.2.3. Mise en œuvre du réseau :

Après avoir créé le perceptron, on le sélectionne et en cliquant sur le bouton d'initialisation la fenêtre de mise en œuvre apparaît (fig.5)

A chaque volé de la fenêtre on sélectionne la banque de donnée appropriée, qui nous permet dé lors de simuler, entraîner et adapter le réseau.

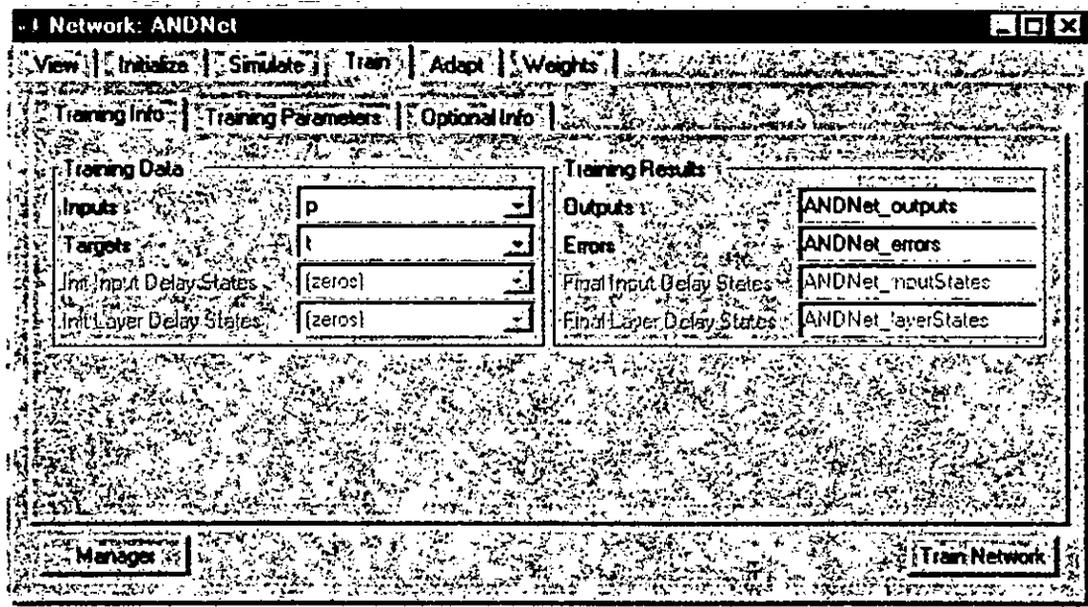


Figure.III.5:fenêtre de mise en oeuvre du réseau

Lors de la simulation un graphique apparaît automatiquement présentant l'état d'avancement de l'apprentissage (fig.6). Ce dernier peut être arrêté de plusieurs manières :

- ✦ Manuellement c'est-à-dire en cliquant sur le bouton d'arrêt.
- ✦ En fixant la durée d'apprentissage et l'écart minimal entre le point simulé et le point d'entrée.
- ✦ En fixant la durée d'apprentissage ou l'écart minimal entre le point simulé et le point d'entrée.

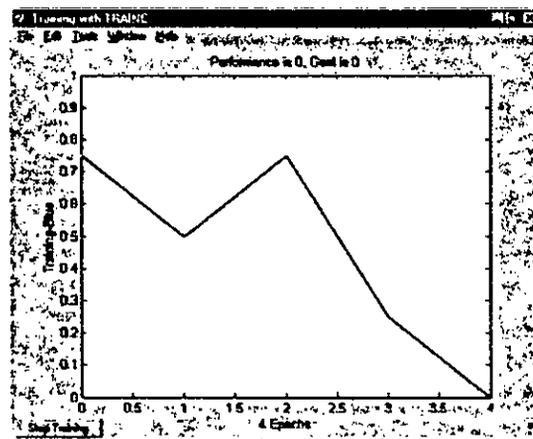


Figure.III.6:graphique de l'évolution de l'apprentissage.

Après avoir effectué l'apprentissage il nous reste juste à adapter les données test au réseau c'est-à-dire, introduire des variables d'entrée de la banque test pour obtenir les valeurs estimées par le réseau.

Chapitre IV

*Méthodologie de Travail
et Résultats Obtenus*

IV.1. Méthodologie de travail :

Après avoir présentée les propriétés étudiées et le logiciel utilisé, nous allons expliciter toutes les étapes qui nous ont permis d'obtenir les résultats.

Afin de réaliser l'approximation de fonction souhaitée, à partir d'échantillons généralement bruités, à l'aide d'un réseau de neurones, on procède de la manière suivante:

IV.1.1. Choix de l'échantillon :

Établi avec 235 fractions pétrolières issues de divers pétroles (voir Annexe 1) classés suivant leur température moyenne d'ébullition.

IV.1.1.1. Origine de la banque de donnée :

- Pour les fractions considérées légères de 35 à 150°C, le nombre d'échantillon est de 95 fractions, leur origine est présentée ci-dessous.

Fractions N° :2, 7, 14, 26, 88 (issues d'un brut Algérien de Gellala).

Fractions N° :1, 3, 8, 15, 18, 23, 35, 48, 65, 75 (issues d'un brut Algérien de Hassi Messaoud « solvant léger »).

Fractions N° :16, 19, 24, 36, 49, 66, 76, 86, 89 (issues d'un brut Algérien de Hassi Messaoud « solvant lourd »).

Fraction N° :60, (issue d'un brut Algérien d'Ohanet).

Fraction N° :44, (issue d'un brut Algérien de Zarzaitine).

Fractions N° :21, 25, 28, 37, 42, 50, 57 (issues d'un brut Algérien de Rastomb).

Fractions N° :22, 51, 77, 90 (issues d'un brut Algérien de Hassi R'mel).

Fractions N° :30,91 (Private communication 1977).

Fractions N° :4, 56, 9, 10, 11, 12,13, 20, 27, 29, 31,32, 33, 34, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 46, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 92, 93, 94, 95 (bank of data collected at Penn State from private open literature and government sources).

Ces fractions ont été classées dans l'ordre croissant de leur température moyenne d'ébullition de 35 à 150°C, Tableau A.1.1

- Pour les fractions considérées moyennement lourdes de 150 à 300°C, le nombre d'échantillon et de 65 fractions, leur origine et présentée si dessous.

Fractions N° :7, 23 (issues d'un brut Algérien de Gellala).

Fractions N° :8, 16, 18 , 19, 24, 36, 49, 66, 76, 86, 89 (issues d'un brut Algérien de Hassi Messaoud « solvant lourd »).

Fractions N° :1, 2, 10, 13,15, 20, 21, 26, 31,33, 34, 35, 39, 40, 44 (Private communication 1977).

Fractions N° :1, 16 (issues d'un brut Algérien de Hassi R'mel).

Fractions N°:3, 4, 5, 6, 9,11, 12, 14, 16, 17, 19, 27, 28, 29, 30, 32, 37, 38, 43, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 56,57, 59, 60, 61 (bank of data collected at Penn State from private open literature and government sources).

Fraction N°:65 (Van Ness and Van Western 1951)

Fractions N°:36, 62 (Lenoir and Hipkin 1973)

Fractions N° :42, 49, 58, 63 (fractions d'un résidu issu d'un brut Algérien)

Ces fractions ont été classes dans l'ordre croissant de leur température moyenne d'ébullition de 35 à 150°C, Tableau A.1.2

- Pour les fractions considérées lourdes de 300 à 523.89°C, le nombre d'échantillon et de 75 fractions, leur origine et présentée si dessous.

Fractions N° :1, 16 (issues d'un brut Algérien de Hassi R'mel).

Fractions N°:3, 4, 5, 6, 9,11, 12, 14, 16, 17, 19, 27, 28, 29, 30, 32, 37, 38, 43, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 56,57, 59, 60, 61 (bank of data collected at Penn State from private open literature and government sources).

Fractions N°:2, 6, 7, 14, 15, 19, 23, 31, 34,59 (Van Ness and Van Western 1951)

Fractions N°:5, 11, 20 (fractions d'un résidu issu d'un brut Algérien)

Fraction N°:3 (Pennzoil 1975)

Fractions N°:4, 44, 49 (A.S.M.E 1953)

Fraction N°:74 (Witco 1973)

Fractions N° :8, 9, 10, 12, 13, 17, 18, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75 (bank of data collected at Penn State from private open literature and government sources).

Ces fractions ont été classées dans l'ordre croissant de leur température moyenne d'ébullition de 300 à 523.89°C, Tableau A.1.3

IV.1.1.2. Mise en œuvre de la banque de donnée :

Après avoir constitué la banque de donnée, une partie de celle-ci (habituellement 20% du jeu de données) ne sera pas utilisée lors de la phase d'apprentissage, ces données sont introduites comme base test pour valider les réseaux établis.

Le choix de ces point tests est effectué en prenant un point de la banque de donnée avec un pas de cinq. Ce qui nous permet de ne pas dépasser les 20%.

IV.1.2. Mise en oeuvre des réseaux de neurones :

Il faut tout d'abord choisir l'architecture du réseau, c'est-à-dire les entrées externes (qui ont été préalablement choisies dans le chapitre précédent) , le nombre de neurones cachés, et l'agencement des neurones entre eux, de telle manière que le réseau soit en mesure de reproduire ce qui est déterministe dans les données ; le nombre de neurones ajustables est un des facteurs fondamentaux de la réussite d'une application : si le réseau possède un trop grand nombre de neurones, c'est-à-dire si le réseau est trop "souple", il risque de s'ajuster au bruit qui est présent dans les données de l'ensemble d'apprentissage, et, même en l'absence de bruit, il risque de présenter des oscillations non significatives entre les points d'apprentissage, donc de posséder de mauvaises propriétés d'interpolation (ou, dans le jargon des réseaux de neurones, de "généralisation") ; si ce nombre est trop petit, le réseau est trop "rigide" et ne peut reproduire la partie déterministe de la fonction. Le problème de la détermination de l'architecture optimale est resté pendant longtemps un problème ouvert, mais il existe actuellement diverses méthodes, mettant notamment en jeu des tests statistiques qui permettent de déterminer cette architecture pour une vaste classe de réseaux donc, en connaissant la taille de l'échantillon on peut avoir une estimation sur le nombre de neurones

cachés en ce basant sur les études précédentes. La figure-1- illustre l'influence du nombre de neurones cachés sur la qualité de l'approximation.

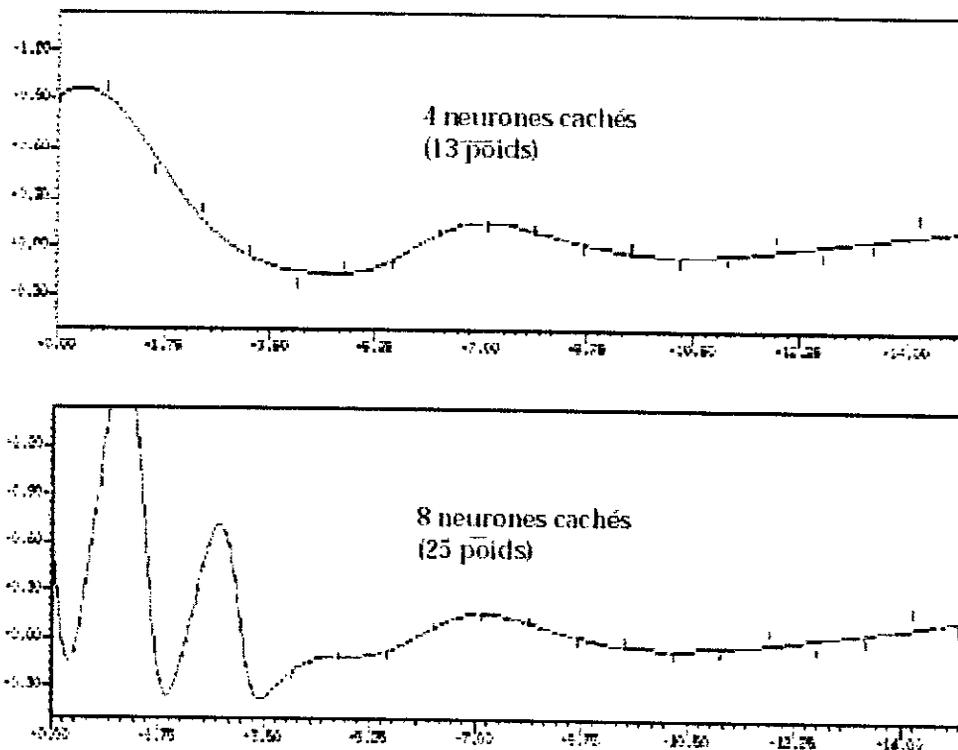


Figure.IV.1:un réseau mieux adapté (4 neurones) donne de meilleurs résultats qu'un réseaux à (8 neurones) relativement à la taille de l'échantillon.

Dans le cas de notre étude et en se basant sur de précédents travaux sur les structures neuronales, il en sort que un échantillon de taille inférieur à 100 équivaut à un nombre maximal de 20 neurones cachés, au delà de ce point on passe à un arrangement trop rigide.

Pour le point de départ, on fixe le nombre de neurones à 10 du fait qu'en dessous de cette valeur le réseau ne peut approximer ou donne des résultats difficilement exploitables.

Il reste alors à évaluer étape par étape les réseaux établis en leur présentant des exemples ou points test, on estimera à chaque fois l'erreur moyenne jusqu'à obtenir la meilleure performance (l'erreur moyenne la plus faible).

Après avoir choisi le nombre adéquat de neurones cachés, on injecte la banque teste pour avoir l'estimation ainsi que l'erreur moyenne, maximale et minimale. On introduit aussi la base de données d'apprentissage pour connaître le comportement global du réseau établi.

Les tableaux ci-dessous représentent les paramètres choisis pour les différentes caractérisations. Le premier donne les paramètres des propriétés suivantes : la masse molaire, l'indice de réfraction, le facteur de caractérisation Kuop et de la specific gravity. Le second est celui de la composition.

Paramètres	Choix
Modèle utilisé	Rétropropagation de gradient
Entrée	Densité et température d'ébullition
Fonction d'entraînement	Trainlm
Fonction d'apprentissage	learnngdm
Fonction performance	SSE
Nombre de couches	2
Fonction d'activation au niveau de la 1 ^{ère} couche	Sigmoïde tangentielle
Fonction d'activation au niveau de la 2 ^{ème} couche	purlin
Durée d'entraînement	10000 époques
Performance	10^{-3}

Tableau 1: paramètres de: M, n, SpGr et Kuop.

Paramètres	Choix
Modèle utilisé	Rétropropagation de gradient
Entrée	Densité et température d'ébullition
Fonction d'entraînement	Trainlm
Fonction d'apprentissage	learnngdm
Fonction performance	SSE
Nombre de couches	2
Fonction d'activation au niveau de la 1 ^{ère} couche	Sigmoïde tangentielle
Fonction d'activation au niveau de la 2 ^{ème} couche	Sigmoïde tangentielle
Durée d'entraînement	10000 époques
Performance	10^{-5}

Tableau 2: paramètres de la composition.

Pour le calcul de la composition nous avons opté pour un calcul séparé de la composition de chaque famille, on crée un réseau pour l'estimation de la composition de la famille paraffinique X_{PA} , puis un autre pour la famille naphénique X_{NA} et ensuite on déduit la valeur de la famille aromatique X_{AR} .

IV.2. Résultats et commentaires :

IV.2.1. Facteur de caractérisation Kuop :

1^{ère} partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	0,0174	0,4688	0,0000
11	0,113	0,2479	0,0000
12	0,0199	0,4421	0,0001
13	0,0184	0,3824	0,0003
14	0,0101	0,2479	0,0000
15	0,0099	0,2478	0,0000
16	0,0105	0,2475	0,0000
17	0,0105	0,2479	0,0000
18	0,0097	0,2479	0,0000
19	0,0097	0,2479	0,0000

Tableau.IV.1: variation de nombre de neurones cachés par rapport à la 1^{ère} partie.

N°	T _{max} (°C)	d	Kuop	RNA	% erreur
5	54,4400	0,6535	12,4248	12,4249	0,0011
10	58,0000	0,6602	12,3262	12,3264	0,0021
15	65,0000	0,6620	12,3448	12,3443	0,0045
20	79,0000	0,6890	11,9628	11,9630	0,0021
25	85,5000	0,7001	11,8239	11,8201	0,0316
30	91,1100	0,7322	11,3434	11,3729	0,2595
35	95,0000	0,7150	11,6404	11,6391	0,0113
40	100,0000	0,7117	11,7272	11,7287	0,0126
45	103,8900	0,7168	11,6713	11,6717	0,0033
50	105,5000	0,7191	11,6447	11,6456	0,0076
55	110,0000	0,7228	11,6144	11,6144	0,0001
60	112,0000	0,7241	11,6065	11,6059	0,0053
65	115,0000	0,73	11,5307	11,5314	0,0062
70	117,0000	0,7305	11,5355	11,5364	0,0077
75	125,0000	0,74	11,4395	11,4399	0,0043
80	127,0000	0,7508	11,2880	11,2883	0,0027
85	134,0000	0,7508	11,3304	11,3604	0,2653
90	146,0000	0,749	11,4296	11,4280	0,0137

Tableau.IV.2: comportement de la base test par rapport au réseau

Pour obtenir le résultat optimal, on a effectué une variation du nombre de neurones cachés de 10 à 20, le meilleur réseau pour la 1^{ère} partie est celui qui possède 20 neurones en couche cachée (Tableau.IV.1), le perceptron ainsi établi donne d'excellents résultats avec une erreur moyenne inférieure à 0.04% et de façon générale ce réseau se comporte très bien par rapport à la banque d'apprentissage (voir Tableau A.2.1).

2^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	0,0238	0,2082	0,0008
11	0,0200	0,1088	0,0001
12	0,0183	0,1182	0,0000
13	0,0191	0,0935	0,0000
14	0,0191	0,0935	0,0000
15	0,0191	0,0935	0,0000
16	0,0191	0,0935	0,0000
17	0,0191	0,0935	0,0000
18	0,0191	0,0935	0,0000
19	0,0191	0,0935	0,0000
20	0,0191	0,0935	0,0000

Tableau.IV.3:variation du nombre de neurones par rapport à la 2^{ème} partie.

N°	T _{mav} (°C)	Kuop	RNA	% erreur
5	137,0000	11,1414	11,1407	0,0059
10	157,2200	11,3070	11,3067	0,0029
15	160,5600	10,7802	10,6999	0,7449
20	165,0000	11,0603	11,0456	0,1327
25	186,0000	11,3311	11,3303	0,0074
30	196,0000	10,9938	10,9934	0,0035
35	206,1100	11,2306	11,2291	0,0133
40	207,7800	10,9323	10,9203	0,1096
45	216,0000	11,1983	11,1918	0,0582
50	244,6100	9,2790	9,2782	0,0082
55	255,0000	11,1963	11,2583	0,5539
60	265,0000	9,4424	9,4492	0,0723

Tableau.IV.4: comportement de la base test par rapport au réseau.

De même que pour cette partie le réseau se comporte très bien vis-à-vis de la banque test (Tableau IV.3), et l'erreur moyenne obtenue est très appréciable. On peut aussi voir que le réseau mime parfaitement la banque de données d'apprentissage (Tableau.A.2.2).

3^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	0,0257	0,1331	0,0000
12	0,0263	0,1568	0,0000
13	0,0263	0,1568	0,0000
14	0,0263	0,1568	0,0000
15	0,0263	0,1568	0,0000
16	0,0263	0,1568	0,0000
17	0,0263	0,1568	0,0000
18	0,0263	0,1568	0,0000
19	0,0263	0,1568	0,0000
20	0,0263	0,1568	0,0000

Tableau.IV.5:variation du nombre de neurones par rapport à la 3^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	Kuop	RNA	% erreur
5	311,5000	11,0926	11,0950	0,0218
10	336,9700	10,4249	10,4229	0,0195
15	344,6700	9,8104	9,7945	0,1622
20	359,7500	11,0699	11,0905	0,1858
25	367,8800	10,2814	10,3640	0,8036
30	379,1500	11,0488	11,0135	0,3197
35	388,7800	10,3618	10,3778	0,1547
40	394,7300	11,2168	11,2212	0,0390
45	405,3900	10,4018	10,2806	1,1648
50	413,1500	10,7373	10,6823	0,5127
55	416,9600	11,0922	11,2723	1,6236
60	427,1700	11,3045	11,3560	0,4560
65	434,0400	11,1205	11,1488	0,2544
70	478,3200	10,7063	10,7078	0,0145

Tableau.IV.6: comportement de la base test par rapport au réseau.

