

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR:  
SI TRAN TO

ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES DE MESURE SANS CONTACT  
POUR UN PROCÉDÉ D'EMBALLAGE SOUS ATMOSPHERE MODIFIÉE

Octobre 2004

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## *Résumé*

La technique des réseaux de neurones artificiels (RNA) a été utilisée pour réaliser une **technique de mesure sans contacts**. Cette technique, implantée dans un microcontrôleur 8 bits PIC18F452 de Microchips Technology, permet de suivre et de contrôler l'évolution du changement de phase de l'eau sous une diminution de pression allant de 1013 à 2 mbar. Ce travail comprend plusieurs études expérimentales des capteurs et des conditions d'application réelles sous lesquelles les mesures doivent s'effectuer. Il en découle que le RNA est une méthode appropriée pour la contrainte « **sans contacts** » et pour la **non-linéarité** d'évolution des phénomènes thermodynamiques. Ainsi, l'implantation matérielle d'un **RNA multicouches 3-9-2-1** a été réalisée pour l'étalonnage des capteurs choisis pour ce projet, soient un capteur de pression piézorésistif (MPX2100AP, Motorola) et un capteur de température à résistance variable (AD22100KT, Analog Device). Ces capteurs sont utilisés pour la mesure **sans contact et en temps réel** de la variation de la pression et de la température des échantillons d'eau dont l'état physique et thermodynamique évoluent et se transforment de façon non-linéaire dans une chambre à vide. L'étalonnage du capteur de pression est effectué de façon logicielle via une relation algébrique simple et fournit une marge d'erreur inférieure à 0.5 % sur la plage de pression étudiée (1013 à 2 mbar). Quant au capteur de température, celui-ci est étalonné par le RNA; dans 96% des cas, la technique de mesure estime la température de l'eau avec une marge d'erreur inférieure à 4% pour une plage de variations de température d'eau comprise entre 5°C et 85°C. Un cycle de mesure typique est obtenu en quelques 1.125 ms, le microcontrôleur ayant une vitesse d'horloge de 40 MHz. Ces résultats sont suffisamment précis pour permettre la réalisation d'un système de contrôle pour des appareils d'emballage sous vide appliqués à l'emballage de produits à forte teneur en eau.

# *Remerciements*

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le Professeur Ahmed Chériti, qui a dirigé ce travail de recherche avec bienveillance et délicatesse; son appui constant et son enthousiasme m'ont aidé grandement à l'accomplissement de ce mémoire.

J'adresse également mes sincères remerciements au Professeur Mohamed Ben Slima, mon co-directeur de recherche, pour son attention particulière. Sa participation active et nos discussions sur les capteurs de pression et les procédures d'étalonnage m'ont été très précieuses.

Je tiens aussi à remercier mon père et ma mère pour leurs encouragements et leur support.

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| Résumé.....  | i         |
| Remerciements.....   | ii        |
| Table des matières.....  | iii       |
| Liste des figures.....   | vi        |
| Liste des tableaux.....  | viii      |
| Liste des images.....  | viii      |
| Liste des symboles et abréviations.....  | ix        |
| <br>   |           |
| <b>Chapitre 1 : Introduction générale.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Introduction.....  | 1         |
| 1.2 Mesure sans contact.....   | 2         |
| 1.3 Méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA).....   | 3         |
| 1.4 Conclusion.....  | 5         |
| <br>   |           |
| <b>Chapitre 2 : Technique de mesure sans contact.....</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1 Introduction.....  | 7         |
| 2.2 Approches théoriques et des expériences exploratoires.....                                       | 8         |
| 2.3 Paramètres et les conditions de mesure en temps réel.....  | 11        |
| 2.4 Nature des problèmes liés à la mesure des paramètres<br>thermodynamique.....                     | 13        |
| 2.4.1 Interaction entre capteurs et conditions ambiantes.....  | 15        |
| 2.4.2 Interaction entre capteurs et conditions initiales de la matière<br>mise sous vide.....        | 16        |
| 2.4.3 Interaction entre les conditions ambiantes et l'état initial de la<br>matière.....             | 16        |
| 2.5 Notre approche expérimentale au développement de la méthode de<br>mesure sans contact.....       | 17        |
| 2.6 Conclusion.....  | 18        |
| <br>   |           |
| <b>Chapitre 3 : Études expérimentales.....</b>   | <b>19</b> |
| 3.1 Introduction.....  | 19        |
| 3.2 Conditions expérimentales.....   | 20        |
| 3.2.1 Capteurs de pression et de température.....  | 23        |
| 3.2.2 Instruments de mesure.....   | 25        |
| 3.3 Cueillette des données expérimentales.....   | 29        |
| 3.4 Analyse des données expérimentales.....  | 30        |
| 3.4.1 Paramètres thermodynamiques de pression partielle de vapeur<br>et de température de l'eau..... | 31        |
| 3.4.2 Corrélation entre $P_{eau}$ et $P_{cible}$ .....   | 33        |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 3.4.3  | Corrélation entre $T_{eau}$ et $T_{cible}$ .....  | 35        |
| 3.5  | Conclusion.....   | 37        |
| <b>Chapitre 4 : Méthode des RNA pour l'établissement de <math>T_{eau}</math>.....</b>                |   | <b>39</b> |
| 4.1  | Introduction.....   | 39        |
| 4.2  | Établissement du RNA pour reconstituer $T_{eau}$ .....  | 40        |
| 4.2.1  | Conversion A/N des données expérimentales.....  | 42        |
| 4.2.2  | Normalisation des données pour l'apprentissage du<br>RNA.....   | 44        |
| 4.3  | Apprentissage du RNA pour l'établissement de $T_{eau}$ .....  | 45        |
| 4.4  | Généralisation du RNA et résultats obtenus.....   | 47        |
| 4.5  | Conclusion.....   | 51        |
| <b>Chapitre 5 : Implantation de la technique de mesure sans contact.....</b>                         |   | <b>52</b> |
| 5.1  | Introduction.....   | 52        |
| 5.2  | Choix du microcontrôleur.....   | 53        |
| 5.3  | Implantation matérielle de la technique de mesure sans contact.....   | 55        |
| 5.4  | Domaine numérique.....  | 56        |
| 5.4.1  | Choix d'une représentation numérique sur 24 bits dans la<br>notation à point fixe.....                          | 58        |
| 5.4.1.1  | Partie entière des nombres manipulés par le<br>RNA.....   | 59        |
| 5.4.1.2  | Partie décimale des nombres manipulés par le<br>RNA.....  | 60        |
| 5.4.1.3  | Configurations de 24 bits représentant un nombre<br>réel.....   | 61        |
| 5.5  | Conversion A/N et la représentation 24 bits.....  | 62        |
| 5.6  | Opérations de base.....   | 64        |
| 5.7  | Établissement des routines de calculs de combinaisons linéaires et de la<br>fonction tangente hyperbolique..... | 65        |
| 5.7.1  | Combinaisons linéaires.....   | 66        |
| 5.7.2  | Calculs de la tangente hyperbolique.....  | 66        |
| 5.8  | Schéma du circuit d'étalonnage.....   | 68        |
| 5.8.1  | Circuits de filtrage.....   | 70        |
| 5.8.2  | Circuits de conditionnement des signaux.....  | 70        |
| 5.9  | Tests et la validation de l'implantation matérielle.....  | 72        |
| 5.10   | Résultats obtenus.....  | 75        |
| 5.11   | Conclusion.....   | 80        |
| <b>Chapitre 6 : Conclusion générale.....</b>   |   | <b>82</b> |
| <b>Références.....</b>   |   | <b>84</b> |
| <b>Annexe 1 : Analyse thermodynamique du changement de phase d'un liquide<br/>mis sous vide.....</b> |   | <b>87</b> |

|   |            |
|---|------------|
| Conditions expérimentales.....  | 87         |
| Analyse thermodynamique.....  | 88         |
| <b>Annexe 2 : Simplification d'un modèle de neurone pour identification des opérations de base.....</b> | <b>92</b>  |
| <b>Annexe 3 : Multiplication 24 bits par 24 bits dans une représentation numérique choisie.....</b>     | <b>95</b>  |
| Multiplication.....   | 95         |
| Troncature.....   | 96         |
| <b>Annexe 4 : Conversion de l'erreur d'estimation du RNA en unité de température.....</b>               | <b>97</b>  |
| <b>Annexe 5 : Images des conditions expérimentales .....</b>  | <b>99</b>  |
| <b>Annexe 6 : Spécifications des capteurs de pression MPX2100AP et de température AD22100KT.....</b>    | <b>101</b> |