La troisième partie donne aussi de très bons résultats avec une erreur inférieure à 0.5%. Finalement le modèle et les paramètres choisis donne d'excellent résultats cela démontre la capacité de généralisation de ce réseau.

IV.2.2.La specific gravity SpGr:

1^{ère} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	0,2536	0,7961	0,0021
11	0,2864	1,2236	0,0024
12	0,3052	0,7889	0,0011
13	0,3211	0,9864	0,0041
14	0,2608	0,9698	0,0034
15	0,2529	0,8912	0,0056
16	0,2876	0,6665	0,0011
17	0,1542	0,5608	0,0021
18	0,1771	0,5608	0,0021
19	0,2695	0,9171	0,0092
20	0,2934	0,6793	0,0045

Tableau.IV.7: Variation du nombre de neurones par rapport à la 1^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	d	Spgr	RNA	%erreur
5	54,4400	0,6535	0,6580	0,6572	0,1165
10	58,0000	0,6602	0,6647	0,6649	0,0257
15	65,0000	0,6620	0,6665	0,6665	0,0017
20	79,0000	0,6890	0,6935	0,6926	0,1227
25	85,5000	0,7001	0,7043	0,7097	0,7672
30	91,1100	0,7322	0,7365	0,7471	1,4386
35	95,0000	0,7150	0,7193	0,7192	0,0118
40	100,0000	0,7117	0,7160	0,7156	0,0520
45	103,8900	0,7168	0,7210	0,7208	0,0320
50	105,5000	0,7191	0,7233	0,7235	0,0242
55	110,0000	0,7228	0,7270	0,7278	0,1067
60	112,0000	0,7241	0,7283	0,7289	0,0812
65	115,0000	0,7300	0,7343	0,7336	0,0982
70	117,0000	0,7305	0,7348	0,7336	0,1584
75	125,0000	0,7400	0,7442	0,7441	0,0164
80	127,0000	0,7508	0,7550	0,7559	0,1217
85	134,0000	0,7508	0,7550	0,7542	0,1047
90	146,0000	0,7490	0,7532	0,7549	0,2248

Tableau.IV.8comportement de la base test par rapport au réseau.

2^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	0,2986	1,2101	0,0215
11	0,2856	0,9416	0,0122
12	0,2620	0,8147	0,0004
14	0,2997	1,1101	0,0021
15	0,3070	0,8217	0,0058
16	0,1939	0,8271	0,0076
17	0,2789	0,9369	0,0187
18	0,2789	0,9369	0,0187
19	0,2960	1,3135	0,0019
20	0,2212	0,9479	0,0005

Tableau.IV.9variation du nombre de neurones par rapport à la 2^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	d	Spgr	RNA	% erreur
5	153,0000	0,7715	0,7755	0,7771	0,2048
10	157,2200	0,7620	0,7658	0,7659	0,0119
15	160,5600	0,8008	0,8046	0,8137	1,1293
20	165,0000	0,7820	0,7860	0,7875	0,1922
25	186,0000	0,7713	0,7753	0,7793	0,5166
30	196,0000	0,7990	0,8030	0,8039	0,1070
35	206,1100	0,7860	0,7899	0,7910	0,1368
40	207,7800	0,808	0,8121	0,8147	0,3195
45	216,0000	0,7919	0,7959	0,7951	0,1006
50	244,6100	0,9681	0,9733	0,9739	0,0613
55	255,0000	0,8066	0,8104	0,8160	0,6876
60	265,0000	0,9602	0,9652	0,9676	0,2538

Tableau.IV.10comportement de la base test par rapport au réseau.

3^{ème} Partie:

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	0,5649	10,0992	0,0059
11	0,1961	1,6297	0,0016
12	0,4722	10,2915	0,0033
13	0,5711	10,0103	0,0029
14	0,1961	1,6297	0,0016
15	0,2530	1,1799	0,0019
16	0,5503	10,1349	0,0040
17	0,5588	9,8303	0,0038
18	0,5340	9,8076	0,0006
19	0,2380	1,2763	0,0026
20	0,5244	8,7093	0,0093

Tableau.IV.11 variation du nombre de neurones par rapport à la 3^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	d	Spgr	RNA	% erreur
5	311,5000	0,8343	0,8381	0,8353	0,3287
10	336,9700	0,8980	0,9011	0,8990	0,2284
15	344,6700	0,9568	0,9605	0,9442	1,6951
20	359,7500	0,8530	0,8563	0,9556	11,5984
25	367,8800	0,9180	0,9249	0,9232	0,1831
30	379,1500	0,8612	0,8644	0,8693	0,5636
35	388,7800	0,9182	0,9251	0,9431	1,9452
40	394,7300	0,8532	0,8565	0,8605	0,4665
45	405,3900	0,9204	0,9273	0,7510	19,0133
50	413,1500	0,8978	0,9009	0,9856	9,4002
55	416,9600	0,8700	0,8733	0,8638	1,0849
60	427,1700	0,8568	0,8601	0,8570	0,3621
65	434,0400	0,8732	0,8765	0,8740	0,2858
70	478,3200	0,9178	0,9247	0,9306	0,6367

Tableau.IV.12 comportement de la base test par rapport au réseau.

Avec respectivement moins de 0.195% et 0.31% les deux premières parties présentent de bons résultats, le comportement du réseau par rapport aux points d'entrée montre aussi le bon comportement global et la bonne généralisation du réseau (Tableau A.2.4 et Tableau A.2.5). La 3^{ème} partie donne de moins bons résultats lors de son évaluation pas les points tests, on trouve trois point fortement bruités qui augmente l'erreur moyenne mais le comportement général du réseaux est bon avec 0.19% en erreur moyenne (Tableau A.2.6).

IV.2.3. La masse molaire M :

1^{ère} Partie:

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	2,1488	10,8399	0,0497
11	2,3570	10,9874	0,0119
12	2,1274	8,9017	0,0625
13	2,0071	10,8468	0,0180
14	2,1641	11,5056	0,0000
16	2,0325	8,5341	0,0126
17	2,0740	10,7767	0,0001
18	2,1193	11,9593	0,0000
19	2,2666	10,3580	0,0476
20	2,2666	10,3580	0,0476

Tableau.IV.13: Variation du nombre de neurones par rapport à la 1^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	M	RNA	% erreur	K-B	% erreur	Winn	% erreur
5	54,4400	78,0000	80,7048	3,4677	78,3294	0,4223	82,1472	5,3169
10	58,0000	82,0000	81,5864	0,5043	79,6920	2,8147	83,4893	1,8162
15	65,0000	86,4000	87,4087	1,1674	83,4467	3,4181	87,5245	1,3015
20	79,0000	88,0000	91,8057	4,3247	88,7757	0,8815	92,8661	5,5297
25	85,5000	96,4000	95,4560	0,9793	91,4195	5,1664	95,5991	0,8308
30	91,1100	102,0000	94,6562	7,1998	91,3555	10,4358	95,1232	6,7419
35	95,0000	100,3000	96,8229	3,4667	95,3702	4,9151	99,7407	0,5576
40	100,0000	97,0000	102,1549	5,3143	98,7128	1,7658	103,4364	6,6354
45	103,8900	102,0000	104,0856	2,0447	100,4851	1,4852	105,3295	3,2642
50	105,5000	106,3000	104,5642	1,6329	101,1929	4,8044	106,0849	0,2024
55	110,0000	101,0000	105,3192	4,2765	103,5018	2,4771	108,5866	7,5114
60	112,0000	111,6000	105,6401	5,3404	104,5759	6,2940	109,7551	1,6531
65	115,0000	111,0000	107,8347	2,8516	105,6931	4,7810	110,9424	0,0519
70	117,0000	108,0000	108,2852	0,2640	106,8720	1,0444	112,2348	3,9211
75	125,0000	114,6000	113,9966	0,5266	110,6886	3,4131	116,3893	1,5613
80	127,0000	114,0000	117,7895	3,3241	110,5560	3,0210	116,2045	1,9338
85	134,0000	118,0000	120,8088	2,3803	114,9801	2,5593	121,0961	2,6238
90	146,0000	127,2000	126,6061	0,4669	123,0949	3,2273	130,0455	2,2370

Tableau.IV.14 : comportement de la base test par rapport au réseau.

2^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	7,3533	21,7743	0,3181
11	1,9172	10,6283	0,0000
12	2,0214	11,5568	0,0494
13	2,0254	11,5633	0,0478
15	1,4801	8,4251	0,0404
16	1,8898	11,1618	0,0003
17	2,0214	11,5568	0,0494
18	2,0214	11,5568	0,0494
19	2,0214	11,5568	0,0494
20	2,0214	11,5568	0,0494

Tableau.IV.15: Variation du nombre de neurones par rapport à la 2^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	M	RNA	% erreur	K-B	% erreur	Winn	% erreur
5	137,0000	130,0000	128,6656	1,0265	115,0175	11,5250	120,1732	7,5591
10	157,2200	133,0000	133,7691	0,5783	128,7535	3,1929	136,3391	2,5106
15	160,5600	144,0000	129,3426	10,1788	125,2182	13,0429	132,5832	7,9283
20	165,0000	137,0000	135,0946	1,3908	130,8947	4,4564	138,8431	1,3453
25	186,0000	151,3000	151,6859	0,2551	147,5496	2,4788	157,1967	3,8973
30	196,0000	161,0000	155,6754	3,3072	149,7527	6,9859	160,1047	0,5561
35	206,1100	165,0000	164,1833	0,4950	159,8222	3,1380	171,0462	3,6644
40	207,7800	166,0000	163,9966	1,2068	156,6876	5,6099	168,0448	1,2318
45	216,0000	170,5000	170,9895	0,2871	166,2246	2,5075	178,2892	4,5685
50	244,6100	158,0000	155,8452	1,3638	154,9417	1,9356	169,0161	6,9722
55	255,0000	167,9000	200,0419	19,1435	194,7192	15,9733	210,3719	25,2959
60	265,0000	186,0000	177,8560	4,3785	169,7504	8,7364	186,7296	0,3922

Tableau.IV.16: comportement de la base test par rapport au réseau.

3^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	1,0518	5,2250	0,0000
11	1,5018	5,2250	0,0000
12	0,9902	5,7171	0,0000
13	0,8481	3,8947	0,0001
14	1,1080	5,8116	0,0232
15	0,9620	2,8664	0,0068
16	0,9620	3,8664	0,0068
17	1,1229	4,9285	0,0013
18	0,9026	6,0433	0,0185
20	0,9379	6,9042	0,0044

Tableau.IV.17: Variation du nombre de neurones par rapport à la 3^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	M	RNA	% erreur	K-B	% erreur	Winn	% erreur
5	311,5000	263,1000	259,0425	1,5422	237,6064	9,6897	259,5694	1,3419
10	336,9700	266,0000	268,8063	1,0550	241,3225	9,2773	268,4033	0,9035
15	344,6700	267,0000	262,8520	1,5536	231,2209	13,4004	260,4698	2,4458
20	359,7500	318,1000	311,1867	2,1733	279,0209	12,2852	307,1799	3,4329
25	367,8800	300,0000	300,9043	0,3014	262,2519	12,5827	294,5837	1,8054
30	379,1500	343,0000	338,3736	1,3488	296,1877	13,6479	327,1425	4,6232
35	388,7800	330,0000	330,8934	0,2707	282,2286	14,4762	317,8700	3,6758
40	394,7300	374,0000	376,1726	0,5809	316,9007	15,2672	349,0169	6,6800
45	405,3900	354,0000	353,1225	0,2479	297,9989	15,8195	336,4139	4,9678
50	413,1500	378,0000	378,2504	0,0662	317,0900	16,1138	355,1162	6,0539
55	416,9600	400,0000	401,3449	0,3362	334,2186	16,4453	370,4675	7,3831
60	427,1700	428,0000	428,4204	0,0982	353,1273	17,4936	389,1468	9,0779
65	434,0400	430,0000	430,1679	0,0391	352,6349	17,9919	391,2969	9,0007
70	478,3200	483,0000	469,1465	2,8682	379,8313	21,3600	429,9623	10,9809

Tableau.IV.18: comportement de la base test par rapport au réseau.

Dans les trois parties, le RNA présente les meilleurs résultats à comparer aux corrélations de Winn et de Kuppou Bardon, et on voit l'importance de ces résultats dans la partie 3 (fractions lourdes) qui montre un avantage certain des réseaux de neurones pour la caractérisation de la massa molaire.

IV.2.4. L'indice de réfraction n :

1^{ère} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	0,1573	0,5881	0,0018
11	0,1610	0,5157	0,0036
12	0,1743	0,6705	0,0050
13	0,1743	0,6261	0,0037
14	0,1647	0,8524	0,0002
15	0,1668	0,7205	0,0053
16	0,1647	0,7634	0,0007
18	0,1619	0,9075	0,0021
19	0,1705	0,5830	0,0002
20	0,1858	0,4721	0,0015

Tableau.IV.19: Variation du nombre de neurones par rapport à la 1^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	d	n	RNA	% erreur	Chitour&col	%erreur
5	54,4400	0,6535	1,3694	1,3737	0,3104	1,3779	0,6193
10	58,0000	0,6602	1,3726	1,3776	0,3667	1,3751	0,1802
15	65,0000	0,6620	1,3820	1,3593	1,6435	1,3943	0,8886
20	79,0000	0,6890	1,3871	1,4052	1,3028	1,3921	0,3637
25	85,5000	0,7001	1,3969	1,4001	0,2311	1,4052	0,5914
30	91,1100	0,7322	1,4074	1,3325	5,3222	1,4147	0,5215
35	95,0000	0,7150	1,4050	1,3887	1,1622	1,4044	0,0424
40	100,0000	0,7117	1,3993	1,4033	0,2888	1,4061	0,4825
45	103,8900	0,7168	1,4019	1,4068	0,3460	1,4034	0,1105
50	105,5000	0,7191	1,4065	1,4062	0,0181	1,4266	1,4288
55	110,0000	0,7228	1,4052	1,4049	0,0216	1,4118	0,4708
60	112,0000	0,7241	1,4052	1,4057	0,0385	1,4094	0,2959
65	115,0000	0,73	1,412	1,4114	0,0411	1,4109	0,0802
70	117,0000	0,7305	1,4094	1,4140	0,3238	1,4112	0,1270
75	125,0000	0,74	1,42	1,4164	0,2547	1,4195	0,0349
80	127,0000	0,7508	1,4202	1,4161	0,2906	1,4232	0,2117
85	134,0000	0,7508	1,4204	1,4221	0,1221	1,4217	0,0916
90	146,0000	0,749	1,4239	1,4208	0,2209	1,4239	0,0001

Tableau.IV.20: comportement de la base test par rapport au réseau.

2^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
11	0,1552	0,491	0,037
12	0,1524	0,4753	0,0022
13	0,1699	0,4936	0,0073
14	0,1680	0,5749	0,0022
15	0,1482	0,6043	0,0006
16	0,1576	0,7709	0,0001
17	0,1719	0,6071	0,0006
18	0,1522	0,4246	0,0009
19	0,1616	0,6515	0,0040
20	0,1522	0,6605	0,0005

Tableau.IV.21: Variation du nombre de neurones par rapport à la 2^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	d	n	RNA	%erreur	Chitour&col	% erreur
5	153,0000	0,7715	1,4319	1,4338	0,1260	1,4329	0,0695
10	157,2200	0,7620	1,4350	1,4298	0,3596	1,4266	0,5840
15	160,5600	0,8008	1,4436	1,4395	0,2834	1,4388	0,3300
20	165,0000	0,7820	1,4370	1,4359	0,0746	1,4371	0,0060
25	186,0000	0,7713	1,4354	1,4336	0,1260	1,4347	0,0488
30	196,0000	0,7990	1,4476	1,4471	0,0341	1,4446	0,2072
35	206,1100	0,7860	1,4430	1,4448	0,1229	1,4448	0,1244
40	207,7800	0,808	1,4485	1,4500	0,1059	1,4487	0,0137
45	216,0000	0,7919	1,4453	1,4473	0,1351	1,4546	0,6427
50	244,6100	0,9681	1,5602	1,5564	0,2422	1,4774	5,3056
55	255,0000	0,8066	1,4533	1,4576	0,2966	1,4553	0,1381
60	265,0000	0,9602	1,5513	1,5489	0,1568	1,4736	5,0092

Tableau.IV.22: comportement de la base test par rapport au réseau.

3^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	0,1253	0,5970	0,0017
11	0,1590	0,6002	0,0183
12	0,1528	0,7008	0,0023
14	0,1579	0,3809	0,0004
15	0,1587	0,5595	0,0051
16	0,1336	0,6062	0,0046
17	0,1314	0,5212	0,0002
18	0,1404	0,6673	0,0040
19	0,1472	0,6324	0,0037
20	0,1455	0,5818	0,0054

Tableau.IV.23: Variation du nombre de neurones par rapport à la 3^{ème} partie.

N°	T _{max} (°C)	d	n	RNA	%erreur	Chitour&col	%erreur
5	311,5000	0,8343	1,4690	1,4665	0,1707	1,4859	1,1495
10	336,9700	0,8980	1,5100	1,5098	0,0164	1,4800	1,9853
15	344,6700	0,9568	1,5366	1,5237	0,8408	1,4770	3,8783
20	359,7500	0,8530	1,4798	1,4772	0,1725	1,5072	1,8525
25	367,8800	0,9180	1,5190	1,5180	0,0674	1,4919	1,7843
30	379,1500	0,8612	1,4836	1,4830	0,0388	1,5194	2,4099
35	388,7800	0,9182	1,5172	1,5177	0,0308	1,5016	1,0312
40	394,7300	0,8532	1,4766	1,4745	0,1406	1,5320	3,7517
45	405,3900	0,9204	1,5172	1,5184	0,0792	1,5055	0,7733
50	413,1500	0,8978	1,5029	1,5020	0,0590	1,5245	1,4370
55	416,9600	0,8700	1,4860	1,4839	0,1405	1,5439	3,8976
60	427,1700	0,8568	1,4764	1,4773	0,0629	1,5590	5,5945
65	434,0400	0,8732	1,4856	1,4844	0,0815	1,5623	5,1618
70	478,3200	0,9178	1,5089	1,5151	0,4110	1,5713	4,1343

Tableau.IV.24: comportement de la base test par rapport au réseau.

La comparaison a été effectuée avec la corrélation de Dermoune-Chitour cependant l'erreur de cette dernière peut être attribuée en partie à la règle d'additivité par composition, en général les RNA présente de meilleurs résultats que la corrélation précédemment citée. Mais le plus important est que le réseau mime parfaitement les fractions lourdes ($\approx 0.17\%$ d'erreur), qui de façon générale posent problème lors de leur caractérisation.

IV.2.5.La composition :

1^{ère} partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
15	3,6948	20,6211	0,0000
16	3,2818	18,7579	0,0001
17	7,1263	32,2112	0,0000
18	5,4098	22,4777	0,0000
19	3,4873	20,5341	3,4873

Tableau.IV.25: Variation du nombre de neurones par rapport à la 1^{ème} partie pour X_{PA}.

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
15	-	-	-
16	-	-	-
17	-	-	-
18	21,5433	192,6814	0,0094
19	7,9356	58,4851	0,0014

Tableau.IV.26: Variation du nombre de neurones par rapport à la 1^{ème} partie pour X_{NA}.

N°	T _{max} (°C)	d	X _{na}	RNA	%erreur	Chitour&Col	% erreur
5	54,4	0,6535	16	16,6031	7,1166	7,6803	50,4496
10	58,0	0,6602	9	8,2403	9,4473	9,4704	4,0707
15	65,0	0,6620	18	21,1643	16,9300	8,9852	50,3582
20	79,0	0,6890	30	25,1756	16,0812	13,9428	53,5239
25	85,5	0,7001	20	18,8550	5,7250	15,7197	21,4016
30	91,1	0,7322	58	57,3959	1,3816	20,9734	63,9633
35	95,0	0,7150	28	28,8782	2,0793	17,6592	37,5780
40	100,0	0,7117	26	29,6481	14,0310	17,7344	31,7907
45	103,9	0,7168	19	18,8099	1,0005	19,0557	0,2934
50	105,5	0,7191	16	12,9040	19,3502	19,1220	19,5126
55	110,0	0,7228	33	33,2824	2,4072	19,3461	40,4734
60	112,0	0,7241	37	33,0112	10,7805	21,3862	42,1994
65	115,0	0,7300	42	41,4460	1,5533	20,7446	50,7254
70	117,0	0,7305	21	23,4732	11,2473	21,0689	0,1474
75	125,0	0,7400	26	31,8373	21,4237	21,1773	19,2322
80	127,0	0,7508	41	43,8985	8,3912	23,3137	42,4353
85	134,0	0,7508	20	18,0883	9,5586	23,7808	18,9041
90	146,0	0,7490	23	26,0828	13,4033	23,5389	2,3432

Tableau.IV.27: comportement de la base test par rapport au réseau.

N°	T _{max} (°C)	d	X _{pa}	RNA	%erreur	Chitour&Col	% erreur
5	54,4	0,6535	82,00	86,5968	5,6059	93,0478	13,4729
10	58,0	0,6602	89,50	84,8667	5,1769	90,0759	0,6434
15	65,0	0,6620	71,26	71,0607	0,2797	89,8751	26,1228
20	79,0	0,6890	68,00	70,1333	3,1372	79,2944	16,6095
25	85,5	0,7001	66,00	70,4155	6,6902	75,1898	13,9239
30	91,1	0,7322	36,20	35,7240	1,3149	62,9788	73,9747
35	95,0	0,7150	63,78	64,1478	0,5767	69,8156	9,4631
40	100,0	0,7117	63,50	63,7277	0,3586	70,6874	11,3188
45	103,9	0,7168	72,00	72,6163	0,8560	68,4786	4,8908
50	105,5	0,7191	53,50	50,9960	4,6804	67,7975	26,7244
55	110,0	0,7228	56,50	60,8186	7,6435	66,6292	17,9278
60	112,0	0,7241	59,10	60,9836	3,1871	65,0055	9,9923
65	115,0	0,7300	54,68	57,9569	5,9929	63,7326	16,5556
70	117,0	0,7305	66,90	68,7550	2,7728	63,3928	5,2424
75	125,0	0,7400	58,23	54,7642	5,9519	60,7098	4,2586
80	127,0	0,7508	45,50	44,1674	2,9288	56,3827	23,9180
85	134,0	0,7508	62,00	62,3577	0,5769	56,0937	9,5262
90	146,0	0,7490	62,10	67,1377	8,1122	56,7443	8,6243

Tableau.IV.28: comportement de la base test par rapport au réseau.

Les valeurs de X_{AR} sont obtenues par déduction et non pas par simulation sur réseaux
l'équation qui permet ceci est : $X_{AR}=100-(A_{PA}+X_{NA})$

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{AR}	RNA	%erreur	Chitour&Col	% erreur
5	54,4	0,6535	2,50	3,1999	27,9948	0,7281	70,8761
10	58,0	0,6602	1,40	6,8930	392,3572	0,4537	67,5940
15	65,0	0,6620	10,64	7,7750	26,9269	1,1397	89,2884
20	79,0	0,6890	2,00	4,6911	134,5531	6,7627	238,1355
25	85,5	0,7001	14,00	10,7295	23,3608	9,0906	35,0673
30	91,1	0,7322	5,60	6,8801	22,8590	16,0478	186,5678
35	95,0	0,7150	7,93	6,9740	12,0559	12,5252	57,9475
40	100,0	0,7117	10,50	6,6242	36,9121	11,5782	10,2682
45	103,9	0,7168	9,00	8,5738	4,7355	12,4656	38,5072
50	105,5	0,7191	30,50	36,1000	18,3607	13,0805	57,1133
55	110,0	0,7228	11,00	5,8990	46,3723	14,0247	27,4969
60	112,0	0,7241	3,90	6,0052	53,9789	13,6083	248,9304
65	115,0	0,7300	3,22	0,5971	81,4579	15,5228	382,0748
70	117,0	0,7305	12,00	7,7718	35,2348	15,5383	29,4855
75	125,0	0,7400	15,55	13,3985	13,8360	18,1129	16,4817
80	127,0	0,7508	14,00	11,9341	14,7561	20,3036	45,0258
85	134,0	0,7508	18,00	19,5540	8,6334	20,1254	11,8080
90	146,0	0,7490	14,90	6,7795	54,4998	19,7168	32,3273

Tableau.IV.29: résultats de X_{AR} déduits des autres résultats de composition.

Malgré que les résultats obtenus par les RNA soient meilleurs que la corrélation de Dermoune-Chitour, l'erreur moyenne du réseau reste très élevée, cela est dû en partie à la constitution de la banque de donnée car si cette dernière n'est pas homogène les résultats qui en découle ne seront pas bons, de plus un problème de codage peu aussi influencer du fait que réseau travaille dans le domaine [-1, 1] et que les données d'entrée et les sorties appartiennent à un domaine plus grand.

2^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	-	-	-
11	-	-	-
12	18,5385	98,6146	0,0588
14	16,3012	87,3174	0,3548
15	25,3957	218,5814	0,0134

Tableau.IV.30: Variation du nombre de neurones par rapport à la 2^{ème} partie pour X_{PA}.

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	-	-	-
12	34,4025	282,0930	0,1416
13	25,5531	150,1251	0,0000
14	9,9662	88,0316	0,0000
15	33,4300	331,5206	0,0651

Tableau.IV.31: Variation du nombre de neurones par rapport à la 2^{ème} partie pour X_{NA}.

N°	T _{max} (°C)	d	X _{pa}	RNA	% erreur	Chitour&Col	% erreur
5	153,0000	0,7715	42,00	39,43	6,1190	48,9644	16,5818
10	157,2200	0,7620	66,50	68,72	3,3383	53,3428	19,7852
15	160,5600	0,8008	18,60	18,11	2,6344	38,6806	107,9600
20	165,0000	0,7820	39,00	36,98	5,1795	45,2638	16,0609
25	186,0000	0,7713	73,80	38,79	47,4390	48,4721	34,3196
30	196,0000	0,7990	37,50	38,71	3,2267	39,4966	5,3243
35	206,1100	0,7860	59,00	58,56	0,7458	43,5621	26,1659
40	207,7800	0,808	28,50	30,11	5,6491	35,7995	25,6122
45	216,0000	0,7919	54,30	58,40	7,5506	41,4317	23,6986
50	244,6100	0,9681	5,30	5,23	1,3208	3,6332	31,4494
55	255,0000	0,8066	48,40	48,06	0,7025	37,6097	22,2940
60	265,0000	0,9602	4,70	5,32	13,1915	0,7526	83,9868

Tableau.IV.32: comportement de la base test par rapport au réseau.

N°	T _{max} (°C)	d	X _{na}	RNA	% erreur	Chitour&Col	% erreur
5	153,0000	0,7715	40	35,9548	10,1130	26,0834	34,7915
10	157,2200	0,7620	17	16,8456	0,9082	23,3691	37,4653
15	160,5600	0,8008	69,8	69,4928	0,4401	29,6163	57,5697
20	165,0000	0,7820	41,5	35,6448	14,1089	27,3419	34,1159
25	186,0000	0,7713	8,8	8,8976	1,1091	26,9691	206,4670
30	196,0000	0,7990	44	35,4576	19,4145	29,0169	34,0525
35	206,1100	0,7860	20	20,7399	3,6995	28,3382	41,6912
40	207,7800	0,808	50,5	53,6513	6,2402	30,8997	38,8125
45	216,0000	0,7919	6	6,6231	10,3850	29,0830	384,7159
50	244,6100	0,9681	4	3,7886	5,2850	22,1233	453,0824
55	255,0000	0,8066	20,2	16,3906	18,8584	28,7381	42,2676
60	265,0000	0,9602	9,6	9,1542	4,6438	18,6773	94,5549

Tableau.IV.33: comportement de la base test par rapport au réseau.

N°	T _{max} (°C)	d	X _{ar}	RNA	% erreur	Chitour&Col	% erreur
5	153,0000	0,7715	18,00	24,6152	36,7511	2,0713	88,4928
10	157,2200	0,7620	16,50	14,4344	12,5188	6,6856	59,4810
15	160,5600	0,8008	11,60	12,3972	6,8724	22,6389	95,1628
20	165,0000	0,7820	19,50	27,3752	40,3856	9,4725	51,4231
25	186,0000	0,7713	17,40	52,3124	200,6460	3,0557	82,4385
30	196,0000	0,7990	18,50	25,8324	39,6346	21,0068	13,5502
35	206,1100	0,7860	21,00	20,7001	1,4281	12,8758	38,6868
40	207,7800	0,808	21,00	16,2387	22,6729	28,4010	35,2430
45	216,0000	0,7919	39,70	34,9769	11,8970	17,1367	56,8346
50	244,6100	0,9681	90,70	90,9814	0,3103	92,7336	2,2422
55	255,0000	0,8066	31,40	35,5494	13,2146	24,7806	21,0810
60	265,0000	0,9602	85,70	85,5258	0,2033	98,4948	14,9297

Tableau.IV.34: résultats de X_{AR} déduits des autres résultats de composition.

De même que pour la première partie les résultats obtenus par Réseaux de Neurones Artificiels ne sont pas satisfaisant, malgré qu'ils donnent une erreur moyenne plus faible que la corrélation de Dermoune-Chitour.

3^{ème} Partie :

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	-	-	-
12	3,3146	22,9189	0,0008
13	2,0669	18,8892	0,0017
14	12,5948	336,1275	0,0147
15	6,1113	28,1459	0,0680

Tableau.IV.35: Variation du nombre de neurones par rapport à la 3^{ème} partie pour X_{PA}.

Nombre de neurones cachés	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
10	-	-	-
11	15,4999	195,9005	0,0039
13	15,7827	216,1741	0,0016
14	3,5759	25,1692	0,0001
15	3,4262	15,0738	0,0005

Tableau.IV.36: Variation du nombre de neurones par rapport à la 3^{ème} partie pour X_{PA}.

N°	T _{max} (°C)	d	X _{pa}	RNA	%erreur	Chitour&Col	% erreur
5	311,5000	0,8343	73,84	70,99	3,8636	72,1987	2,2228
10	336,9700	0,8980	42,00	42,98	2,3442	49,0639	16,8188
15	344,6700	0,9568	30,90	39,90	29,1223	19,9867	35,3180
20	359,7500	0,8530	68,41	70,42	2,9360	70,4116	2,9259
25	367,8800	0,9180	47,00	40,99	12,7865	42,0892	10,4486
30	379,1500	0,8612	72,00	70,60	1,9440	69,3333	3,7038
35	388,7800	0,9182	48,00	41,91	12,6863	44,7902	6,6872
40	394,7300	0,8532	68,00	72,02	5,9116	73,8331	8,5780
45	405,3900	0,9204	46,00	42,55	7,4986	45,8927	0,2333
50	413,1500	0,8978	58,00	58,44	0,7618	58,4147	0,7150
55	416,9600	0,8700	72,00	73,88	2,6140	69,7367	3,1434
60	427,1700	0,8568	74,00	75,10	1,4837	75,5424	2,0843
65	434,0400	0,8732	78,00	74,15	4,9323	70,1891	10,0140
70	478,3200	0,9178	66,00	58,27	11,7047	55,4311	16,0135

Tableau.IV.37: comportement de la base test par rapport au réseau.

Les valeurs de X_{AR} sont obtenues par déduction et non pas par simulation sur réseaux
 l'équation qui permet ceci est : $X_{AR}=100-(A_{PA}+X_{NA})$

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{pa}	RNA	erreur	Chitour&Col	% erreur
5	311,5000	0,8343	5,00	4,64	7,2736	15,4514	209,0286
10	336,9700	0,8980	37,00	36,48	1,4007	24,7810	33,0242
15	344,6700	0,9568	37,00	32,46	12,2672	36,3894	1,6504
20	359,7500	0,8530	19,88	19,59	1,4494	15,9750	19,6427
25	367,8800	0,9180	30,00	32,84	9,4514	27,4605	8,4651
30	379,1500	0,8612	16,00	19,61	22,5360	16,3028	1,8923
35	388,7800	0,9182	32,00	32,60	1,8631	26,2221	18,0558
40	394,7300	0,8532	31,00	29,57	4,6075	14,3786	53,6173
45	405,3900	0,9204	28,00	32,47	15,9512	25,6723	8,3132
50	413,1500	0,8978	29,00	30,53	5,2615	20,4947	29,3285
55	416,9600	0,8700	20,00	19,58	2,0771	15,9222	20,3891
60	427,1700	0,8568	24,00	19,57	18,4716	13,5137	43,6929
65	434,0400	0,8732	16,00	19,58	22,3609	15,6101	2,4369
70	478,3200	0,9178	24,00	25,06	4,4264	21,3429	11,0711

Tableau.IV.38: comportement de la base test par rapport au réseau.

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{ar}	RNA	% erreur	Chitour&Col	% erreur
5	311,5000	0,8343	21,16	24,3765	15,2010	12,3499	41,6357
10	336,9700	0,8980	21,00	20,5337	2,2204	26,1551	24,5480
15	344,6700	0,9568	32,10	27,6400	13,8939	43,6239	35,9000
20	359,7500	0,8530	11,71	9,9896	14,6916	13,6133	16,2539
25	367,8800	0,9180	23,00	26,1743	13,8011	30,4504	32,3929
30	379,1500	0,8612	12,00	9,7940	18,3837	14,3640	19,6998
35	388,7800	0,9182	20,00	25,4932	27,4661	28,9877	44,9384
40	394,7300	0,8532	1,00	1,5915	59,1543	11,7883	1078,8318
45	405,3900	0,9204	26,00	24,9830	3,9114	28,4350	9,3654
50	413,1500	0,8978	13,00	11,0323	15,1361	21,0906	62,2352
55	416,9600	0,8700	8,00	6,5333	18,3333	14,3411	79,2638
60	427,1700	0,8568	2,00	5,3353	166,7626	10,9439	447,1957
65	434,0400	0,8732	6,00	6,2695	4,4910	14,2008	136,6801
70	478,3200	0,9178	10,00	16,6628	66,6280	23,2260	132,2596

Tableau.IV.39: comportement de la base test par rapport au réseau.

Contrairement à ce qu'on pouvait attendre les résultats de la troisième partie sont meilleurs que ceux enregistrés pour les deux premières parties, cela est dû au fait que les fractions introduites sont plus au moins proches les unes des autres ce qui permet au réseau de mieux apprendre.

Lors de la détermination de la composition, un problème très délicat apparaît, il consiste au fait que la somme des pourcentages n'est pas toujours égale à 100%, car les compositions sont estimées séparément et de ce fait, elles ne sont pas reliées entre elles par une relation qui contrôle leur évolution.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La connaissance des propriétés physiques du pétrole ou de ses fractions est d'une importance capitale pour l'établissement de nouveaux procédés, dimensionnement de machines et raffineries, séparations et récupération de produits...pour cela les chercheurs prospectent toutes les nouvelles voies qui leur permettent d'acquérir les informations nécessaires pour la mise en œuvre du pétrole. Les réseaux de neurones artificiels font partie de ces nouvelles techniques, leur intérêt et encore plus grand du fait de leurs qualités d'approximation parcimonieuse.

Nous avons voulu démontrer dans ce travail les réels avantages des RNA en les utilisant pour la détermination des propriétés physiques des fractions pétrolières. Les résultats obtenus nous donne un aperçu des capacités des réseaux de neurones.

Mais sans une banque de données bien homogène et dense les avantages des RNA s'évanouissent et montrent leur limite comme l'atteste les résultats de la composition, malgré une amélioration par rapport à la corrélation utilisée à titre de comparaison, celle-ci reste très faible et non prise en considération.

Enfin, pour palier à ces problèmes, nous proposons comme solution la mise en place d'une collecte de donnée des fractions pétrolières pour que l'apprentissage s'effectue correctement, ce qui permettra de ne plus être sélectif (un seul réseau représentera toute la courbe TBP et non un réseau pour chaque partie).

*Références
Bibliographiques*

1. Encyclopédie électronique Universalys (2001).
2. **F.Souahi**, Contribution à l'étude physico-chimique des pétroles et des fractions pétrolières « comparaison des méthodes expérimentales et empiriques aux méthodes numériques élaborées, Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique (1999).
3. **N.Skander**, Contribution à la détermination des propriétés physiques des mélanges d'hydrocarbures et de fractions pétrolières par des méthodes de contribution de groupes, Thèse de Magister, Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique(1997).
- 4: **C.Touzet**, Les Réseaux de Neurones Artificiels introduction au connexionnisme cours exercices et travaux pratiques (source Internet).
5. **Jean-François Jodouin**, Les réseaux de neurones, Edition Hermes (1994).
6. **E.Moreau**, Les Réseaux de Neurones « Chapitre 2 » (source Internet).
7. **C.E.Chitour**, Raffinage, Tome 2, Edition OPU (1999).
8. **Revue Mécanique Industrielle et Matériaux**, n°51 (septembre 1998), Les Réseaux de Neurones (source Internet).
9. **El Hadi**, Contribution à la détermination de la composition des fractions pétrolières, Thèse de Magister, Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique (1995).
10. Matlab 6.5 release notes¹³, Math Works, (2001).
11. **S.Sator**, Elaboration d'équations d'état et application à l'étude de pétroles bruts Algériens, Thèse de Magister, Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique.
12. **C.E.Chitour**, Raffinage, Tome 1, Edition OPU (1999).
13. **C.E.Chitour**, Raffinage, Tome 3, Edition OPU (1999).
14. **M.S.Fekrache**, Contribution à la détermination des propriétés des hydrocarbures par Réseaux de Neurones Artificiels Projet de fin d'études, Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique (juin2002).
15. **C.E.Chitour**, Corrélation sur le pétrole brut et les fractions pétrolières, Tome 1, Edition OPU (1984).
16. **C.E.Chitour**, Corrélation sur le pétrole brut et les fractions pétrolières, Tome 2, Edition OPU (1984).
17. **E.Davalo et P.Naïm**, Des réseaux de neurones, Editions Eyrolles (1993).
18. **Howard Demuth & Mark Beale**, Neuronal network Toolbox, Math Works, (2001).

Annexe I

Tableau A.1.1 : données des fractions pétrolières considérées légères de 35 à 150°C.