## *Liste des Figures*

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 2-1  | : Diagramme de phase de l'eau.....  | 9  |
| Figure 2-2  | : Diminution de pression accompagnant une diminution de température.....  | 10 |
| Figure 2-3  | : Un système thermodynamique ouvert.....  | 14 |
| Figure 2-4  | : Éléments d'interactions des systèmes thermodynamiques.....  | 15 |
| Figure 3-1  | : Emplacement des capteurs utilisés dans une application réelle.....  | 20 |
| Figure 3-2  | : Schéma simplifié des conditions expérimentales pour la cueillette des données.....  | 22 |
| Figure 3-3  | : Schéma de l'instrumentation.....  | 28 |
| Figure 3-4  | : Courbes expérimentales de changement de phase de l'eau.....   | 32 |
| Figure 3-5  | : Relation linéaire entre $v_{Pcible}$ et $P_{eau}$ .....   | 34 |
| Figure 3-6  | : corrélations entre $T_{eau}$ et $(P_{cible}, T_{cible}, T_{init})$ .....  | 37 |
| Figure 4-1  | : RNA multicouche 3-9-2-1.....  | 40 |
| Figure 4-2  | : Courbes expérimentales de changement de phase représentées dans le domaine numérique.....   | 46 |
| Figure 4-3  | : Principe utilisé pour l'apprentissage du RNA.....   | 47 |
| Figure 4-4  | : Résultats des simulations de l'étalonnage réalisé par notre modèle de RNA multicouches 3-9-2-1.....   | 48 |
| Figure 4-5  | : Erreur sur les valeurs estimées par le RNA.....   | 49 |
| Figure 5-1  | : Schéma d'implantation.....  | 55 |
| Figure 5-2  | : Modèle de neurone simplifié avec $n$ signaux d'entrée et une entrée fixe (biais).....   | 56 |
| Figure 5-3  | : Approximation de la tangente hyperbolique.....  | 68 |
| Figure 5-4  | : Schéma du circuit d'implantation du RNA 3-9-2-1.....  | 69 |
| Figure 5-5  | : Schéma bloc de l'implantation matérielle de notre technique de mesure intégrée dans nos conditions d'application.....   | 73 |
| Figure 5-6  | : Points d'acquisition des données pour la validation des résultats fournis par la technique de mesure sans contact.....  | 73 |
| Figure 5-7a | : Courbes de changement de phase de l'eau obtenues par l'étalonnage des capteurs de pression et de température ( $T_{init} = 11^{\circ}\text{C}$ et $15^{\circ}\text{C}$ )..... | 77 |
| Figure 5-7b | : Courbes de changement de phase de l'eau obtenues par l'étalonnage des capteurs de pression et de température ( $T_{init} = 29^{\circ}\text{C}$ et $33^{\circ}\text{C}$ )..... | 78 |
| Figure 5-7c | : Courbes de changement de phase de l'eau obtenues par l'étalonnage des capteurs de pression et de température ( $T_{init} = 41^{\circ}\text{C}$ et $53^{\circ}\text{C}$ )..... | 78 |



|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 5-7d | : Courbes de changement de phase de l'eau obtenues par l'étalonnage des capteurs de pression et de température ( $T_{init} = 67^{\circ}\text{C}$ et $79^{\circ}\text{C}$ )..... | 79 |
| Figure 5-8  | : Limites d'erreur d'étalonnage pour le RNA 3-9-2-1.....  | 80 |

## *Liste des Tableaux*

|         |      |   |    |
|---------|------|---|----|
| Tableau | 3-1  | : Utilisation et l'emplacement des divers capteurs.....   | 24 |
| Tableau | 3-2  | : Capteurs et instruments de mesure.....  | 27 |
| Tableau | 4-1  | : Domaines des paramètres dans la conversion A/N sur 10 bits.....   | 43 |
| Tableau | 4-2  | : Valeurs maximales numérisées de chaque groupe de paramètre.....   | 44 |
| Tableau | 4-3  | : Domaines des paramètres normalisés.....   | 44 |
| Tableau | 4-4  | : RNA multicouche 3-9-2-1 pour l'implantation.....  | 50 |
| Tableau | 5-1  | : Caractéristiques du PIC18F452.....  | 54 |
| Tableau | 5-2  | : Valeurs de $m$ pour le RNA 3-9-2-1.....   | 57 |
| Tableau | 5-3  | : Caractéristiques du RNA multicouche 3-9-2-1.....  | 57 |
| Tableau | 5-4  | : Nombre d'opération nécessaire pour 1 cycle de calculs exécuté par le RNA.....                                       | 58 |
| Tableau | 5-5  | : Nombre le plus lourd pour chaque neurone du RNA 3-9-2-1.....  | 60 |
| Tableau | 5-6  | : Configurations possibles pour une représentation 24 bits.....   | 61 |
| Tableau | 5-7  | : Opérations de base sur les nombres réels 24 bits.....   | 65 |
| Tableau | 5-8  | : Propriétés des capteurs relatives à la conception des circuits de conditionnement de signaux.....                   | 70 |
| Tableau | 5-9  | : Propriétés des ports analogues du PIC18F452 relative à la conception de circuits de conditionnement de signaux..... | 71 |
| Tableau | 5-10 | : Types de conditionnement pour les signaux bruts des capteurs.....   | 71 |
| Tableau | 5-11 | : Points d'acquisition de données de validation du RNA 3-9-2-1.....   | 74 |
| Tableau | 5-12 | : Performances de l'implantation de la technique de mesure sans contact.....  | 76 |