N°	Tmav(°C)	d	n	Spgr	M	Xpa	Xna	Xar	Kuop
1	35,0000	0,6160	1,3610	0,6205	73,0	100,00	0,00	0,00	13,0175
2	40,0000	0,6310	1,3580	0,6355	79,0	99,50	0,50	0,00	12,7503
3	45,0000	0,6340	1,3690	0,6385	77,6	85,72	12,08	2,20	12,7301
4	53,0000	0,6575	1,3711	0,6620	79,0	89,00	9,00	2,00	12,3388
5	54,4400	0,6535	1,3694	0,6580	78,0	82,00	15,50	2,50	12,4248
6	54,5000	0,6525	1,3691	0,6570	80,0	92,70	6,00	1,30	12,4441
7	55,0000	0,6490	1,3682	0,6535	85,1	87,00	13,00	0,00	12,5146
8	55,0000	0,6470	1,3750	0,6515	82,0	91,66	5,00	3,34	12,5530
9	58,0000	0,6655	1,3750	0,6700	81,0	82,00	16,00	2,00	12,2287
10	58,0000	0,6602	1,3726	0,6647	82,0	89,50	9,10	1,40	12,3262
11	62,0000	0,6705	1,3774	0,6750	83,0	84,00	13,00	3,00	12,1674
12	62,0000	0,6585	1,3722	0,6630	82,0	87,50	11,00	1,50	12,3877
13	63,0000	0,6670	1,3760	0,6715	82,0	77,50	19,50	3,00	12,2382
14	65,0000	0,6580	1,3743	0,6625	89,2	81,50	18,50	0,00	12,4194
15	65,0000	0,6620	1,3820	0,6665	86,4	71,26	18,10	10,64	12,3448
16	65,0000	0,6770	1,3890	0,6815	85,4	90,43	9,57	0,00	12,0731
17	75,0000	0,6930	1,3910	0,6975	92,1	65,60	32,90	1,50	11,8663
18	75,0000	0,6820	1,3880	0,6865	92,0	70,63	29,37	0,00	12,0565
19	75,0000	0,6890	1,3940	0,6935	80,3	77,26	22,74	0,00	11,9348
20	79,0000	0,6890	1,3871	0,6935	88,0	68,00	30,00	2,00	11,9628
21	80,5000	0,6904	1,3929	0,6949	94,0	71,20	19,00	9,80	11,9491
22	82,0000	0,7129	1,0458	0,7172	92,3	77,20	18,70	4,10	11,5877
23	85,0000	0,7010	1,3990	0,7053	95,3	70,56	29,44	0,00	11,8037
24	85,0000	0,6980	1,3980	0,7025	95,3	64,65	35,35	0,00	11,8507
25	85,5000	0,7001	1,3969	0,7043	96,4	66,00	20,00	14,00	11,8239
26	90,0000	0,7030	1,3940	0,7072	100,8	68,30	31,10	0,60	11,8059
27	90,0000	0,6895	1,3880	0,6940	92,0	80,00	15,00	5,00	12,0304
28	90,5000	0,7062	1,4001	0,7104	98,7	57,90	21,80	20,30	11,7561
29	91,0000	0,6980	1,3921	0,7025	92,0	71,50	17,00	11,50	11,8917
30	91,1100	0,7322	1,4074	0,7365	102,0	36,20	58,20	5,60	11,3434
31	92,0000	0,6918	1,3893	0,6963	93,0	78,60	16,00	5,40	12,0044
32	93,0000	0,7067	1,3964	0,7110	93,0	80,00	15,00	5,00	11,7629
33	94,0000	0,7048	1,3955	0,7090	94,0	65,00	25,50	9,50	11,8028
34	94,0000	0,7038	1,3951	0,7080	94,0	63,70	32,80	3,50	11,8195
35	95,0000	0,7150	1,4050	0,7193	100,3	63,78	28,29	7,93	11,6404
36	95,0000	0,7060	1,4020	0,7103	100,4	59,20	21,26	19,54	11,7879
37	95,5000	0,7095	1,4022	0,7138	101,1	55,30	18,80	25,90	11,7335
38	97,0000	0,7088	1,3976	0,7130	96,0	71,00	18,00	11,00	11,7566
39	97,0000	0,6955	1,3913	0,7000	95,0	77,50	15,50	7,00	11,9750
40	100,0000	0,7117	1,3993	0,7160	97,0	63,50	26,00	10,50	11,7272
41	100,0000	0,7237	1,4052	0,7280	101,0	56,50	31,50	12,00	11,5339
42	100,5000	0,7160	1,4040	0,7203	104,1	52,80	18,00	29,20	11,6605
43	101,0000	0,7153	1,4010	0,7195	101,0	67,00	29,00	4,00	11,6767
44	102,0000	0,7300	1,4100	0,7343	104,2	58,00	39,00	3,00	11,4478
45	103,8900	0,7168	1,4019	0,7210	102,0	72,00	19,00	9,00	11,6713
46	104,0000	0,7017	1,3947	0,7060	97,0	76,50	15,50	8,00	11,9200
47	105,0000	0,7300	1,4098	0,7343	106,0	55,10	39,90	5,00	11,4670
48	105,0000	0,7240	1,4090	0,7283	105,5	58,33	41,67	0,00	11,5615
49	105,0000	0,7140	1,4060	0,7182	105,5	63,27	12,24	24,49	11,7241
50	105,5000	0,7191	1,4065	0,7233	106,3	53,50	16,00	30,50	11,6447
51	106,0000	0,7242	1,4106	0,7284	105,4	88,50	8,50	3,00	11,5664
52	107,0000	0,7218	1,4045	0,7260	104,0	64,50	28,50	7,00	11,6111
53	108,8900	0,7097	1,3987	0,7140	100,0	68,50	23,00	8,50	11,8186

Suite du Tableau A.1.1

N°	T _{mav} (°C)	d	n	Spgr	M	X _{pa}	X _{na}	X _{ar}	Kuop
54	109,0000	0,7067	1,3973	0,7110	100,0	75,50	16,00	8,50	11,8692
55	110,0000	0,7228	1,4052	0,7270	101,0	56,50	32,50	11,00	11,6144
56	110,0000	0,7188	1,4032	0,7230	102,0	60,00	35,00	5,00	11,6787
57	110,5000	0,7235	1,4087	0,7278	108,9	53,30	12,60	34,10	11,6049
58	112,0000	0,7398	1,4139	0,7440	106,0	48,00	40,00	12,00	11,3616
59	112,0000	0,7347	1,4113	0,7390	107,0	64,00	16,50	19,50	11,4385
60	112,0000	0,7241	1,4052	0,7283	111,6	59,10	37,00	3,90	11,6065
61	113,0000	0,7337	1,4109	0,7380	107,0	63,00	22,00	15,00	11,4603
62	113,5000	0,7193	1,4036	0,7235	102,0	67,50	16,00	16,50	11,6932
63	114,0000	0,7163	1,4021	0,7205	103,0	66,00	24,00	10,00	11,7451
64	114,0000	0,7258	1,4069	0,7300	104,0	59,50	27,50	13,00	11,5923
65	115,0000	0,7300	1,4120	0,7343	111,0	54,68	42,10	3,22	11,5307
66	115,0000	0,7260	1,4120	0,7303	110,4	61,58	19,20	19,22	11,5939
67	115,0000	0,7377	1,4130	0,7420	107,0	52,50	33,00	14,50	11,4111
68	116,0000	0,7312	1,4097	0,7355	108,8	61,50	28,00	10,50	11,5182
69	116,0000	0,7437	1,4162	0,7480	109,0	47,50	40,00	12,50	11,3257
70	117,0000	0,7305	1,4094	0,7348	108,0	66,90	21,10	12,00	11,5355
71	117,0000	0,7318	1,4100	0,7360	110,0	68,50	19,50	12,00	11,5167
72	121,0000	0,7228	1,4057	0,7270	106,0	63,50	25,50	11,00	11,6847
73	124,0000	0,7427	1,4159	0,7470	115,0	51,90	41,70	6,40	11,3904
74	125,0000	0,7320	1,4110	0,7362	118,0	58,10	25,90	16,00	11,5638
75	125,0000	0,7400	1,4200	0,7442	114,6	58,23	26,22	15,55	11,4395
76	125,0000	0,7330	1,4180	0,7372	114,5	53,82	23,40	22,78	11,5481
77	126,0000	0,7326	1,4150	0,7369	116,6	73,00	21,50	5,50	11,5590
78	126,6700	0,7352	1,4121	0,7395	120,9	61,90	30,60	7,50	11,5225
79	126,6700	0,7483	1,4188	0,7525	114,0	51,00	32,50	16,50	11,3235
80	127,0000	0,7508	1,4202	0,7550	114,0	45,50	40,50	14,00	11,2880
81	128,0000	0,7387	1,4140	0,7430	115,0	68,50	19,00	12,50	11,4765
82	130,0000	0,7427	1,4161	0,7470	115,0	56,50	30,50	13,00	11,4273
83	133,0000	0,7458	1,4158	0,7463	114,0	66,40	19,60	14,00	11,4564
84	133,0000	0,7458	1,4178	0,7500	117,0	56,00	30,00	14,00	11,3998
85	134,0000	0,7508	1,4204	0,7550	118,0	62,00	20,00	18,00	11,3304
86	135,0000	0,7450	1,4220	0,7492	120,5	50,29	36,84	12,87	11,4242
87	138,8900	0,7734	1,4328	0,7774	131,0	39,70	39,60	20,70	11,0325
88	140,0000	0,7490	1,4193	0,7533	125,8	67,90	24,20	7,90	11,3921
89	145,0000	0,7540	1,4270	0,7582	125,7	60,97	22,37	16,66	11,3483
90	146,0000	0,7490	1,4239	0,7532	127,2	62,10	23,00	14,90	11,4296
91	146,1100	0,7520	1,4270	0,7558	127,0	65,50	17,00	17,50	11,3909
92	147,0000	0,7513	1,4210	0,7555	126,0	60,50	13,50	26,00	11,4007
93	147,0000	0,7680	1,4300	0,7720	127,0	51,00	31,00	18,00	11,1571
94	147,0000	0,7635	1,4275	0,7675	127,0	50,00	27,00	23,00	11,2225
95	148,0000	0,7685	1,4303	0,7725	127,0	42,00	39,00	19,00	11,1556

Tableau A.1.2 : données des fractions pétrolières considérées légères de 150 à 300°C.

N°	T _{max} (°C)	d	N	Spgr	M	X _{pa}	X _{na}	X _{ar}	Kuop
1	150,5600	0,7590	1,4240	0,7628	132,0	51,00	39,50	9,50	11,3126
2	151,1100	0,7590	1,4325	0,7628	130,0	65,00	17,00	18,00	11,3158
3	152,0000	0,7700	1,4312	0,7740	129,0	49,00	31,50	19,50	11,1572
4	153,0000	0,7526	1,4272	0,7666	126,0	63,70	17,40	18,90	11,2707
5	153,0000	0,7715	1,4319	0,7755	130,0	42,00	40,00	18,00	11,1414
6	153,0000	0,7670	1,4296	0,7710	130,0	50,00	29,00	21,00	11,2064
7	155,0000	0,7670	1,4290	0,7710	133,3	67,80	22,80	9,40	11,218
8	155,0000	0,7640	1,4340	0,7680	130,0	59,41	27,39	13,20	11,2618
9	155,5000	0,7627	1,4274	0,7667	130,0	65,60	17,10	17,30	11,2838
10	157,2200	0,7620	1,4350	0,7658	133,0	66,50	17,00	16,50	11,3070
11	158,0000	0,7720	1,4324	0,7760	133,0	47,50	32,00	20,50	11,1629
12	158,5000	0,7650	1,4286	0,7690	133,0	60,00	15,00	25,00	11,2674
13	158,8900	0,7711	1,4356	0,7750	133,0	49,00	29,50	21,50	11,1824
14	159,0000	0,7745	1,4338	0,7785	133,0	40,50	41,00	18,50	11,1327
15	160,5600	0,8008	1,4436	0,8046	144,0	18,60	69,80	11,60	10,7802
16	161,1100	0,7581	1,4251	0,7624	142,4	59,30	30,80	9,90	11,3801
17	164,0000	0,8648	1,4889	0,8679	122,0	22,00	21,00	57,00	10,0115
18	165,0000	0,7690	1,4370	0,7730	135,7	32,48	47,29	20,23	11,2463
19	165,0000	0,7760	1,4347	0,7800	137,0	45,50	35,00	19,50	11,1454
20	165,0000	0,7820	1,4370	0,7860	137,0	39,00	41,50	19,50	11,0603
21	165,0000	0,7756	1,4382	0,7796	137,0	46,00	32,00	22,00	11,1511
22	166,0000	0,7627	1,4311	0,7667	138,6	71,80	13,50	14,70	11,3444
23	175,0000	0,7790	1,4345	0,7830	145,7	55,10	33,40	11,50	11,1587
24	175,0000	0,7750	1,4400	0,7790	141,7	25,93	48,33	25,74	11,2160
25	186,0000	0,7713	1,4354	0,7753	151,3	73,80	8,80	17,40	11,3311
26	188,8900	0,7790	1,4398	0,7829	154,0	60,00	19,00	21,00	11,2371
27	190,0000	0,7850	1,4398	0,7890	154,0	60,00	21,00	19,00	11,1562
28	196,0000	0,7856	1,4402	0,7896	153,0	53,80	18,10	28,10	11,1804
29	196,0000	0,7915	1,4434	0,7955	157,0	43,50	38,50	18,00	11,0974
30	196,0000	0,7990	1,4476	0,8030	161,0	37,50	44,00	18,50	10,9938
31	196,1100	0,8010	1,4470	0,8050	157,0	30,00	49,50	20,50	10,9671
32	200,0000	0,7930	1,4443	0,7970	160,0	42,50	39,50	18,00	11,0980
33	200,0000	0,7880	1,4490	0,7920	162,0	58,00	22,50	19,50	11,1680
34	202,7800	0,8060	1,4500	0,8101	161,0	29,50	49,50	21,00	10,9331
35	206,1100	0,7860	1,4430	0,7899	165,0	59,00	20,00	21,00	11,2306
36	206,6700	0,8045	1,4444	0,8083	162,0	30,90	64,30	4,80	10,9779
37	207,0000	0,7960	1,4459	0,8000	165,0	42,00	40,50	17,50	11,0935
38	207,0000	0,8023	1,4494	0,8060	166,0	36,50	45,50	18,00	11,0109
39	207,2200	0,7920	1,4500	0,7960	161,0	56,30	18,70	25,00	11,1504
40	207,7800	0,8080	1,4485	0,8121	166,0	28,50	50,50	21,00	10,9323
41	208,0000	0,7820	1,4369	0,7860	168,3	54,00	26,70	19,30	11,2965
42	208,0000	0,8004	1,4510	0,8041	162,6	18,09	42,71	39,20	11,0422
43	213,8900	0,7985	1,4473	0,8025	170,0	42,00	41,00	17,00	11,0952
44	213,8900	0,8100	1,4500	0,8160	171,0	26,00	52,50	21,50	10,9116
45	216,0000	0,7919	1,4453	0,7959	170,5	54,30	6,00	39,70	11,1983
46	222,0000	0,7930	1,4450	0,7970	175,5	51,50	26,30	22,20	11,2144
47	223,5000	0,9553	1,5524	0,9606	155,0	10,40	5,00	84,60	9,3109
48	235,5600	0,9308	1,5321	0,9360	171,0	3,00	12,30	84,70	9,6090
49	237,5000	0,8076	1,4550	0,8113	183,2	13,60	15,43	70,97	11,0958
50	244,6100	0,9681	1,5602	0,9733	158,0	5,30	4,00	90,70	9,2790
51	244,6100	0,9501	1,5459	0,9553	167,0	5,80	6,00	88,20	9,4538
52	245,1100	0,9641	1,5569	0,9693	156,0	3,80	2,00	94,20	9,3194

Suite du Tableau A.1.2

N°	T _{mav} (°C)	D	n	Spgr	M	Xpa	Xna	Xar	Kuop
53	245,7200	0,9680	1,5600	0,9732	161,0	3,00	4,00	93,00	9,2846
54	246,2800	0,9657	1,5581	0,9709	154,0	3,30	3,30	93,40	9,3089
55	255,0000	0,8066	1,4533	0,8104	167,9	48,40	20,20	31,40	11,1963
56	258,5000	0,9756	1,5644	0,9807	156,0	3,90	3,00	93,10	9,2665
57	262,2200	0,9664	1,5565	0,9715	187,0	2,20	15,10	82,70	9,3696
58	262,5000	0,8232	1,4630	0,827	210,0	45,31	5,16	49,53	11,0081
59	265,0000	0,9752	1,5632	0,9802	156,0	4,60	4,00	91,40	9,2979
60	265,0000	0,9602	1,5513	0,9652	186,0	4,70	9,60	85,70	9,4424
61	279,4400	0,8438	1,4716	0,8475	214,0	38,80	41,50	19,70	10,8217
62	286,1100	0,8578	1,4776	0,8616	227,0	29,80	45,60	24,60	10,6752
63	287,0000	0,8277	1,4660	0,8314	235,5	59,81	5,58	34,61	11,0672
64	295,0000	0,8219	1,4610	0,8256	248,7	48,90	26,20	24,90	11,1829
65	298,6700	0,9082	1,5016	0,9119	233,0	34,10	45,90	20,00	10,1403

Tableau A.1.3 : données des fractions pétrolières considérées légères de 300 à 523.89°C.

N°	T _{max} (°C)	d	n	Spgr	M	X _{pa}	X _{na}	X _{ar}	Kuop
1	305,0000	0,8310	1,4652	0,8347	258,6000	51,5	29,2	19,3	11,1077
2	305,6700	0,8497	1,4719	0,8535	245,0000	58,4	31,8	9,8	10,8660
3	306,2700	0,8912	1,4896	0,8939	250,0000	10,5	63,9	25,6	10,3775
4	306,8000	0,8770	1,4838	0,8800	253,0000	58	34	8	10,5438
5	311,5000	0,8343	1,4690	0,8381	263,1000	73,84	5	21,16	11,0926
6	323,6700	0,8319	1,4637	0,8357	265,0000	70	22,7	7,3	11,1803
7	326,6700	0,9360	1,5212	0,9357	248,0000	30,4	43	26,6	9,9977
8	327,7200	0,8756	1,4968	0,8788	263,0000	43	45	12	10,6496
9	333,2200	0,8888	1,5044	0,8919	265,0000	57	28	15	10,5166
10	336,9700	0,8980	1,5100	0,9011	266,0000	42	37	21	10,4249
11	337,0000	0,8461	1,4742	0,8499	292,8000	82,38	6,56	11,06	11,0531
12	340,3500	0,8806	1,4993	0,8837	277,0000	43	43	14	10,6446
13	340,7700	0,9036	1,5138	0,9082	268,0000	40	41	19	10,3592
14	342,6700	0,8709	1,4842	0,8746	282,0000	56,5	30,7	12,8	10,7654
15	344,6700	0,9568	1,5366	0,9605	267,0000	30,9	37	32,1	9,8104
16	345,0000	0,8400	1,4710	0,8437	305,6000	56,9	25,9	17,2	11,1700
17	352,2500	0,9040	1,5130	0,9107	283,0000	43	39	18	10,3780
18	354,1900	0,9092	1,5156	0,9160	284,0000	45	33	22	10,3259
19	357,6700	0,8425	1,4694	0,8463	297,0000	69,4	22,4	8,2	11,1916
20	359,7500	0,8530	1,4798	0,8563	318,1000	68,41	19,88	11,71	11,0699
21	361,6400	0,9040	1,5120	0,9107	296,0000	48	34	18	10,4164
22	362,5400	0,8868	1,5004	0,8899	306,0000	51	36	13	10,6636
23	364,6700	0,9671	1,5452	0,9708	281,0000	31,8	34	34,2	9,7831
24	366,2300	0,8864	1,5002	0,8895	311,0000	61	25	14	10,6837
25	367,8800	0,9180	1,5190	0,9249	300,0000	47	30	23	10,2814
26	369,1100	0,9360	1,5108	0,9104	307,0000	48	35	17	10,4501
27	373,0300	0,8880	1,5000	0,8911	321,0000	55	32	13	10,6926
28	374,0600	0,9214	1,5207	0,9283	307,0000	46	31	23	10,2682
29	379,1500	0,9236	1,5218	0,9305	313,0000	47	29	24	10,2640
30	379,1500	0,8612	1,4836	0,8644	343,0000	72	16	12	11,0488
31	380,6700	0,8845	1,4919	0,8883	325,0000	58,4	28,9	12,7	10,7578
32	383,7800	0,9240	1,5220	0,9309	319,0000	46	31	23	10,2777
33	384,6700	0,8600	1,4820	0,8633	353,0000	75	16	9	11,0862
34	384,6700	0,9742	1,5492	0,9779	305,0000	32,9	32,2	34,9	9,7870
35	388,7800	0,9182	1,5172	0,9251	330,0000	48	32	20	10,3618
36	390,8700	0,8860	1,4980	0,8891	348,0000	65	21	14	10,7898
37	391,4700	0,8602	1,4821	0,8635	363,0000	75	17	8	11,1122
38	392,0700	0,9030	1,5085	0,9097	341,0000	53	32	15	10,5503
39	394,2500	0,8684	1,4862	0,8717	364,0000	60	34	6	11,0192
40	394,7300	0,8532	1,4766	0,8565	374,0000	68	31	1	11,2168
41	396,2500	0,8868	1,4974	0,8901	357,0000	64	23	13	10,7996
42	402,6200	0,8878	1,4979	0,8909	366,0000	66	21	13	10,8156
43	404,0000	0,8620	1,4820	0,8652	383,0000	76	17	7	11,1426
44	404,2100	0,8664	1,4770	0,8700	394,0000	72	25	3	11,0820
45	405,3900	0,9204	1,5172	0,9273	354,0000	46	28	26	10,4018
46	407,7400	0,8640	1,4830	0,8672	388,0000	77	16	7	11,1323
47	410,5200	0,8666	1,4833	0,8698	393,0000	76	17	7	11,1105
48	411,6300	0,8690	1,4855	0,7823	392,0000	71	21	8	12,3582
49	412,9300	0,9070	1,5142	0,9360	364,0000	10,2	45,5	44,3	10,3339
50	413,1500	0,8978	1,5029	0,9009	378,0000	58	29	13	10,7373
51	413,6000	0,9116	1,5108	0,9184	372,0000	52	34	14	10,5345
52	415,5900	0,8720	1,4870	0,8752	397,0000	71	20	9	11,0626
53	416,0200	0,8900	1,4980	0,8931	387,0000	65	23	12	10,8426

Suite du Tableau A.1.3

N°	T _{max} (°C)	d	n	Spgr	M	Xpa	Xna	Xar	Kuop
54	416,0200	0,8900	1,4980	0,8931	387,0000	65	23	12	11,1077
55	416,8800	0,8480	1,4720	0,8517	415,0000	74	26	0	10,8660
56	424,1400	0,8730	1,4865	0,8763	412,0000	73	20	7	11,0833
57	425,6700	0,9001	1,5002	0,9046	403,0000	59	28	13	10,7425
58	427,1700	0,8568	1,4764	0,8601	428,0000	74	24	2	11,3045
59	428,9800	0,8724	1,4852	0,8756	422,0000	78	15	7	11,1116
60	433,1000	0,8744	1,4872	0,8777	426,0000	73	19	8	11,1015
61	433,2000	0,8448	1,4694	0,8485	446,0000	81	19	0	11,4840
62	433,5200	0,8646	1,4803	0,8679	435,0000	70	26	4	11,2286
63	434,0400	0,8732	1,4856	0,8765	430,0000	78	16	6	11,1205
64	439,8100	0,8768	1,4874	0,8801	438,0000	73	19	8	11,0980
65	440,1800	0,8738	1,4859	0,8771	440,0000	79	15	6	11,1374
66	442,4100	0,8776	1,4878	0,8809	442,0000	73	20	7	11,0982
67	463,6900	0,8798	1,4869	0,8831	482,0000	78	15	7	11,1540
68	478,3200	0,9178	1,5089	0,9247	483,0000	66	24	10	10,7063
69	481,2400	0,9100	1,5040	0,9168	494,0000	79	13	8	10,8093
70	485,5400	0,8860	1,4890	0,8891	521,0000	75	20	5	11,1625
71	486,2700	0,9180	1,5090	0,9249	497,0000	66	24	10	10,7331
72	502,7800	0,8750	1,4865	0,8760	523,0000	78,4	13,3	8,3	11,3956
73	523,8900	0,9240	1,5090	0,9309	571,0000	68	22	10	10,7989

Annexe II

Tableau A.2.1: Comportement du RNA par rapport à la 1ère partie des données pour l'obtention du Kuop.

N°	T _{mav} (°C)	d	Kuop	RNA	% erreur
1	35,0000	0,6160	13,0175	13,0175	0,0000
2	40,0000	0,6310	12,7503	12,7503	0,0000
3	45,0000	0,6340	12,7301	12,7301	0,0000
4	53,0000	0,6575	12,3388	12,3388	0,0000
6	54,5000	0,6525	12,4441	12,4441	0,0001
7	55,0000	0,6490	12,5146	12,5146	0,0002
8	55,0000	0,6470	12,5530	12,5530	0,0001
9	58,0000	0,6655	12,2287	12,2287	0,0000
11	62,0000	0,6705	12,1674	12,1675	0,0005
12	62,0000	0,6585	12,3877	12,3877	0,0001
13	63,0000	0,6670	12,2382	12,2382	0,0005
14	65,0000	0,6580	12,4194	12,4194	0,0000
16	65,0000	0,6770	12,0731	12,0730	0,0006
17	75,0000	0,6930	11,8663	11,8664	0,0005
18	75,0000	0,6820	12,0565	12,0570	0,0047
19	75,0000	0,6890	11,9348	11,9342	0,0049
21	80,5000	0,6904	11,9491	11,9485	0,0052
22	82,0000	0,7129	11,5877	11,5876	0,0011
23	85,0000	0,7010	11,8037	11,8038	0,0006
24	85,0000	0,6980	11,8507	11,8522	0,0120
26	90,0000	0,7030	11,8059	11,8048	0,0092
27	90,0000	0,6895	12,0304	12,0297	0,0059
28	90,5000	0,7062	11,7561	11,7556	0,0038
29	91,0000	0,6980	11,8917	11,8926	0,0081
31	92,0000	0,6918	12,0044	12,0044	0,0004
32	93,0000	0,7067	11,7629	11,7641	0,0098
33	94,0000	0,7048	11,8028	11,8021	0,0062
34	94,0000	0,7038	11,8195	11,8184	0,0094
36	95,0000	0,7060	11,7879	11,7890	0,0094
37	95,5000	0,7095	11,7335	11,7341	0,0055
38	97,0000	0,7088	11,7566	11,7559	0,0064
39	97,0000	0,6955	11,9750	11,9759	0,0079
41	100,0000	0,7237	11,5339	11,5344	0,0043
42	100,5000	0,716	11,6605	11,6610	0,0045
43	101,0000	0,7153	11,6767	11,6758	0,0077
44	102,0000	0,73	11,4478	11,4477	0,0005
46	104,0000	0,7017	11,9200	11,9195	0,0048
47	105,0000	0,73	11,4670	11,4670	0,0007
48	105,0000	0,724	11,5615	11,5621	0,0051
49	105,0000	0,714	11,7241	11,7240	0,0012
51	106,0000	0,7242	11,5664	11,5654	0,0081
52	107,0000	0,7218	11,6111	11,6105	0,0053

suite du Tableau A.2.1

N°	T _{mav} (°C)	d	Kuop	RNA	% erreur
53	108,8900	0,7097	11,8186	11,8188	0,0011
54	109,0000	0,7067	11,8692	11,8692	0,0004
56	110,0000	0,7188	11,6787	11,6790	0,0026
57	110,5000	0,7235	11,6049	11,6059	0,0090
58	112,0000	0,7398	11,3616	11,3616	0,0000
59	112,0000	0,7347	11,4385	11,4382	0,0020
61	113,0000	0,7337	11,4603	11,4604	0,0010
62	113,5000	0,7193	11,6932	11,6934	0,0014
63	114,0000	0,7163	11,7451	11,7449	0,0017
64	114,0000	0,7258	11,5923	11,5913	0,0082
66	115,0000	0,726	11,5939	11,5944	0,0044
67	115,0000	0,7377	11,4111	11,4112	0,0015
68	116,0000	0,7312	11,5182	11,5189	0,0059
69	116,0000	0,7437	11,3257	11,3257	0,0000
71	117,0000	0,7318	11,5167	11,5160	0,0063
72	121,0000	0,7228	11,6847	11,6848	0,0004
73	124,0000	0,7427	11,3904	11,3904	0,0002
74	125,0000	0,732	11,5638	11,5635	0,0023
76	125,0000	0,733	11,5481	11,5484	0,0026
77	126,0000	0,7326	11,5590	11,5590	0,0000
78	126,6700	0,7352	11,5225	11,5225	0,0001
79	126,6700	0,7483	11,3235	11,3235	0,0000
81	128,0000	0,7387	11,4765	11,4765	0,0001
82	130,0000	0,7427	11,4273	11,4273	0,0000
83	133,0000	0,7458	11,4564	11,4281	0,2467
84	133,0000	0,7458	11,3998	11,4281	0,2479
86	135,0000	0,745	11,4242	11,4242	0,0000
87	138,8900	0,7734	11,0325	11,0325	0,0000
88	140,0000	0,749	11,3921	11,3921	0,0000
89	145,0000	0,754	11,3483	11,3483	0,0001
91	146,1100	0,752	11,3909	11,3909	0,0002
92	147,0000	0,7513	11,4007	11,4007	0,0001
93	147,0000	0,768	11,1571	11,1571	0,0000
94	147,0000	0,7635	11,2225	11,2225	0,0001
95	148,0000	0,7685	11,1556	11,1556	0,0001
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
0,0356		0,2653	0,0001		

Tableau A.2.2: Comportement du RNA par rapport à la 2ème partie des données pour l'obtention du Kuop.

N°	T _{mav} (°C)	d	Kuop	RNA	% erreur
1	150,5600	0,7590	11,3126	11,3128	0,0024
2	151,1100	0,7590	11,3158	11,3128	0,0260
3	152,0000	0,7700	11,1572	11,1568	0,0038
4	153,0000	0,7526	11,2707	11,2716	0,0082
6	153,0000	0,7670	11,2064	11,2087	0,0211
7	155,0000	0,7670	11,2180	11,2183	0,0029
8	155,0000	0,7640	11,2618	11,2644	0,0234
9	155,5000	0,7627	11,2838	11,2856	0,0162
11	158,0000	0,7720	11,1629	11,1607	0,0194
12	158,5000	0,7650	11,2674	11,2672	0,0013
13	158,8900	0,7711	11,1824	11,1794	0,0268
14	159,0000	0,7745	11,1327	11,1319	0,0078
16	161,1100	0,7581	11,3801	11,3761	0,0348
17	164,0000	0,8648	10,0115	10,0114	0,0005
18	165,0000	0,7690	11,2463	11,2419	0,0386
19	165,0000	0,7760	11,1454	11,1482	0,0253
21	165,0000	0,7756	11,1511	11,1532	0,0188
22	166,0000	0,7627	11,3444	11,3505	0,0537
23	175,0000	0,7790	11,1587	11,1604	0,0152
24	175,0000	0,7750	11,2160	11,2119	0,0364
26	188,8900	0,7790	11,2371	11,2332	0,0339
27	190,0000	0,7850	11,1562	11,1591	0,0252
28	196,0000	0,7856	11,1804	11,1805	0,0014
29	196,0000	0,7915	11,0974	11,1029	0,0495
31	196,1100	0,8010	10,9671	10,9701	0,0281
32	200,0000	0,7930	11,0980	11,1016	0,0330
33	200,0000	0,7880	11,1680	11,1682	0,0015
34	202,7800	0,8060	10,9331	10,9276	0,0508
36	206,6700	0,8045	10,9779	10,9707	0,0653
37	207,0000	0,796	11,0935	11,0942	0,0066
38	207,0000	0,8023	11,0109	11,0051	0,0529
39	207,2200	0,792	11,1504	11,1498	0,0054
41	208,0000	0,782	11,2965	11,2974	0,0081
42	208,0000	0,8004	11,0422	11,0376	0,0419
43	213,8900	0,7985	11,0952	11,0940	0,0103
44	213,8900	0,81	10,9116	10,9245	0,1182
46	222,0000	0,793	11,2144	11,2142	0,0010
47	223,5000	0,9553	9,3109	9,3114	0,0050
48	235,5600	0,9308	9,6090	9,6090	0,0005
49	237,5000	0,8076	11,0958	11,0949	0,0082
51	244,6100	0,9501	9,4538	9,4538	0,0001
52	245,1100	0,9641	9,3194	9,3191	0,0023

suite du Tableau A.2.2

N°	Tmav(°C)	d	Kuop	RNA	% erreur
53	245,7200	0,968	9,2846	9,2842	0,0042
54	246,2800	0,9657	9,3089	9,3084	0,0061
56	258,5000	0,9756	9,2665	9,2669	0,0044
57	262,2200	0,9664	9,3696	9,3699	0,0027
58	262,5000	0,8232	11,0081	11,0092	0,0098
59	265,0000	0,9752	9,2979	9,2980	0,0008
61	279,4400	0,8438	10,8217	10,8209	0,0072
62	286,1100	0,8578	10,6752	10,6752	0,0002
63	287,0000	0,8277	11,0672	11,0673	0,0014
64	295,0000	0,8219	11,1829	11,1829	0,0000
65	298,6700	0,9082	10,1403	10,1403	0,0002
	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min		
	0,1427	0,7449	0,0029		

Tableau A.2.3: Comportement du RNA par rapport à la 3ème partie des données pour l'obtention du Kuop.

N°	T _{mav} (°C)	d	Kuop	RNA	% erreur
1	305,0000	0,8310	11,1077	11,1076	0,0009
2	305,6700	0,8497	10,8660	10,8665	0,0041
3	306,2700	0,8912	10,3775	10,3802	0,0253
4	306,8000	0,8770	10,5438	10,5392	0,0440
6	323,6700	0,8319	11,1803	11,1803	0,0001
7	326,6700	0,9360	9,9977	9,9982	0,0054
8	327,7200	0,8756	10,6496	10,6515	0,0179
9	333,2200	0,8888	10,5166	10,5123	0,0401
11	337,0000	0,8461	11,0531	11,0547	0,0143
12	340,3500	0,8806	10,6446	10,6480	0,0312
13	340,7700	0,9036	10,3592	10,3572	0,0199
14	342,6700	0,8709	10,7654	10,7702	0,0452
16	345,0000	0,8400	11,1700	11,1703	0,0026
17	352,2500	0,9040	10,3780	10,3835	0,0523
18	354,1900	0,9092	10,3259	10,3226	0,0321
19	357,6700	0,8425	11,1916	11,1902	0,0126
21	361,6400	0,9040	10,4164	10,4166	0,0020
22	362,5400	0,8868	10,6636	10,6627	0,0082
23	364,6700	0,9671	9,7831	9,7822	0,0086
24	366,2300	0,8864	10,6837	10,6829	0,0078
26	369,1100	0,9360	10,4501	10,4495	0,0061
27	373,0300	0,8880	10,6926	10,6908	0,0167
28	374,0600	0,9214	10,2682	10,2628	0,0523
29	379,1500	0,9236	10,2640	10,2742	0,0996
31	380,6700	0,8845	10,7578	10,7643	0,0601
32	383,7800	0,9240	10,2777	10,2728	0,0476
33	384,6700	0,8600	11,0862	11,0810	0,0471
34	384,6700	0,9742	9,7870	9,7877	0,0069
36	390,8700	0,8860	10,7898	10,7870	0,0261
37	391,4700	0,8602	11,1122	11,1079	0,0387
38	392,0700	0,9030	10,5503	10,5547	0,0421
39	394,2500	0,8684	11,0192	11,0153	0,0358
41	396,2500	0,8868	10,7996	10,7991	0,0043
42	402,6200	0,8878	10,8156	10,8130	0,0236
43	404,0000	0,8620	11,1426	11,1450	0,0218
44	404,2100	0,8664	11,0820	11,0871	0,0462
46	407,7400	0,8640	11,1323	11,1320	0,0032
47	410,5200	0,8666	11,1105	11,1105	0,0001
48	411,6300	0,8690	12,3582	12,3583	0,0001

suite du Tableau A.2.3

N°	T _{mav} (°C)	d	Kuop	RNA	% erreur
49	412,9300	0,9070	10,3339	10,3341	0,0022
51	413,6000	0,9116	10,5345	10,5344	0,0013
52	415,5900	0,8720	11,0626	11,0629	0,0029
53	416,0200	0,8900	10,8426	10,8425	0,0010
54	416,8800	0,8480	11,3732	11,3755	0,0200
56	419,6900	0,8726	11,0703	11,0662	0,0376
57	422,5400	0,8920	10,8442	10,8455	0,0122
58	424,1400	0,8730	11,0833	11,0825	0,0074
59	425,6700	0,9001	10,7425	10,7379	0,0427
61	428,9800	0,8724	11,1116	11,1096	0,0181
62	433,1000	0,8744	11,1015	11,1004	0,0105
63	433,2000	0,8448	11,4840	11,4829	0,0096
64	433,5200	0,8646	11,2286	11,2344	0,0516
66	439,8100	0,8768	11,0980	11,0978	0,0020
67	440,1800	0,8738	11,1374	11,1368	0,0059
68	442,4100	0,8776	11,0982	11,0987	0,0045
69	463,6900	0,8798	11,1540	11,1606	0,0593
71	481,2400	0,9100	10,8093	10,8111	0,0161
72	485,5400	0,8860	11,1625	11,1626	0,0006
73	486,2700	0,9180	10,7331	10,7324	0,0069
74	502,7800	0,8750	11,3956	11,3929	0,0244
75	523,8900	0,9240	10,7989	10,7987	0,0022

Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
0,4553	1,6236	0,0145

Tableau A.2.4: Comportement du RNA par rapport à la 1ère partie des données d'entrée

N°	T _{mav} (°C)	d	Spgr	RNA	% erreur
1	35,0000	0,6160	0,6205	0,6207	0,0362
2	40,0000	0,6310	0,6355	0,6347	0,1268
3	45,0000	0,6340	0,6385	0,6392	0,1131
4	53,0000	0,6575	0,6620	0,6620	0,0072
6	54,5000	0,6525	0,6570	0,6573	0,0402
7	55,0000	0,6490	0,6535	0,6534	0,0193
8	55,0000	0,6470	0,6515	0,6512	0,0510
9	58,0000	0,6655	0,6700	0,6701	0,0107
11	62,0000	0,6705	0,6750	0,6752	0,0342
12	62,0000	0,6585	0,6630	0,6624	0,0921
13	63,0000	0,6670	0,6715	0,6726	0,1680
14	65,0000	0,6580	0,6625	0,6624	0,0222
16	65,0000	0,6770	0,6815	0,6804	0,1666
17	75,0000	0,6930	0,6975	0,6956	0,2779
18	75,0000	0,6820	0,6865	0,6880	0,2158
19	75,0000	0,6890	0,6935	0,6928	0,0956
21	80,5000	0,6904	0,6949	0,6963	0,1999
22	82,0000	0,7129	0,7172	0,7150	0,3038
23	85,0000	0,7010	0,7053	0,7061	0,1076
24	85,0000	0,6980	0,7025	0,7034	0,1257
26	90,0000	0,7030	0,7072	0,7082	0,1436
27	90,0000	0,6895	0,6940	0,6938	0,0292
28	90,5000	0,7062	0,7104	0,7109	0,0709
29	91,0000	0,6980	0,7025	0,7031	0,0867
31	92,0000	0,6918	0,6963	0,6954	0,1293
32	93,0000	0,7067	0,7110	0,7112	0,0336
33	94,0000	0,7048	0,7090	0,7096	0,0815
34	94,0000	0,7038	0,7080	0,7086	0,0918
36	95,0000	0,7060	0,7103	0,7106	0,0421
37	95,5000	0,7095	0,7138	0,7135	0,0434
38	97,0000	0,7088	0,7130	0,7131	0,0137
39	97,0000	0,6955	0,7000	0,6980	0,2801
41	100,0000	0,7237	0,7280	0,7265	0,2059
42	100,5000	0,7160	0,7203	0,7203	0,0015
43	101,0000	0,7153	0,7195	0,7199	0,0571
44	102,0000	0,7300	0,7343	0,7323	0,2673
46	104,0000	0,7017	0,7060	0,7058	0,0296
47	105,0000	0,7300	0,7343	0,7339	0,0595
48	105,0000	0,7240	0,7283	0,7293	0,1438
49	105,0000	0,7140	0,7182	0,7196	0,1964
51	106,0000	0,7242	0,7284	0,7298	0,1873
52	107,0000	0,7218	0,7260	0,7276	0,2259

suite du Tableau A.2.4

N°	Tmav(°C)	d	Spgr	RNA	% erreur
53	108,8900	0,7097	0,7140	0,7138	0,0277
54	109,0000	0,7067	0,7110	0,7105	0,0714
56	110,0000	0,7188	0,7230	0,7238	0,1100
57	110,5000	0,7235	0,7278	0,7289	0,1533
58	112,0000	0,7398	0,7440	0,7419	0,2846
59	112,0000	0,7347	0,7390	0,7386	0,0531
61	113,0000	0,7337	0,7380	0,7380	0,0057
62	113,5000	0,7193	0,7235	0,7226	0,1306
63	114,0000	0,7163	0,7205	0,7184	0,2927
64	114,0000	0,7258	0,7300	0,7304	0,0516
66	115,0000	0,7260	0,7303	0,7303	0,0061
67	115,0000	0,7377	0,7420	0,7415	0,0631
68	116,0000	0,7312	0,7355	0,7359	0,0494
69	116,0000	0,7437	0,7480	0,7461	0,2548
71	117,0000	0,7318	0,7360	0,7364	0,0562
72	121,0000	0,7228	0,7270	0,7232	0,5170
73	124,0000	0,7427	0,7470	0,7474	0,0559
74	125,0000	0,7320	0,7362	0,7352	0,1354
76	125,0000	0,7330	0,7372	0,7365	0,0910
77	126,0000	0,7326	0,7369	0,7358	0,1558
78	126,6700	0,7352	0,7395	0,7389	0,0842
79	126,6700	0,7483	0,7525	0,7519	0,0826
81	128,0000	0,7387	0,7430	0,7426	0,0584
82	130,0000	0,7427	0,7470	0,7462	0,1089
83	133,0000	0,7458	0,7463	0,7486	0,3030
84	133,0000	0,7458	0,7500	0,7486	0,1918
86	135,0000	0,7450	0,7492	0,7472	0,2622
87	138,8900	0,7734	0,7774	0,7746	0,3573
88	140,0000	0,7490	0,7533	0,7520	0,1701
89	145,0000	0,7540	0,7582	0,7588	0,0761
91	146,1100	0,7520	0,7558	0,7570	0,1597
92	147,0000	0,7513	0,7555	0,7566	0,1482
93	147,0000	0,7680	0,7720	0,7717	0,0428
94	147,0000	0,7635	0,7675	0,7678	0,0365
95	148,0000	0,7685	0,7725	0,7716	0,1200
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
0,1221		0,5170	0,0015		