## *Liste des Images*

|       |      |   |     |
|-------|------|---|-----|
| Image | 5-1  | : Matériels implantés pour l'étalonnage des capteurs de pression et de température..... | 72  |
| Image | A5-1 | : Conditions expérimentales et l'installation physique des instruments.....             | 99  |
| Image | A5-2 | : Isolation thermique pour le capteur de pression $P_{ch}$ .....                        | 100 |
| Image | A5-3 | : Installation du capteur de pression $P_{eau}$ .....                                   | 100 |

## Liste des symboles et abréviations

|                       |  |
|-----------------------|--|
| A/N                   | Analogique-numérique.  |
| $coef\_norm_{24bits}$ | Une constante exprimée sur 24 bits dans une représentation numérique choisie.                      |
| LSB                   | Least significant bit.   |
| MAX_N                 | Le nombre entier le plus élevé d'un ensemble de nombres entiers.                                   |
| MSB                   | Most significant bit.  |
| N                     | Un nombre entier.  |
| $N_{10bits}$          | Un entier de 10 bits dans une représentation numérique choisie.                                    |
| $N_{24bits}$          | Un entier de 24 bits dans une représentation numérique choisie.                                    |
| $N_{A/N10bits}$       | Le résultat d'une conversion A/N sur 10 bits.  |
| $n_j^{elevé}$         | Le nombre le plus élevé que peut manipuler le neurone $j$ .  |
| $n_{rna}^{elevé}$     | Le nombre le plus élevé que peut manipuler un réseau de neurones.                                  |
| $P_{ch}$              | Une mesure de la pression globale à l'intérieur de la chambre à vide, en mbar.                     |
| $P_{cible}$           | Une mesure de la pression globale à l'intérieur de la chambre à vide, en mbar.                     |
| $P_{eau}$             | Une mesure de la pression partielle de vapeur d'eau, en mbar.                                      |
| $P_{ref}$             | Une mesure de la pression globale à l'intérieur de la chambre à vide, en mbar.                     |
| RNA                   | Réseau de neurones artificiels.  |
| $sig_{norm}$          | Une valeur d'un signal numérisé et normalisé.  |
| $T_{ch}$              | Une mesure de la température, en °C, à l'intérieur de la chambre à vide.                           |
| $T_{cible}$           | Une mesure de la température globale à l'intérieur de la chambre à vide, en °C.                    |
| $T_{comp1}$           | Une mesure de la température, en °C, prise par un thermocouple à l'intérieur de la chambre à vide. |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $T_{comp2}$           | Une mesure de la température, en °C, prise par un thermocouple à l'intérieur de la chambre à vide.                    |
| $T_{eau}$             | Une mesure de la température de l'eau, en °C.   |
| $T_{init}$            | Température initiale, en °C, d'un échantillon d'eau de 30 ml.   |
| $v_{Pcible}$          | La réponse en tension du capteur cible mesurant la pression à l'intérieur de la chambre à vide.                       |
| $v_{Pcible-num}$      | Une valeur numérisée d'une réponse du capteur cible de pression.  |
| $v_{Pcible-num-norm}$ | Une valeur numérisée d'une réponse du capteur cible de pression.  |
| $V_{ref}$             | La tension de référence.  |
| $v_T$                 | La sortie en tension du capteur de température AD22100KT.   |
| $v_{Tcible}$          | La réponse en tension du capteur cible de température mesurant la température à l'intérieur de la chambre à vide.     |
| $v_{Tcible-num}$      | Une valeur numérisée d'une réponse du capteur cible de température.   |
| $v_{Tcible-num-norm}$ | Une valeur numérisée et normalisée d'une réponse du capteur cible de température.                                     |
| $v_{Tinit}$           | Une tension constante correspondant à une température initiale donnée de l'eau.                                       |
| $v_{Teau}$            | La réponse en tension d'un capteur idéal de température de l'eau.   |
| $\tilde{v}_{Teau}$    | Une estimation de la réponse numérisée et normalisée d'un capteur idéal de température de l'eau.                      |
| $v_{Tinit}$           | Une tension constante correspondant à une température initiale donnée de l'eau.                                       |
| $v_{Tinit-num}$       | Une valeur numérisée d'un signal correspondant à une température initiale donnée d'un échantillon d'eau.              |
| $v_{Tinit-num-norm}$  | Une valeur numérisée et normalisée d'un signal correspondant à une température initiale donnée d'un échantillon d'eau |
| $v_X$                 | Un signal analogique en tension d'un paramètre $X$ .  |
| $v_{X-num}$           | Une valeur numérisée d'un signal analogique en tension d'un paramètre $X$ .   |