Tableau A.2.5: Comportement du RNA par rapport à la 2ème partie des données d'entrée pour l'obtention de la SpGr

N°	Tmav(°C)	d	Spgr	RNA	% erreur
1	150,5600	0,7590	0,7628	0,7650	0,2866
2	151,1100	0,7590	0,7628	0,7650	0,2845
3	152,0000	0,7700	0,7740	0,7742	0,0203
4	153,0000	0,7526	0,7666	0,7640	0,3425
6	153,0000	0,7670	0,7710	0,7706	0,0583
7	155,0000	0,7670	0,7710	0,7703	0,0844
8	155,0000	0,7640	0,7680	0,7677	0,0346
9	155,5000	0,7627	0,7667	0,7668	0,0157
11	158,0000	0,7720	0,7760	0,7758	0,0286
12	158,5000	0,7650	0,7690	0,7684	0,0729
13	158,8900	0,7711	0,7750	0,7746	0,0571
14	159,0000	0,7745	0,7785	0,7790	0,0656
16	161,1100	0,7581	0,7624	0,7651	0,3527
17	164,0000	0,8648	0,8679	0,8678	0,0172
18	165,0000	0,7690	0,7730	0,7720	0,1265
19	165,0000	0,7760	0,7800	0,7804	0,0527
21	165,0000	0,7756	0,7796	0,7799	0,0339
22	166,0000	0,7627	0,7667	0,7673	0,0829
23	175,0000	0,7790	0,7830	0,7836	0,0799
24	175,0000	0,7750	0,7790	0,7785	0,0692
26	188,8900	0,7790	0,7829	0,7822	0,0890
27	190,0000	0,7850	0,7890	0,7899	0,1094
28	196,0000	0,7856	0,7896	0,7898	0,0301
29	196,0000	0,7915	0,7955	0,7974	0,2366
31	196,1100	0,8010	0,8050	0,8073	0,2879
32	200,0000	0,7930	0,7970	0,7986	0,2061
33	200,0000	0,7880	0,7920	0,7924	0,0523
34	202,7800	0,8060	0,8101	0,8106	0,0642
36	206,6700	0,8045	0,8083	0,8093	0,1212
37	207,0000	0,796	0,8000	0,8012	0,1504
38	207,0000	0,8023	0,8060	0,8074	0,1794
39	207,2200	0,792	0,7960	0,7965	0,0593
41	208,0000	0,782	0,7860	0,7837	0,2978
42	208,0000	0,8004	0,8041	0,8056	0,1911
43	213,8900	0,7985	0,8025	0,8031	0,0794
44	213,8900	0,81	0,8160	0,8131	0,3604
46	222,0000	0,793	0,7970	0,7952	0,2280
47	223,5000	0,9553	0,9606	0,9599	0,0704
48	235,5600	0,9308	0,9360	0,9351	0,0968
49	237,5000	0,8076	0,8113	0,8102	0,1370
51	244,6100	0,9501	0,9553	0,9551	0,0198
52	245,1100	0,9641	0,9693	0,9695	0,0252

suite du Tableau A.2.5

N°	Tmav(°C)	d	Spgr	RNA	% erreur
53	245,7200	0,968	0,9732	0,9729	0,0259
54	246,2800	0,9657	0,9709	0,9708	0,0090
56	258,5000	0,9756	0,9807	0,9811	0,0376
57	262,2200	0,9664	0,9715	0,9695	0,2085
58	262,5000	0,8232	0,8270	0,8299	0,3546
59	265,0000	0,9752	0,9802	0,9815	0,1301
61	279,4400	0,8438	0,8475	0,8516	0,4850
62	286,1100	0,8578	0,8616	0,8605	0,1233
63	287,0000	0,8277	0,8314	0,8286	0,3332
64	295,0000	0,8219	0,8256	0,8282	0,3143
65	298,6700	0,9082	0,9119	0,9102	0,1905
		Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min	
		0,3101	1,1293	0,0119	

Tableau A.2.6: comportement du RNA par rapport à la 3ème partie des données d'entrée

N°	T _{nav} (°C)	d	Spgr	RNA	% erreur
1	305,0000	0,8310	0,8347	0,8347	0,0015
2	305,6700	0,8497	0,8535	0,8530	0,0569
3	306,2700	0,8912	0,8939	0,8940	0,0157
4	306,8000	0,8770	0,8800	0,8799	0,0094
6	323,6700	0,8319	0,8357	0,8356	0,0087
7	326,6700	0,9360	0,9357	0,9357	0,0012
8	327,7200	0,8756	0,8788	0,8789	0,0058
9	333,2200	0,8888	0,8919	0,8914	0,0616
11	337,0000	0,8461	0,8499	0,8501	0,0243
12	340,3500	0,8806	0,8837	0,8835	0,0237
13	340,7700	0,9036	0,9082	0,9104	0,2432
14	342,6700	0,8709	0,8746	0,8744	0,0184
16	345,0000	0,8400	0,8437	0,8436	0,0121
17	352,2500	0,9040	0,9107	0,9103	0,0479
18	354,1900	0,9092	0,9160	0,9165	0,0559
19	357,6700	0,8425	0,8463	0,8468	0,0569
21	361,6400	0,9040	0,9107	0,9098	0,0964
22	362,5400	0,8868	0,8899	0,8897	0,0218
23	364,6700	0,9671	0,9708	0,9707	0,0082
24	366,2300	0,8864	0,8895	0,8894	0,0147
26	369,1100	0,9360	0,9104	0,9105	0,0162
27	373,0300	0,8880	0,8911	0,8912	0,0100
28	374,0600	0,9214	0,9283	0,9290	0,0742
29	379,1500	0,9236	0,9305	0,9301	0,0378
31	380,6700	0,8845	0,8883	0,8878	0,0591
32	383,7800	0,9240	0,9309	0,9291	0,1904
33	384,6700	0,8600	0,8633	0,8639	0,0728
34	384,6700	0,9742	0,9779	0,9778	0,0095
36	390,8700	0,8860	0,8891	0,8895	0,0493
37	391,4700	0,8602	0,8635	0,8642	0,0787
38	392,0700	0,9030	0,9097	0,9081	0,1748
39	394,2500	0,8684	0,8717	0,8726	0,0999
41	396,2500	0,8868	0,8901	0,8909	0,0852
42	402,6200	0,8878	0,8909	0,8899	0,1093
43	404,0000	0,8620	0,8652	0,8595	0,6641
44	404,2100	0,8664	0,8700	0,8692	0,0903
46	407,7400	0,8640	0,8672	0,8779	1,2389
47	410,5200	0,8666	0,8698	0,8626	0,8265
48	411,6300	0,8690	0,7823	0,7861	0,4852
49	412,9300	0,9070	0,9360	0,9254	1,1295
51	413,6000	0,9116	0,9184	0,9302	1,2880
52	415,5900	0,8720	0,8752	0,8730	0,2471

suite du Tableau A.2.6

53	416,0200	0,8900	0,8931	0,8995	0,7188
54	416,8800	0,8480	0,8517	0,8514	0,0372
56	419,6900	0,8726	0,8759	0,8826	0,7642
57	422,5400	0,8920	0,8951	0,8941	0,1129
58	424,1400	0,8730	0,8763	0,8754	0,1034
59	425,6700	0,9001	0,9046	0,9024	0,2399
61	428,9800	0,8724	0,8756	0,8740	0,1804
62	433,1000	0,8744	0,8777	0,8760	0,1912
63	433,2000	0,8448	0,8485	0,8484	0,0156
64	433,5200	0,8646	0,8679	0,8659	0,2300
66	439,8100	0,8768	0,8801	0,8785	0,1862
67	440,1800	0,8738	0,8771	0,8755	0,1768
68	442,4100	0,8776	0,8809	0,8793	0,1840
69	463,6900	0,8798	0,8831	0,8819	0,1326
71	481,2400	0,9100	0,9168	0,9161	0,0746
72	485,5400	0,8860	0,8891	0,8897	0,0665
73	486,2700	0,9180	0,9249	0,9251	0,0246
74	502,7800	0,8750	0,8760	0,8785	0,2803
75	523,8900	0,9240	0,9309	0,9309	0,0024
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
3,4137		19,0133	0,1831		

Tableau.A.2.7:Comportement du RNA par rapport à la 1ère partie des données d'entrée pour obtenir M.

N°	T _{mav} (°C)	d	M	RNA	% erreur
1	35,0000	0,6160	73,0000	73,0000	0,0000
2	40,0000	0,6310	79,0000	78,2968	0,8901
3	45,0000	0,6340	77,6000	78,3032	0,9062
4	53,0000	0,6575	79,0000	81,7981	3,5420
6	54,5000	0,6525	80,0000	81,8142	2,2678
7	55,0000	0,6490	85,1000	81,8338	3,8380
8	55,0000	0,6470	82,0000	81,8434	0,1909
9	58,0000	0,6655	81,0000	81,8518	1,0517
11	62,0000	0,6705	83,0000	82,0860	1,1012
12	62,0000	0,6585	82,0000	82,9255	1,1286
13	63,0000	0,6670	82,0000	82,5678	0,6924
14	65,0000	0,6580	89,2000	89,3516	0,1699
16	65,0000	0,6770	85,4000	82,6293	3,2444
17	75,0000	0,6930	92,1000	92,0986	0,0015
18	75,0000	0,6820	92,0000	92,0049	0,0053
19	75,0000	0,6890	80,3000	80,2992	0,0009
21	80,5000	0,6904	94,0000	91,4831	2,6775
22	82,0000	0,7129	92,3000	92,6656	0,3961
23	85,0000	0,7010	95,3000	97,1687	1,9609
24	85,0000	0,6980	95,3000	95,2146	0,0896
26	90,0000	0,7030	100,8000	97,6726	3,1026
27	90,0000	0,6895	92,0000	92,7301	0,7936
28	90,5000	0,7062	98,7000	97,7607	0,9517
29	91,0000	0,6980	92,0000	92,9001	0,9784
31	92,0000	0,6918	93,0000	92,9180	0,0881
32	93,0000	0,7067	93,0000	98,0220	5,4000
33	94,0000	0,7048	94,0000	95,4389	1,5307
34	94,0000	0,7038	94,0000	93,2979	0,7470
36	95,0000	0,7060	100,4000	97,6892	2,7000
37	95,5000	0,7095	101,1000	98,3685	2,7018
38	97,0000	0,7088	96,0000	98,5644	2,6712
39	97,0000	0,6955	95,0000	94,9997	0,0003
41	100,0000	0,7237	101,0000	101,0010	0,0010
42	100,5000	0,7160	104,1000	102,9943	1,0622
43	101,0000	0,7153	101,0000	103,0759	2,0553
44	102,0000	0,7300	104,2000	103,7213	0,4594
46	104,0000	0,7017	97,0000	98,5155	1,5624
47	105,0000	0,7300	106,0000	104,5138	1,4021
48	105,0000	0,7240	105,5000	104,2926	1,1444
49	105,0000	0,7140	105,5000	103,8309	1,5821
51	106,0000	0,7242	105,4000	104,5832	0,7749
52	107,0000	0,7218	104,0000	104,7870	0,7567

suite du Tableau A.2.7

N°	Tmav(°C)	d	M	RNA	% erreur
53	109,0000	0,7067	100,0000	99,9784	0,0216
55	110,0000	0,7188	102,0000	105,6341	3,5628
56	110,5000	0,7235	108,9000	106,0344	2,6314
57	112,0000	0,7398	106,0000	107,4941	1,4095
58	112,0000	0,7347	107,0000	107,2075	0,1939
60	113,0000	0,7337	107,0000	107,5817	0,5436
61	113,5000	0,7193	102,0000	102,4837	0,4742
62	114,0000	0,7163	103,0000	102,2203	0,7570
63	114,0000	0,7258	104,0000	107,5663	3,4291
65	115,0000	0,7260	110,4000	108,0254	2,1510
66	115,0000	0,7377	107,0000	108,7466	1,6323
67	116,0000	0,7312	108,8000	108,8185	0,0170
68	116,0000	0,7437	109,0000	109,6385	0,5858
70	117,0000	0,7318	110,0000	109,3534	0,5878
71	121,0000	0,7228	106,0000	106,0268	0,0253
72	124,0000	0,7427	115,0000	114,1083	0,7754
73	125,0000	0,7320	118,0000	113,8643	3,5049
75	125,0000	0,7330	114,5000	113,9437	0,4859
76	126,0000	0,7326	116,6000	114,5212	1,7829
77	126,6700	0,7352	120,9000	115,1421	4,7626
78	126,6700	0,7483	114,0000	116,2031	1,9325
80	128,0000	0,7387	115,0000	116,2477	1,0849
81	130,0000	0,7427	115,0000	117,8050	2,4391
82	133,0000	0,7458	114,0000	119,8540	5,1351
83	133,0000	0,7458	117,0000	119,8540	2,4393
85	135,0000	0,7450	120,5000	120,9463	0,3703
86	138,8900	0,7734	131,0000	124,7990	4,7336
87	140,0000	0,7490	125,8000	123,8396	1,5583
88	145,0000	0,7540	125,7000	126,2543	0,4409
90	146,1100	0,7520	127,0000	126,5658	0,3419
91	147,0000	0,7513	126,0000	126,8472	0,6724
92	147,0000	0,7680	127,0000	127,5612	0,4419
93	147,0000	0,7635	127,0000	127,3770	0,2968
94	148,0000	0,7685	127,0000	127,8793	0,6924
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
2,7518		7,1998	0,2640		

Tableau A.2.8: Comportement du RNA par rapport à la 2ème partie des données d'entrée pour l'obtention de M.

N°	T _{nav} (°C)	d	M	RNA	% erreur
1	150,5600	0,7590	132,0000	130,4440	1,1788
2	151,1100	0,7590	130,0000	130,7833	0,6025
3	152,0000	0,7700	129,0000	128,7559	0,1893
4	153,0000	0,7526	126,0000	126,0000	0,0000
6	153,0000	0,7670	130,0000	129,9898	0,0078
7	155,0000	0,7670	133,3000	131,2129	1,5657
8	155,0000	0,7640	130,0000	131,9921	1,5323
9	155,5000	0,7627	130,0000	132,6810	2,0623
11	158,0000	0,7720	133,0000	131,8586	0,8582
12	158,5000	0,7650	133,0000	134,1456	0,8613
13	158,8900	0,7711	133,0000	132,6929	0,2309
14	159,0000	0,7745	133,0000	131,8609	0,8565
16	161,1100	0,7581	142,4000	138,3518	2,8428
17	164,0000	0,8648	122,0000	122,1107	0,0907
18	165,0000	0,7690	135,7000	137,9278	1,6417
19	165,0000	0,7760	137,0000	135,6982	0,9502
21	165,0000	0,7756	137,0000	135,8213	0,8604
22	166,0000	0,7627	138,6000	140,9044	1,6626
23	175,0000	0,7790	145,7000	143,0621	1,8105
24	175,0000	0,7750	141,7000	144,4848	1,9653
26	188,8900	0,7790	154,0000	155,3660	0,8870
27	190,0000	0,7850	154,0000	154,3994	0,2593
28	196,0000	0,7856	153,0000	159,1749	4,0359
29	196,0000	0,7915	157,0000	157,4463	0,2842
31	196,1100	0,8010	157,0000	154,4962	1,5948
32	200,0000	0,7930	160,0000	160,2611	0,1632
33	200,0000	0,7880	162,0000	161,6036	0,2447
34	202,7800	0,8060	161,0000	158,7440	1,4012
36	206,6700	0,8045	162,0000	162,3849	0,2376
37	207,0000	0,796	165,0000	164,7791	0,1339
38	207,0000	0,8023	166,0000	163,2252	1,6716
39	207,2200	0,792	161,0000	165,8382	3,0051
41	208,0000	0,782	168,3000	168,3247	0,0147
42	208,0000	0,8004	162,6000	164,4587	1,1431
43	213,8900	0,7985	170,0000	169,0009	0,5877
44	213,8900	0,81	171,0000	166,5318	2,6130
46	222,0000	0,793	175,5000	174,9871	0,2922
47	223,5000	0,9553	155,0000	154,9998	0,0001
48	235,5600	0,9308	171,0000	171,0288	0,0168
49	237,5000	0,8076	183,2000	183,2001	0,0001
51	244,6100	0,9501	167,0000	166,0476	0,5703
52	245,1100	0,9641	156,0000	159,2620	2,0910

suite du Tableau A.2.8

N°	T _{mav} (°C)	d	M	RNA	% erreur
53	245,7200	0,968	161,0000	156,4567	2,8220
54	246,2800	0,9657	154,0000	156,2494	1,4606
56	258,5000	0,9756	156,0000	160,9649	3,1826
57	262,2200	0,9664	187,0000	169,2473	9,4934
58	262,5000	0,8232	210,0000	206,2485	1,7864
59	265,0000	0,9752	156,0000	169,1189	8,4095
61	279,4400	0,8438	214,0000	220,6174	3,0922
62	286,1100	0,8578	227,0000	226,0871	0,4021
63	287,0000	0,8277	235,5000	234,3632	0,4827
64	295,0000	0,8219	248,7000	248,8516	0,0610
65	298,6700	0,9082	233,0000	231,6570	0,5764
			Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min
			3,6343	19,1435	0,2551

Tableau A.2.9: Comportement du RNA par rapport à la 3ème partie des données d'entrée pour l'obtention de M.

N°	T _{mav} (°C)	d	M	RNA	% erreur
1	305,0000	0,8310	258,6000	256,8329	0,6833
2	305,6700	0,8497	245,0000	254,7520	3,9804
3	306,2700	0,8912	250,0000	250,7462	0,2985
4	306,8000	0,8770	253,0000	252,2027	0,3151
6	323,6700	0,8319	265,0000	266,4828	0,5595
7	326,6700	0,9360	248,0000	248,0523	0,0211
8	327,7200	0,8756	263,0000	260,8588	0,8141
9	333,2200	0,8888	265,0000	261,6632	1,2592
11	337,0000	0,8461	292,8000	287,2502	1,8954
12	340,3500	0,8806	277,0000	276,9997	0,0001
13	340,7700	0,9036	268,0000	264,0092	1,4891
14	342,6700	0,8709	282,0000	285,7861	1,3426
16	345,0000	0,8400	305,6000	295,7976	3,2076
17	352,2500	0,9040	283,0000	283,5927	0,2094
18	354,1900	0,9092	284,0000	285,7045	0,6002
19	357,6700	0,8425	297,0000	308,6483	3,9220
21	361,6400	0,9040	296,0000	296,2796	0,0945
22	362,5400	0,8868	306,0000	304,1652	0,5996
23	364,6700	0,9671	281,0000	281,0001	0,0000
24	366,2300	0,8864	311,0000	310,1462	0,2745
26	369,1100	0,9360	307,0000	301,4299	1,8144
27	373,0300	0,8880	321,0000	320,6355	0,1135
28	374,0600	0,9214	307,0000	310,1330	1,0205
29	379,1500	0,9236	313,0000	315,2982	0,7343
31	380,6700	0,8845	325,0000	330,1205	1,5756
32	383,7800	0,9240	319,0000	320,5995	0,5014
33	384,6700	0,8600	353,0000	350,3670	0,7459
34	384,6700	0,9742	305,0000	305,3820	0,1253
36	390,8700	0,8860	348,0000	346,0299	0,5661
37	391,4700	0,8602	363,0000	363,7853	0,2163
38	392,0700	0,9030	341,0000	340,2164	0,2298
39	394,2500	0,8684	364,0000	365,2170	0,3343
41	396,2500	0,8868	357,0000	354,4215	0,7223
42	402,6200	0,8878	366,0000	364,6063	0,3808
43	404,0000	0,8620	383,0000	386,2930	0,8598
44	404,2100	0,8664	394,0000	384,2568	2,4729
46	407,7400	0,8640	388,0000	392,0650	1,0477
47	410,5200	0,8666	393,0000	392,9474	0,0134
48	411,6300	0,8690	392,0000	391,1387	0,2197
49	412,9300	0,9070	364,0000	371,9602	2,1869
51	413,6000	0,9116	372,0000	370,5887	0,3794
52	415,5900	0,8720	397,0000	396,6848	0,0794

suite du Tableau A.2.9

N°	T _{mav} (°C)	d	M	RNA	% erreur
53	416,0200	0,8900	387,0000	387,0727	0,0188
54	416,8800	0,8480	415,0000	418,1570	0,7607
56	419,6900	0,8726	405,0000	403,8797	0,2766
57	422,5400	0,8920	398,0000	397,8237	0,0443
58	424,1400	0,8730	412,0000	411,8132	0,0453
59	425,6700	0,9001	403,0000	398,8510	1,0295
61	428,9800	0,8724	422,0000	420,9530	0,2481
62	433,1000	0,8744	426,0000	427,1892	0,2792
63	433,2000	0,8448	446,0000	448,7771	0,6227
64	433,5200	0,8646	435,0000	433,3942	0,3692
66	439,8100	0,8768	438,0000	437,5690	0,0984
67	440,1800	0,8738	440,0000	439,8221	0,0404
68	442,4100	0,8776	442,0000	441,5510	0,1016
69	463,6900	0,8798	482,0000	482,0000	0,0000
71	481,2400	0,9100	494,0000	497,5438	0,7174
72	485,5400	0,8860	521,0000	510,3341	2,0472
73	486,2700	0,9180	497,0000	500,4368	0,6915
74	502,7800	0,8750	523,0000	526,6853	0,7046
75	523,8900	0,9240	571,0000	571,0000	0,0000
Erreur Moy			Erreur Max	Erreur Min	
0,7541			3,9804	0,0000	

Tableau A.2.10: Comportement du RNA par rapport à la 1ère partie des données d'entrée pour l'obtention de n.