|                      |   |
|----------------------|---|
| $v_{X-num-norm}$     | Une valeur normalisée d'un signal numérisé d'un paramètre $X$ . |
| $\{w_{kj}\}_{j=1}^m$ | Ensemble des poids d'un neurone $k$ .                           |
| $X_{global}$         | Un paramètre physique global arbitraire.                        |
| $Y_{global}$         | Un paramètre physique global arbitraire.                        |
| $Z_{global}$         | Un paramètre physique global arbitraire.                        |
| $\varphi(\cdot)$     | Fonction d'activation d'un neurone $k$ .                        |

# Chapitre 1

## *Introduction générale*

### 1.1 Introduction

La technique d'emballage sous vide est devenue aujourd'hui une partie intégrante des nouveaux procédés de fabrication et de production. Non seulement l'emballage sous vide protège et embellie la présentation d'un produit, elle a pour rôle principal de rallonger la durée de préservation des produits sensibles à l'oxygène (matières périssables, organiques, etc.) ou des produits contenant des solvants de conservation qui sont oxydables. En effet, l'emballage sous vide est une technique de conservation qui consiste à éliminer l'oxygène, l'agent contaminant principal des produits, et à les isoler ensuite de l'air libre par une barrière physique (film d'emballage adapté).

Jusqu'à présent, les techniques de mesure utilisées dans les procédures d'emballage sous vide consistent principalement à la mesure de pression de la chambre à vide. Ces techniques sont fiables pour l'emballage de matières solides car celles-ci sont stables par rapport à la variation de pression. Mais dans le cas de matières ou de produits qui ne sont pas stables par rapport à la variation de pression, les techniques de mesures actuelles sont difficilement applicables. Nous nous intéressons à l'emballage sous vide des liquides car son application est vaste : un grand nombre de produits nouveaux contiennent de l'eau ou des solvants à la suite des transformations préalables, juste avant leur mise sous vide.

Dans ce travail, nous proposons une nouvelle technique pour observer et suivre l'état d'évolution thermodynamique du changement de phase de l'eau qui apparaît dans la mise

sous vide des produits ayant une teneur en eau. Cette technique permet l'élaboration de nouveaux procédés d'emballage sous vide. Pour être applicable hors du laboratoire, sur le champ d'application réelle, nous devons entreprendre notre étude avec le soin de rapprocher les conditions expérimentales aux conditions d'application réelles. Dans ce cas, nous devons adopter une technique de mesure particulière où des capteurs et des sondes ne peuvent être mis directement en contact avec l'objet observé, c'est-à-dire le produit à mettre sous vide. Ainsi, **une technique de mesure sans contact pour observer et suivre le phénomène thermodynamique de changement de phase de l'eau sous l'action d'une diminution de pression allant de la pression atmosphérique (1013 mbar) jusqu'au niveau du vide primaire (2 mbar) est élaborée.**

## 1.2 Mesure sans contact

Les mesures des grandeurs physiques sont souvent effectuées à l'aide de capteurs directement en contact avec le corps ou le phénomène observé. Par exemple, un capteur de température (e.g. un thermocouple) immergé dans un bassin d'eau, une sonde acoustique (e.g. un microphone capacitif) placée dans une chambre de test [Ano92], etc. Selon le cas, la technique de mesure peut être complexe puisque les signaux à traiter (l'information transmise et reçue) doivent être extraits, décodés et interprétés avec rigueur et précision de façon à ce qu'ils représentent fidèlement les grandeurs à mesurer [Kla02]. Cette technique dépend généralement de la complexité du phénomène observé et de la méthode de mesure en question.

Il existe toutefois de nombreux cas où il est difficile de mettre les capteurs ou des sondes en contact avec le corps ou le phénomène observé. Dans ce cas, la grandeur à mesurer peut être obtenue par des moyens indirects comme l'application d'une théorie ou d'autres techniques comme des procédures d'étalonnage, etc. Par comparaison avec la technique de mesure avec contacts, la technique de mesure *sans contacts* nécessite une étape d'interprétation supplémentaire : celle d'extraire une information spécifique à partir de l'acquisition d'information globale.