N°	T _{mav} (°C)	d	n	RNA	% erreur
1	35,0000	0,6160	1,3610	1,3607	0,0195
2	40,0000	0,6310	1,3580	1,3589	0,0635
3	45,0000	0,6340	1,3690	1,3703	0,0984
4	53,0000	0,6575	1,3711	1,3618	0,6790
6	54,5000	0,6525	1,3691	1,3693	0,0120
7	55,0000	0,6490	1,3682	1,3735	0,3849
8	55,0000	0,6470	1,3750	1,3756	0,0409
9	58,0000	0,6655	1,3750	1,3763	0,0949
11	62,0000	0,6705	1,3774	1,3832	0,4232
12	62,0000	0,6585	1,3722	1,3725	0,0208
13	63,0000	0,6670	1,3760	1,3776	0,1162
14	65,0000	0,6580	1,3743	1,3698	0,3246
16	65,0000	0,6770	1,3890	1,3848	0,3025
17	75,0000	0,6930	1,3910	1,3843	0,4822
18	75,0000	0,6820	1,3880	1,3869	0,0793
19	75,0000	0,6890	1,3940	1,3986	0,3300
21	80,5000	0,6904	1,3929	1,3966	0,2624
22	82,0000	0,7129	1,0458	1,0481	0,2196
23	85,0000	0,7010	1,3990	1,3998	0,0602
24	85,0000	0,6980	1,3980	1,3979	0,0082
26	90,0000	0,7030	1,3940	1,3958	0,1265
27	90,0000	0,6895	1,3880	1,3865	0,1098
28	90,5000	0,7062	1,4001	1,3989	0,0879
29	91,0000	0,6980	1,3921	1,3942	0,1496
31	92,0000	0,6918	1,3893	1,3897	0,0255
32	93,0000	0,7067	1,3964	1,3967	0,0188
33	94,0000	0,7048	1,3955	1,3952	0,0225
34	94,0000	0,7038	1,3951	1,3951	0,0030
36	95,0000	0,7060	1,402	1,3958	0,4417
37	95,5000	0,7095	1,4022	1,3981	0,2939
38	97,0000	0,7088	1,3976	1,3975	0,0038
39	97,0000	0,6955	1,3913	1,3913	0,0017
41	100,0000	0,7237	1,4052	1,4145	0,6634
42	100,5000	0,716	1,404	1,4034	0,0431
43	101,0000	0,7153	1,401	1,4025	0,1091
44	102,0000	0,73	1,41	1,3988	0,7937
46	104,0000	0,7017	1,3947	1,3949	0,0142
47	105,0000	0,73	1,4098	1,4154	0,3964
48	105,0000	0,724	1,409	1,4093	0,0191
49	105,0000	0,714	1,406	1,4050	0,0716
51	106,0000	0,7242	1,4106	1,4078	0,1987
52	107,0000	0,7218	1,4045	1,4051	0,0406

suite du Tableau A.2.10

N°	Tmav(°C)	d	n	RNA	% erreur
53	108,8900	0,7097	1,3987	1,4026	0,2809
54	109,0000	0,7067	1,3973	1,3964	0,0611
56	110,0000	0,7188	1,4032	1,4059	0,1917
57	110,5000	0,7235	1,4087	1,4051	0,2549
58	112,0000	0,7398	1,4139	1,4132	0,0497
59	112,0000	0,7347	1,4113	1,4129	0,1103
61	113,0000	0,7337	1,4109	1,4107	0,0114
62	113,5000	0,7193	1,4036	1,4050	0,1018
63	114,0000	0,7163	1,4021	1,4017	0,0278
64	114,0000	0,7258	1,4069	1,4071	0,0123
66	115,0000	0,726	1,412	1,4080	0,2851
67	115,0000	0,7377	1,413	1,4142	0,0834
68	116,0000	0,7312	1,4097	1,4103	0,0396
69	116,0000	0,7437	1,4162	1,4161	0,0087
71	117,0000	0,7318	1,41	1,4115	0,1084
72	121,0000	0,7228	1,4057	1,4047	0,0729
73	124,0000	0,7427	1,4159	1,4148	0,0743
74	125,0000	0,732	1,411	1,4143	0,2317
76	125,0000	0,733	1,418	1,4148	0,2227
77	126,0000	0,7326	1,415	1,4134	0,1159
78	126,6700	0,7352	1,4121	1,4140	0,1317
79	126,6700	0,7483	1,4188	1,4171	0,1226
81	128,0000	0,7387	1,414	1,4141	0,0088
82	130,0000	0,7427	1,4161	1,4156	0,0359
83	133,0000	0,7458	1,4158	1,4187	0,2035
84	133,0000	0,7458	1,4178	1,4187	0,0622
86	135,0000	0,745	1,422	1,4180	0,2831
87	138,8900	0,7734	1,4328	1,4335	0,0479
88	140,0000	0,749	1,4193	1,4232	0,2752
89	145,0000	0,754	1,427	1,4275	0,0376
91	146,1100	0,752	1,427	1,4237	0,2280
92	147,0000	0,7513	1,421	1,4211	0,0089
93	147,0000	0,768	1,43	1,4284	0,1153
94	147,0000	0,7635	1,4275	1,4305	0,2069
95	148,0000	0,7685	1,4303	1,4285	0,1229
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
0,6836		5,3222	0,0181		

Tableau A.2.11: Comportement du RNA par rapport à la 2ème partie des données d'entrée pour l'obtention de n.

N°	T _{mav} (°C)	d	n	RNA	% erreur
1	150,5600	0,7590	1,4240	1,4294	0,3765
2	151,1100	0,7590	1,4325	1,4293	0,2258
3	152,0000	0,7700	1,4312	1,4335	0,1614
4	153,0000	0,7526	1,4272	1,4244	0,1945
6	153,0000	0,7670	1,4296	1,4325	0,2023
7	155,0000	0,7670	1,4290	1,4323	0,2302
8	155,0000	0,7640	1,4340	1,4311	0,2018
9	155,5000	0,7627	1,4274	1,4304	0,2134
11	158,0000	0,7720	1,4324	1,4336	0,0865
12	158,5000	0,7650	1,4286	1,4311	0,1748
13	158,8900	0,7711	1,4356	1,4333	0,1594
14	159,0000	0,7745	1,4338	1,4343	0,0320
16	161,1100	0,7581	1,4251	1,4267	0,1130
17	164,0000	0,8648	1,4889	1,4852	0,2512
18	165,0000	0,7690	1,4370	1,4321	0,3396
19	165,0000	0,7760	1,4347	1,4345	0,0164
21	165,0000	0,7756	1,4382	1,4344	0,2675
22	166,0000	0,7627	1,4311	1,4289	0,1572
23	175,0000	0,7790	1,4345	1,4358	0,0883
24	175,0000	0,7750	1,4400	1,4343	0,3939
26	188,8900	0,7790	1,4398	1,4385	0,0889
27	190,0000	0,7850	1,4398	1,4414	0,1118
28	196,0000	0,7856	1,4402	1,4432	0,2073
29	196,0000	0,7915	1,4434	1,4451	0,1211
31	196,1100	0,8010	1,4470	1,4476	0,0408
32	200,0000	0,7930	1,4443	1,4463	0,1363
33	200,0000	0,7880	1,4490	1,4448	0,2909
34	202,7800	0,8060	1,4500	1,4494	0,0430
36	206,6700	0,8045	1,4444	1,4494	0,3430
37	207,0000	0,796	1,4459	1,4477	0,1255
38	207,0000	0,8023	1,4494	1,4490	0,0292
39	207,2200	0,792	1,45	1,4468	0,2238
41	208,0000	0,782	1,4369	1,4432	0,4380
42	208,0000	0,8004	1,451	1,4487	0,1595
43	213,8900	0,7985	1,4473	1,4487	0,0966
44	213,8900	0,81	1,45	1,4507	0,0492
46	222,0000	0,793	1,445	1,4481	0,2130
47	223,5000	0,9553	1,5524	1,5476	0,3085
48	235,5600	0,9308	1,5321	1,5296	0,1603
49	237,5000	0,8076	1,455	1,4548	0,0141
51	244,6100	0,9501	1,5459	1,5469	0,0675
52	245,1100	0,9641	1,5569	1,5551	0,1170

suite du Tableau A.2.11

N°	T _{mav} (°C)	d	n	RNA	% erreur
53	245,7200	0,968	1,56	1,5565	0,2228
54	246,2800	0,9657	1,5581	1,5558	0,1489
56	258,5000	0,9756	1,5644	1,5590	0,3448
57	262,2200	0,9664	1,5565	1,5542	0,1459
58	262,5000	0,8232	1,463	1,4646	0,1063
59	265,0000	0,9752	1,5632	1,5579	0,3361
61	279,4400	0,8438	1,4716	1,4728	0,0799
62	286,1100	0,8578	1,4776	1,4764	0,0805
63	287,0000	0,8277	1,466	1,4627	0,2220
64	295,0000	0,8219	1,461	1,4565	0,3097
65	298,6700	0,9082	1,5016	1,5037	0,1405
	Erreur Moy	Erreur Max	Erreur Min		
	0,1727	0,3596	0,0341		

Tableau A.2.12: Comportement du RNA par rapport a la 3ème partie des données d'entrée pour l'obtention de n.

N°	T _{mav} (°C)	d	n	RNA	% erreur
1	305,0000	0,8310	1,4652	1,4633	0,1270
2	305,6700	0,8497	1,4719	1,4734	0,0994
3	306,2700	0,8912	1,4896	1,4902	0,0376
4	306,8000	0,8770	1,4838	1,4858	0,1353
6	323,6700	0,8319	1,4637	1,4649	0,0825
7	326,6700	0,9360	1,5212	1,5223	0,0699
8	327,7200	0,8756	1,4968	1,4940	0,1900
9	333,2200	0,8888	1,5044	1,5049	0,0304
11	337,0000	0,8461	1,4742	1,4721	0,1399
12	340,3500	0,8806	1,4993	1,4980	0,0898
13	340,7700	0,9036	1,5138	1,5146	0,0517
14	342,6700	0,8709	1,4842	1,4883	0,2778
16	345,0000	0,8400	1,4710	1,4713	0,0176
17	352,2500	0,9040	1,5130	1,5132	0,0138
18	354,1900	0,9092	1,5156	1,5148	0,0549
19	357,6700	0,8425	1,4694	1,4729	0,2353
21	361,6400	0,9040	1,5120	1,5126	0,0421
22	362,5400	0,8868	1,5004	1,5007	0,0226
23	364,6700	0,9671	1,5452	1,5456	0,0271
24	366,2300	0,8864	1,5002	1,4994	0,0521
26	369,1100	0,9360	1,5108	1,5131	0,1507
27	373,0300	0,8880	1,5000	1,4993	0,0488
28	374,0600	0,9214	1,5207	1,5200	0,0479
29	379,1500	0,9236	1,5218	1,5222	0,0259
31	380,6700	0,8845	1,4919	1,4944	0,1668
32	383,7800	0,9240	1,5220	1,5240	0,1315
33	384,6700	0,8600	1,4820	1,4776	0,2982
34	384,6700	0,9742	1,5492	1,5503	0,0718
36	390,8700	0,8860	1,4980	1,4949	0,2048
37	391,4700	0,8602	1,4821	1,4785	0,2433
38	392,0700	0,9030	1,5085	1,5125	0,2663
39	394,2500	0,8684	1,4862	1,4835	0,1793
41	396,2500	0,8868	1,4974	1,4958	0,1060
42	402,6200	0,8878	1,4979	1,4973	0,0399
43	404,0000	0,8620	1,4820	1,4813	0,0474
44	404,2100	0,8664	1,4770	1,4839	0,4693
46	407,7400	0,8640	1,4830	1,4830	0,0017
47	410,5200	0,8666	1,4833	1,4848	0,1030
48	411,6300	0,8690	1,4855	1,4863	0,0567
49	412,9300	0,9070	1,5142	1,5099	0,2840
51	413,6000	0,9116	1,5108	1,5104	0,0241
52	415,5900	0,8720	1,4870	1,4883	0,0855

suite du Tableau.A.2.12

N°	Tmav(°C)	d	n	RNA	% erreur
53	416,0200	0,8900	1,4980	1,4989	0,0610
54	416,8800	0,8480	1,4720	1,4750	0,2033
56	419,6900	0,8726	1,4863	1,4885	0,1461
57	422,5400	0,8920	1,4980	1,4973	0,0442
58	424,1400	0,8730	1,4865	1,4881	0,1072
59	425,6700	0,9001	1,5002	1,4968	0,2256
61	428,9800	0,8724	1,4852	1,4866	0,0973
62	433,1000	0,8744	1,4872	1,4863	0,0574
63	433,2000	0,8448	1,4694	1,4698	0,0276
64	433,5200	0,8646	1,4803	1,4812	0,0611
66	439,8100	0,8768	1,4874	1,4851	0,1551
67	440,1800	0,8738	1,4859	1,4839	0,1326
68	442,4100	0,8776	1,4878	1,4846	0,2151
69	463,6900	0,8798	1,4869	1,4832	0,2462
71	481,2400	0,9100	1,5040	1,5044	0,0261
72	485,5400	0,8860	1,4890	1,4904	0,0931
73	486,2700	0,9180	1,5090	1,5077	0,0869
74	502,7800	0,8750	1,4865	1,4913	0,3239
75	523,8900	0,9240	1,5090	1,5095	0,0331
Erreur May		Erreur Max	Erreur Min		
0,1651		0,8408	0,0164		

Tableau A.2.13: comportement du RNA par rapport à la 1ère partie des données d'entrée pour obtenir Xpa

N°	T _{mav} (°C)	d	Xpa	RNA	% erreur
1	35,0000	0,6160	100,0000	100,0000	0,0000
2	40,0000	0,6310	99,5000	98,2335	1,2729
3	45,0000	0,6340	85,7200	85,9416	0,2585
4	53,0000	0,6575	89,0000	88,4773	0,5873
6	54,5000	0,6525	92,7000	93,7592	1,1426
7	55,0000	0,6490	87,0000	86,7120	0,3310
8	55,0000	0,6470	81,6600	81,6310	0,0355
9	58,0000	0,6655	82,0000	82,2711	0,3306
11	62,0000	0,6705	84,0000	83,7193	0,3341
12	62,0000	0,6585	87,5000	88,1943	0,7934
13	63,0000	0,6670	77,5000	77,3930	0,1380
14	65,0000	0,6580	81,5000	81,1604	0,4167
16	65,0000	0,6770	90,4300	90,5024	0,0801
17	75,0000	0,6930	65,6000	65,2616	0,5159
18	75,0000	0,6820	70,6300	71,4615	1,1773
19	75,0000	0,6890	77,2600	77,6646	0,5237
21	80,5000	0,6904	71,2000	67,8316	4,7308
22	82,0000	0,7129	77,2000	76,8406	0,4655
23	85,0000	0,7010	70,5600	70,9258	0,5185
24	85,0000	0,6980	64,6500	70,6159	9,2280
26	90,0000	0,7030	68,3000	70,4213	3,1059
27	90,0000	0,6895	80,0000	79,8192	0,2260
28	90,5000	0,7062	57,9000	57,4050	0,8548
29	91,0000	0,6980	71,5000	70,4336	1,4915
31	92,0000	0,6918	78,6000	79,0709	0,5991
32	93,0000	0,7067	80,0000	72,4285	9,4644
33	94,0000	0,7048	65,0000	64,4227	0,8882
34	94,0000	0,7038	63,7000	62,6555	1,6398
36	95,0000	0,7060	59,2000	65,0447	9,8728
37	95,5000	0,7095	55,3000	54,6373	1,1984
38	97,0000	0,7088	71,0000	67,8474	4,4403
39	97,0000	0,6955	77,5000	77,7875	0,3710
41	100,0000	0,7237	56,5000	54,7756	3,0521
42	100,5000	0,7160	52,8000	62,9582	19,2389
43	101,0000	0,7153	67,0000	59,3807	11,3721
44	102,0000	0,7300	58,0000	60,3287	4,0150
46	104,0000	0,7017	76,5000	76,7717	0,3551
47	105,0000	0,7300	55,1000	55,8777	1,4114
48	105,0000	0,7240	58,3300	69,6454	19,3990
49	105,0000	0,7140	63,2700	63,9752	1,1145
51	106,0000	0,7242	88,5000	70,4933	20,3466
52	107,0000	0,7218	64,5000	65,0086	0,7885

suite du Tableau A.2.13

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{pa}	RNA	% erreur
53	108,8900	0,7097	68,5000	66,5475	2,8503
54	109,0000	0,7067	75,5000	75,5409	0,0542
56	110,0000	0,7188	60,0000	61,7344	2,8906
57	110,5000	0,7235	53,3000	59,2086	11,0856
58	112,0000	0,7398	48,0000	46,0943	3,9701
59	112,0000	0,7347	64,0000	59,8650	6,4609
61	113,0000	0,7337	63,0000	66,4250	5,4364
62	113,5000	0,7193	67,5000	66,0634	2,1283
63	114,0000	0,7163	66,0000	68,5901	3,9244
64	114,0000	0,7258	59,5000	58,1306	2,3015
66	115,0000	0,7260	61,5800	59,9667	2,6198
67	115,0000	0,7377	52,5000	55,2254	5,1913
68	116,0000	0,7312	61,5000	65,6007	6,6678
69	116,0000	0,7437	47,5000	47,9298	0,9049
71	117,0000	0,7318	68,5000	63,6905	7,0211
72	121,0000	0,7228	63,5000	63,1618	0,5326
73	124,0000	0,7427	51,9000	52,0276	0,2459
74	125,0000	0,7320	58,1000	58,1092	0,0159
76	125,0000	0,7330	53,8200	53,8109	0,0169
77	126,0000	0,7326	73,0000	72,9883	0,0160
78	126,6700	0,7352	61,9000	61,9233	0,0377
79	126,6700	0,7483	51,0000	50,9988	0,0024
81	128,0000	0,7387	68,5000	68,4202	0,1164
82	130,0000	0,7427	56,5000	56,9109	0,7273
83	133,0000	0,7458	66,4000	60,9726	8,1738
84	133,0000	0,7458	56,0000	60,9726	8,8796
86	135,0000	0,7450	50,2900	50,2939	0,0078
87	138,8900	0,7734	39,7000	39,7001	0,0003
88	140,0000	0,7490	67,9000	67,9745	0,1097
89	145,0000	0,7540	60,9700	60,9703	0,0005
91	146,1100	0,7520	65,5000	65,5006	0,0010
92	147,0000	0,7513	60,5000	60,5020	0,0033
93	147,0000	0,7680	51,0000	51,0003	0,0005
94	147,0000	0,7635	50,0000	50,0005	0,0010
95	148,0000	0,7685	42,0000	42,0005	0,0013
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
3,6579		8,1122	0,2797		

Tableau A.2.14:comportement du RNA par rapport à la 1ère partie des données d'entrée pour obtenir Xna

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{na}	RNA	% erreur
1	35,0000	0,6160	0,0000	0,0000	0,0000
2	40,0000	0,6310	0,5000	0,5001	0,0147
3	45,0000	0,6340	12,0800	12,0800	0,0002
4	53,0000	0,6575	9,0000	9,0106	0,1179
6	54,5000	0,6525	6,0000	6,0007	0,0109
7	55,0000	0,6490	13,0000	12,9998	0,0019
8	55,0000	0,6470	15,0000	15,0001	0,0007
9	58,0000	0,6655	16,0000	15,9895	0,0657
11	62,0000	0,6705	13,0000	13,0001	0,0005
12	62,0000	0,6585	11,0000	10,9992	0,0077
13	63,0000	0,6670	19,5000	19,5000	0,0000
14	65,0000	0,6580	18,5000	18,5001	0,0007
16	65,0000	0,6770	9,5700	9,5699	0,0013
17	75,0000	0,6930	32,9000	32,9000	0,0001
18	75,0000	0,6820	29,3700	29,3702	0,0007
19	75,0000	0,6890	22,7400	22,7398	0,0010
21	80,5000	0,6904	19,0000	19,0000	0,0002
22	82,0000	0,7129	18,7000	18,6958	0,0224
23	85,0000	0,7010	29,4400	30,4538	3,4436
24	85,0000	0,6980	35,3500	34,3968	2,6964
26	90,0000	0,7030	31,1000	32,5152	4,5504
27	90,0000	0,6895	15,0000	15,0923	0,6154
28	90,5000	0,7062	21,8000	22,5057	3,2372
29	91,0000	0,6980	17,0000	22,7725	33,9557
31	92,0000	0,6918	16,0000	17,3607	8,5044
32	93,0000	0,7067	15,0000	12,9081	13,9457
33	94,0000	0,7048	25,5000	22,9246	10,0997
34	94,0000	0,7038	32,8000	32,9154	0,3518
36	95,0000	0,7060	21,2600	22,9524	7,9604
37	95,5000	0,7095	18,8000	23,0367	22,5358
38	97,0000	0,7088	18,0000	23,0065	27,8139
39	97,0000	0,6955	15,5000	13,7678	11,1756
41	100,0000	0,7237	31,5000	27,3303	13,2370
42	100,5000	0,7160	18,0000	23,3795	29,8860
43	101,0000	0,7153	29,0000	23,2770	19,7346
44	102,0000	0,7300	39,0000	38,4945	1,2961
46	104,0000	0,7017	15,5000	16,3452	5,4526
47	105,0000	0,7300	39,9000	38,5415	3,4047
48	105,0000	0,7240	41,6700	42,2658	1,4299
49	105,0000	0,7140	12,2400	12,1517	0,7217
51	106,0000	0,7242	8,5000	8,8954	4,6522
52	107,0000	0,7218	28,5000	22,4815	21,1176

suite du Tableau A.2.14

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{na}	RNA	% erreur
53	108,8900	0,7097	23,0000	21,8671	4,9258
54	109,0000	0,7067	16,0000	16,1799	1,1245
56	110,0000	0,7188	35,0000	33,0189	5,6602
57	110,5000	0,7235	12,6000	13,7619	9,2210
58	112,0000	0,7398	40,0000	40,2535	0,6337
59	112,0000	0,7347	16,5000	15,8858	3,7225
61	113,0000	0,7337	22,0000	24,2982	10,4464
62	113,5000	0,7193	16,0000	12,9220	19,2372
63	114,0000	0,7163	24,0000	22,6113	5,7861
64	114,0000	0,7258	27,5000	23,9672	12,8467
66	115,0000	0,7260	19,2000	23,8744	24,3459
67	115,0000	0,7377	33,0000	33,1357	0,4112
68	116,0000	0,7312	28,0000	26,5377	5,2225
69	116,0000	0,7437	40,0000	40,6240	1,5600
71	117,0000	0,7318	19,5000	16,5316	15,2227
72	121,0000	0,7228	25,5000	22,7650	10,7256
73	124,0000	0,7427	41,7000	41,3818	0,7630
74	125,0000	0,7320	25,9000	24,3008	6,1744
76	125,0000	0,7330	23,4000	24,7245	5,6603
77	126,0000	0,7326	21,5000	24,3372	13,1962
78	126,6700	0,7352	30,6000	25,0989	17,9775
79	126,6700	0,7483	32,5000	31,8329	2,0527
81	128,0000	0,7387	19,0000	18,9686	0,1651
82	130,0000	0,7427	30,5000	30,4995	0,0016
83	133,0000	0,7458	19,6000	24,8453	26,7616
84	133,0000	0,7458	30,0000	24,8453	17,1824
86	135,0000	0,7450	36,8400	36,8395	0,0013
87	138,8900	0,7734	39,6000	39,5999	0,0003
88	140,0000	0,7490	24,2000	24,1999	0,0004
89	145,0000	0,7540	22,3700	22,3697	0,0016
91	146,1100	0,7520	17,0000	17,0027	0,0158
92	147,0000	0,7513	13,5000	13,4903	0,0716
93	147,0000	0,7680	31,0000	31,0084	0,0271
94	147,0000	0,7635	27,0000	27,0781	0,2893
95	148,0000	0,7685	39,0000	38,9144	0,2195
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
9,5504		21,4237	1,0005		

Tableau A.2.15:comportement du RNA par rapport à la 2^{ème} partie des données d'entrée pour obtenir Xpa

N°	T _{mav} (°C)	d	Xpa	RNA	% erreur
1	150,5600	0,7590	51,00	51,42	0,8235
2	151,1100	0,7590	65,00	61,91	4,7538
3	152,0000	0,7700	49,00	48,76	0,4898
4	153,0000	0,7526	63,70	67,54	6,0283
6	153,0000	0,7670	50,00	59,30	18,6000
7	155,0000	0,7670	67,80	59,02	12,9499
8	155,0000	0,7640	59,41	60,32	1,5317
9	155,5000	0,7627	65,60	61,65	6,0213
11	158,0000	0,7720	47,50	49,06	3,2842
12	158,5000	0,7650	60,00	58,80	2,0000
13	158,8900	0,7711	49,00	49,45	0,9184
14	159,0000	0,7745	40,50	48,16	18,9136
16	161,1100	0,7581	59,30	66,90	12,8162
17	164,0000	0,8648	22,00	22,28	1,2727
18	165,0000	0,7690	32,48	32,66	0,5542
19	165,0000	0,7760	45,50	46,15	1,4286
21	165,0000	0,7756	46,00	45,57	0,9348
22	166,0000	0,7627	71,80	65,45	8,8440
23	175,0000	0,7790	55,10	58,83	6,7695
24	175,0000	0,7750	25,93	23,32	10,0656
26	188,8900	0,7790	60,00	55,99	6,6833
27	190,0000	0,7850	60,00	63,19	5,3167
28	196,0000	0,7856	53,80	53,50	0,5576
29	196,0000	0,7915	43,50	38,77	10,8736
31	196,1100	0,8010	30,00	36,67	22,2333
32	200,0000	0,7930	42,50	39,41	7,2706
33	200,0000	0,7880	58,00	53,70	7,4138
34	202,7800	0,8060	29,50	32,56	10,3729
36	206,6700	0,8045	30,90	31,04	0,4531
37	207,0000	0,796	42,00	41,08	2,1905
38	207,0000	0,8023	36,50	32,26	11,6164
39	207,2200	0,792	56,30	53,46	5,0444
41	208,0000	0,782	54,00	56,16	4,0000
42	208,0000	0,8004	18,09	23,17	28,0818
43	213,8900	0,7985	42,00	43,97	4,6905
44	213,8900	0,81	26,00	28,41	9,2692
46	222,0000	0,793	51,50	48,08	6,6408
47	223,5000	0,9553	10,40	9,93	4,5192
48	235,5600	0,9308	3,00	2,93	2,3333
49	237,5000	0,8076	13,60	11,01	19,0441
51	244,6100	0,9501	5,80	5,93	2,2414
52	245,1100	0,9641	3,80	3,93	3,4211

suite du Tableau A.2.15

N°	Tmav(°C)	d	Xpa	RNA	% erreur
53	245,7200	0,968	3,00	2,93	2,3333
54	246,2800	0,9657	3,30	3,93	19,0909
56	258,5000	0,9756	3,90	3,93	0,7692
57	262,2200	0,9664	2,20	1,98	10,0000
58	262,5000	0,8232	45,31	45,31	0,0000
59	265,0000	0,9752	4,60	4,18	9,1304
61	279,4400	0,8438	38,80	40,85	5,2835
62	286,1100	0,8578	29,80	32,73	9,8322
63	287,0000	0,8277	59,81	52,23	12,6735
64	295,0000	0,8219	48,90	52,23	6,8098
65	298,6700	0,9082	34,10	32,72	4,0469
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
5,3943		47,4390	0,7025		

Tableau A.2.16:comportement du RNA par rapport à la 2ème partie des données d'entrée pour obtenir Xna

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{na}	RNA	% erreur
1	150,5600	0,7590	39,5	25,8142	34,6477
2	151,1100	0,7590	17	14,9060	12,3177
3	152,0000	0,7700	31,5	35,4304	12,4773
4	153,0000	0,7526	17,4	15,9792	8,1656
6	153,0000	0,7670	29	30,1824	4,0773
7	155,0000	0,7670	22,8	26,8893	17,9354
8	155,0000	0,7640	27,39	23,8459	12,9395
9	155,5000	0,7627	17,1	21,8367	27,6999
11	158,0000	0,7720	32	27,4254	14,2955
12	158,5000	0,7650	15	19,8919	32,6127
13	158,8900	0,7711	29,5	25,2163	14,5211
14	159,0000	0,7745	41	42,0135	2,4719
16	161,1100	0,7581	30,8	30,7956	0,0144
17	164,0000	0,8648	21	20,9945	0,0262
18	165,0000	0,7690	47,29	47,2879	0,0045
19	165,0000	0,7760	35	34,8195	0,5158
21	165,0000	0,7756	32	32,1631	0,5096
22	166,0000	0,7627	13,5	13,4999	0,0005
23	175,0000	0,7790	33,4	33,3998	0,0005
24	175,0000	0,7750	48,33	48,3299	0,0003
26	188,8900	0,7790	19	17,0922	10,0412
27	190,0000	0,7850	21	22,2238	5,8275
28	196,0000	0,7856	18,1	19,9790	10,3810
29	196,0000	0,7915	38,5	40,1108	4,1840
31	196,1100	0,8010	49,5	48,6012	1,8158
32	200,0000	0,7930	39,5	40,2654	1,9377
33	200,0000	0,7880	22,5	20,4422	9,1457
34	202,7800	0,8060	49,5	52,7796	6,6255
36	206,6700	0,8045	64,3	50,9988	20,6862
37	207,0000	0,796	40,5	40,5390	0,0962
38	207,0000	0,8023	45,5	48,4449	6,4723
39	207,2200	0,792	18,7	20,4514	9,3658
41	208,0000	0,782	26,7	26,6847	0,0574
42	208,0000	0,8004	42,71	45,7966	7,2269
43	213,8900	0,7985	41	38,7784	5,4184
44	213,8900	0,81	52,5	56,1589	6,9694
46	222,0000	0,793	26,3	26,2787	0,0812
47	223,5000	0,9553	5	4,9409	1,1828
48	235,5600	0,9308	12,3	12,3140	0,1139
49	237,5000	0,8076	15,43	15,4501	0,1306
51	244,6100	0,9501	6	6,0032	0,0542
52	245,1100	0,9641	2	2,5691	28,4542

suite du Tableau A.2.16

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{na}	RNA	% erreur
53	245,7200	0,968	4	3,5248	11,8799
54	246,2800	0,9657	3,3	3,2532	1,4179
56	258,5000	0,9756	3	3,0588	1,9589
57	262,2200	0,9664	15,1	14,9795	0,7979
58	262,5000	0,8232	5,16	5,1702	0,1977
59	265,0000	0,9752	4	4,0295	0,7386
61	279,4400	0,8438	41,5	41,4899	0,0244
62	286,1100	0,8578	45,6	45,5760	0,0526
63	287,0000	0,8277	5,58	5,6063	0,4707
64	295,0000	0,8219	26,2	26,1815	0,0707
65	298,6700	0,9082	45,9	45,9130	0,0283
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
7,9338		19,4145	0,4401		

Tableau A.2.17: comportement du RNA par rapport à la 3ème partie des données d'entrée pour obtenir Xpa

N°	T _{mav} (°C)	d	Xpa	RNA	% erreur
1	305,0000	0,8310	51,5	51,48	0,0379
2	305,6700	0,8497	58,4	58,40	0,0074
3	306,2700	0,8912	10,5	10,61	1,0742
4	306,8000	0,8770	58	57,90	0,1729
6	323,6700	0,8319	70	70,02	0,0244
7	326,6700	0,9360	30,4	30,42	0,0717
8	327,7200	0,8756	43	43,39	0,9085
9	333,2200	0,8888	57	56,16	1,4709
11	337,0000	0,8461	82,38	82,41	0,0368
12	340,3500	0,8806	43	42,31	1,5973
13	340,7700	0,9036	40	41,06	2,6480
14	342,6700	0,8709	56,5	56,60	0,1718
16	345,0000	0,8400	56,9	56,91	0,0124
17	352,2500	0,9040	43	42,49	1,1934
18	354,1900	0,9092	45	43,39	3,5878
19	357,6700	0,8425	69,4	69,37	0,0425
21	361,6400	0,9040	48	49,37	2,8627
22	362,5400	0,8868	51	51,07	0,1409
23	364,6700	0,9671	31,8	32,25	1,4122
24	366,2300	0,8864	61	59,38	2,6511
26	369,1100	0,9360	48	47,63	0,7608
27	373,0300	0,8880	55	56,96	3,5614
28	374,0600	0,9214	46	47,28	2,7866
29	379,1500	0,9236	47	47,11	0,2324
31	380,6700	0,8845	58,4	59,52	1,9243
32	383,7800	0,9240	46	45,13	1,8848
33	384,6700	0,8600	75	74,18	1,1000
34	384,6700	0,9742	32,9	32,58	0,9741
36	390,8700	0,8860	65	62,87	3,2785
37	391,4700	0,8602	75	73,68	1,7665
38	392,0700	0,9030	53	54,40	2,6407
39	394,2500	0,8684	60	71,82	19,7016
41	396,2500	0,8868	64	64,31	0,4802
42	402,6200	0,8878	66	65,34	1,0026
43	404,0000	0,8620	76	73,08	3,8477
44	404,2100	0,8664	72	72,55	0,7691
46	407,7400	0,8640	77	72,88	5,3544
47	410,5200	0,8666	76	72,70	4,3425
48	411,6300	0,8690	71	72,53	2,1573
49	412,9300	0,9070	10,2	10,21	0,0971
51	413,6000	0,9116	52	51,11	1,7114
52	415,5900	0,8720	71	72,41	1,9918

suite du Tableau A.2.17

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{pa}	RNA	% erreur
53	416,0200	0,8900	65	63,91	1,6791
54	416,8800	0,8480	74	74,83	1,1185
56	419,6900	0,8726	72	72,51	0,7096
57	422,5400	0,8920	64	64,21	0,3336
58	424,1400	0,8730	73	72,62	0,5200
59	425,6700	0,9001	59	58,76	0,4072
61	428,9800	0,8724	78	72,78	6,6985
62	433,1000	0,8744	73	72,77	0,3209
63	433,2000	0,8448	81	81,50	0,6215
64	433,5200	0,8646	70	73,38	4,8301
66	439,8100	0,8768	73	72,79	0,2868
67	440,1800	0,8738	79	77,06	2,4579
68	442,4100	0,8776	73	74,86	2,5430
69	463,6900	0,8798	78	78,46	0,5942
71	481,2400	0,9100	79	76,04	3,7497
72	485,5400	0,8860	75	77,96	3,9485
73	486,2700	0,9180	66	66,01	0,0199
74	502,7800	0,8750	78,4	78,12	0,3604
75	523,8900	0,9240	68	67,99	0,0158
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
1,8948		19,7016	0,0074		

Tableau A.2.18:comportement du RNA par rapport à la 3ème partie des données d'entrée pour obtenir Xna

N°	Tmav(°C)	d	Xna	RNA	% erreur
1	305,0000	0,8310	29,20	29,42	0,7703
2	305,6700	0,8497	31,80	31,80	0,0017
3	306,2700	0,8912	63,90	63,90	0,0000
4	306,8000	0,8770	34,00	34,00	0,0008
6	323,6700	0,8319	22,70	21,68	4,4759
7	326,6700	0,9360	43,00	43,01	0,0302
8	327,7200	0,8756	45,00	43,81	2,6552
9	333,2200	0,8888	28,00	29,43	5,1034
11	337,0000	0,8461	6,56	8,27	26,1131
12	340,3500	0,8806	43,00	44,10	2,5594
13	340,7700	0,9036	41,00	40,47	1,2979
14	342,6700	0,8709	30,70	29,48	3,9685
16	345,0000	0,8400	25,90	24,87	3,9688
17	352,2500	0,9040	39,00	36,39	6,6820
18	354,1900	0,9092	33,00	34,36	4,1340
19	357,6700	0,8425	22,40	24,38	8,8289
21	361,6400	0,9040	34,00	34,93	2,7375
22	362,5400	0,8868	36,00	37,31	3,6338
23	364,6700	0,9671	34,00	33,55	1,3220
24	366,2300	0,8864	25,00	22,83	8,6630
26	369,1100	0,9360	35,00	34,96	0,1203
27	373,0300	0,8880	32,00	33,00	3,1146
28	374,0600	0,9214	31,00	31,10	0,3251
29	379,1500	0,9236	29,00	29,08	0,2908
31	380,6700	0,8845	28,90	28,99	0,3285
32	383,7800	0,9240	31,00	30,80	0,6574
33	384,6700	0,8600	16,00	18,81	17,5636
34	384,6700	0,9742	32,20	32,65	1,4112
36	390,8700	0,8860	21,00	24,45	16,4319
37	391,4700	0,8602	17,00	19,26	13,2699
38	392,0700	0,9030	32,00	31,72	0,8685
39	394,2500	0,8684	34,00	30,10	11,4689
41	396,2500	0,8868	23,00	21,72	5,5594
42	402,6200	0,8878	21,00	20,04	4,5577
43	404,0000	0,8620	17,00	20,49	20,5116
44	404,2100	0,8664	25,00	21,40	14,3873
46	407,7400	0,8640	16,00	21,28	32,9774
47	410,5200	0,8666	17,00	22,07	29,8172
48	411,6300	0,8690	21,00	22,47	6,9917
49	412,9300	0,9070	45,50	44,73	1,6835
51	413,6000	0,9116	34,00	34,49	1,4336
52	415,5900	0,8720	20,00	22,03	10,1745

suite du Tableau A.2.18

N°	T _{mav} (°C)	d	X _{na}	RNA	% erreur
53	416,0200	0,8900	23,00	23,21	0,9317
54	416,8800	0,8480	26,00	20,42	21,4709
56	419,6900	0,8726	20,00	20,98	4,8992
57	422,5400	0,8920	25,00	24,97	0,1034
58	424,1400	0,8730	20,00	19,51	2,4445
59	425,6700	0,9001	28,00	28,31	1,1036
61	428,9800	0,8724	15,00	18,12	20,8063
62	433,1000	0,8744	19,00	16,67	12,2587
63	433,2000	0,8448	19,00	21,40	12,6495
64	433,5200	0,8646	26,00	20,22	22,2283
66	439,8100	0,8768	19,00	18,48	2,7532
67	440,1800	0,8738	15,00	15,61	4,0936
68	442,4100	0,8776	20,00	20,27	1,3549
69	463,6900	0,8798	15,00	15,00	0,0285
71	481,2400	0,9100	13,00	15,30	17,6567
72	485,5400	0,8860	20,00	17,45	12,7586
73	486,2700	0,9180	24,00	21,82	9,0978
74	502,7800	0,8750	13,30	14,51	9,0827
75	523,8900	0,9240	22,00	23,16	5,2592
Erreur Moy		Erreur Max	Erreur Min		
9,2427		32,9774	0,0000		