Dans le cas d'application de l'emballage sous vide, il est très difficile de mettre des sondes ou des capteurs en contact avec le produit à mettre sous vide car celui-ci est préalablement introduit dans un film d'emballage adapté qui sera scellé par la suite pour assurer une barrière physique avec l'environnement. D'autre part, les opérations mécaniques des procédés d'emballage sous vide sont conçues de façon à conserver le produit dans un environnement précis : celui du vide primaire<sup>1</sup>. Sous de telles contraintes d'application, une technique de mesure sans contact est appropriée.

Le projet que nous exposons dans ce travail se concentre principalement sur cette technique de mesure **sans contact** réalisée grâce à une **procédure d'étalonnage** que nous développons à l'aide de la **méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA)**.

### 1.3 Méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA)

Notre procédure d'étalonnage est une procédure de reconstitution construite de telle sorte à obtenir une estimation, à une marge d'erreur préétablie, de la pression et de la température de l'eau à partir des réponses brutes des capteurs de pression et de température de la chambre à vide. Bien qu'il existe plusieurs méthodes d'estimation telles que l'approximation polynomiale, l'algorithme de LMS, les méthodes *spline*, etc. pour le contrôle et le suivi du changement de phase de l'eau mise sous vide, nous avons opté pour la méthode des RNA car celle-ci s'avère plus adaptable aux conditions et contraintes d'applications réelles<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Les produits peuvent aussi être conservés sous une atmosphère modifiée composée d'un mélange de gaz inertes.

<sup>2</sup> Comme nous le verrons dans le chapitre 3, les caractéristiques de nos mesures nous permettent d'utiliser plusieurs techniques d'étalonnage et de reconstitution. En particulier, une technique basée sur les fonctions polynomiales telles que les fonctions spline parabolique ou cubique [Mor91] nous offre aussi une grande flexibilité. Dans ce mémoire, les RNA est une méthode de préférence adoptée par l'entreprise



Avant d'établir notre technique de mesure sans contact, nous devons d'abord construire des conditions expérimentales qui nous permettent d'étudier le phénomène de changement de phase dans des conditions précises et reproductibles. D'autre part, il est essentiel que les conditions expérimentales traduisent correctement les conditions réelles d'application afin que la technique de mesure qui en découle soit valide sur le champ d'applications réelles. Globalement, les données expérimentales obtenues montrent que les relations qui font correspondre les paramètres thermodynamiques à la réponse brute de leurs capteurs respectifs sont fortement non-linéaires<sup>3</sup>, c'est-à-dire qu'il n'y a aucune fonction algébrique simple qui fait correspondre les valeurs réelles des paramètres thermodynamiques du changement de phase de l'eau aux réponses brutes des capteurs de pression et de température de la chambre à vide. Dans notre cas, il est difficile de trouver une approche analytique assez simple pour traiter la non-linéarité du phénomène thermodynamique. Aussi, dans la perspective d'une application commerciale, il s'avère inapproprié d'utiliser une solution analytique trop complexe et lourde dans la réalisation finale des systèmes de contrôle pour des appareils à emballage sous vide.

Ainsi, nous proposons un modèle de RNA pour l'établissement de notre procédure d'étalonnage. L'implantation matérielle d'une telle procédure ajoute des défis à notre projet : pour des raisons d'ordre pratique et commercial, nous utilisons un microcontrôleur 8 bits pour les calculs et le traitement des données. Enfin, nous examinerons la façon de connecter des capteurs commerciaux de pression et de température à notre procédure d'étalonnage via un module de préparation de signaux<sup>4</sup>.

---

manufacturière d'appareils d'emballage sous-vide pour son expansion dans d'autres domaines d'applications ainsi que pour le développement de nouveaux produits .

<sup>3</sup> Nous verrons cela en détail au chapitre 3.

<sup>4</sup> Nous examinerons cela en détail au chapitre 5.

## 1.4 Conclusion

Nous proposons une technique de mesure sans contact à l'aide d'une procédure d'étalonnage utilisant la méthode des RNA pour observer et suivre l'évolution du changement de phase de l'eau due à une diminution de pression. Par rapport à plusieurs autres technique de mesure sans contact, nous trouvons que la méthode des RNA est plus avantageuse à notre application commerciale.

Premièrement, une fois développé, le RNA s'adapte à des situations variées d'une façon plus flexible. En effet, si nous utilisons des méthodes qui dépendraient fortement des matériaux (*hardware*) ou des processus analytiques complexes, il serait plus difficile d'adapter la technique aux différentes conditions d'application. Par contre, la technique proposée à l'aide des RNA est plus simple au point de vue matériel (*hardware*) et logiciel (*software*), ce qui nous offre une grande flexibilité.

Deuxièmement, nous démontrons qu'il est possible d'implanter le RNA multicouche 3-9-2-1 dans un matériel peu sophistiqué comme un microcontrôleur 8-bits PIC18F452 et qu'il est possible d'utiliser des capteurs commerciaux, le capteur de pression MPX2100AP et le capteur de température AD22100KT, ce qui est attrayant au point de vue d'applications commerciales.

Quant à son implantation matérielle, notre technique de mesure est composée de deux modules : le module de préparation de signaux qui traite des signaux provenant des capteurs commerciaux de pression et de température et le module d'étalonnage dans lequel est implanté notre modèle de RNA.

Dans le chapitre 2, nous examinons les données physiques relatives au phénomène à mesurer. Ces études servent à établir la rigueur thermodynamique pour soutenir le développement de notre technique de mesure sans contact.

Dans le chapitre 3, nous réalisons les conditions expérimentales et recueillons des données expérimentales nécessaires pour la construction du RNA multicouche qui est la partie principale dans la procédure d'étalonnage.

Dans le chapitre 4, nous réalisons le RNA 3-9-2-1 de façon synthétique à partir des données expérimentales obtenues. Nous utilisons MATLAB pour les travaux de simulations et de validation.

Dans le chapitre 5, nous effectuons l'implantation matérielle de la technique de mesure sans contact dont les circuits de mesures des paramètres physiques avec les capteurs de pression MPX2100AP et de température AD22100KT et les logiciels d'implantation du RNA 3-9-2-1 dans le microcontrôleur 8-bits PIC18F452.

# *Technique de mesure sans contact*

### 2.1 Introduction

L'emballage sous vide des liquides requiert une technique différente de celle des matières solides car le liquide subit un changement de phase lors d'une diminution de pression. Afin de mieux définir nos techniques de mesure pour ce phénomène thermodynamique dans notre contexte d'application, nous examinons la nature de ce phénomène par des approches théoriques et des expériences exploratoires. Nous examinons aussi les difficultés engendrées par l'incertitude des états initiaux des produits juste avant leur mise sous vide. De plus, nous examinons les relations de causes à effets existantes entre nos conditions réelles d'application afin de mieux établir les conditions de mesure pour suivre le changement de phase des liquides. Ces études serviront à établir la rigueur thermodynamique dans le développement de notre technique de mesure sans contact.

## 2.2 Approches théoriques et expériences exploratoires

Le liquide bout à différente pression selon sa température initiale. Dans cette situation, la procédure conventionnelle<sup>1</sup> d'emballage sous vide [Bur89] ne peut être appliquée aux liquides. D'autre part, un simple ajustement de paramètres ou une modification apportée aux techniques conventionnelles est insuffisant pour réaliser l'emballage des liquides. Une nouvelle procédure est nécessaire.

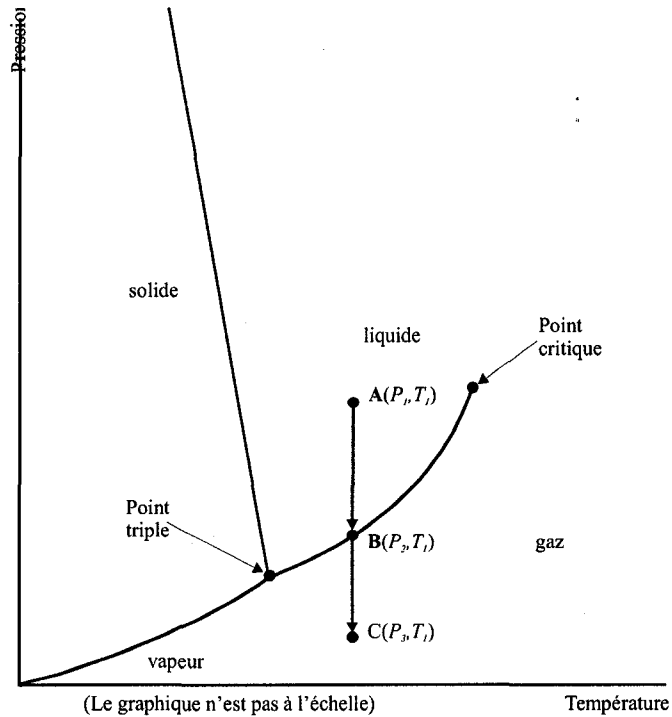
Le phénomène d'ébullition de l'eau se développe très vite dans la chambre à vide. Dans un court intervalle de temps de 10 à 20 secondes, l'ébullition peut déjà atteindre l'ampleur de petites explosions. Nous avons alors besoin d'un traitement rapide afin de pouvoir bien coordonner le processus d'emballage avec l'évolution de l'ébullition.

Dans un premier temps, nous cherchons à comprendre le phénomène d'ébullition de l'eau. Nous nous basons d'abord sur des théories classiques de la thermodynamique ainsi que sur des expériences exploratoires que nous avons effectuées.

Examinons le diagramme de phase de l'eau sur la Figure 2-1 (cf. [Sea75]). À partir de l'état initial  $A (T_1, P_1)$ , l'eau est à l'état liquide. Une diminution de pression à température constante  $T_1$  fait évoluer le liquide vers le point  $B (T_1, P_2)$ , état où l'eau commence à s'évaporer. Au-delà du point B, au point  $C (T_1, P_3)$ , l'eau est à l'état gazeux.

---

<sup>1</sup> La procédure conventionnelle d'emballage sous vide consiste à introduire le produit à emballer dans un sachet d'emballage adapté, d'y purger l'air et de le sceller [Bur89].

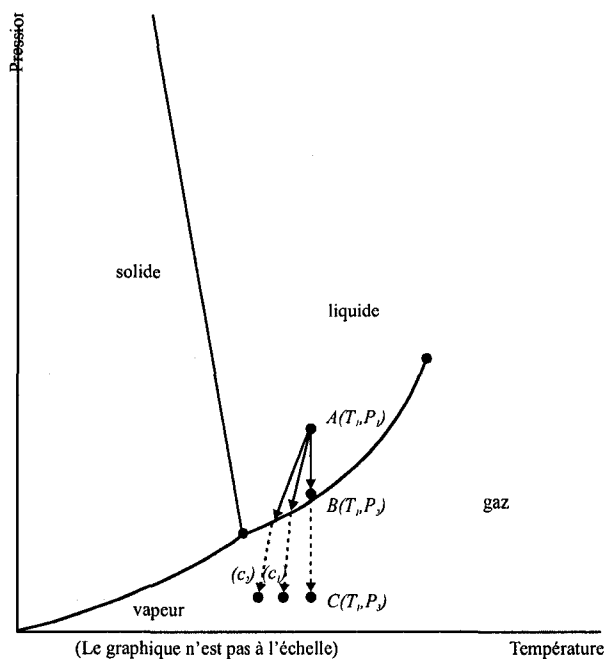


**Figure 2-1 : Diagramme de phase de l'eau.**

Une procédure d'emballage sous vide qui normalement fait passer l'eau directement du point A au point C provoque des éclaboussements violents de l'eau car le changement de phase est trop rapide. Ainsi, pour modérer la transformation de l'eau de l'état liquide en vapeur, il est nécessaire de pouvoir localiser le couple de paramètres  $(P, T)$  sur le diagramme de phase et de le garder près du point B.

À première vue, il semble que le contrôle du processus de transformation du liquide en vapeur serait assez simple si nous connaissions  $P_1$  et  $T_1$ . Étant donnée la courbe  $(P, T)$  de l'eau, le point B serait facilement localisable soit par des équations empiriques, soit par un tableau décrivant la courbe elle-même [Ben02], [Rei65], [Smi71]. Puis, en utilisant une méthode simple de contrôle, nous serions en mesure d'arrêter le cycle de pompage à temps afin de garder l'état final de l'échantillon près du point B. En d'autres termes, nous mesurerions  $P_1$  et  $T_1$  (cf. la Figure 2-1) de l'échantillon au départ, calculerions et repérerions les coordonnées du point B( $P_2$ ,  $T_1$ ), démarrerions le cycle de pompage tout en mesurant la pression  $P$ , et arrêterions enfin le cycle de pompage lorsque  $P$  approcherait suffisamment  $P_2$ .

Cependant, la réalité ne correspond pas à cette interprétation simple. Des expériences au laboratoire<sup>2</sup> nous ont démontré des situations plus compliquées. Référons-nous à la Figure 2-2, les mesures directes de  $P$  et  $T$  d'un échantillon d'eau mis sous vide se localisent sur une courbe typique ( $c_i$ ). Or, le processus de diminution de pression *n'est pas isotherme*, c'est plutôt une diminution de pression accompagnée d'une diminution de température.



**Figure 2-2 : Diminution de température accompagnée de la diminution de pression.**

Nous avons aussi observé que le phénomène dépend aussi de la masse de l'échantillon. La courbe de transformation ( $c_i$ ) se dirige plus vers la gauche pour un échantillon ayant une masse plus petite. De plus, nous avons même observé la formation de gel sur des gouttelettes d'eau lorsque l'échantillon mis sous vide est une matière spongieuse contenant une faible quantité d'eau.

<sup>2</sup> Ces expériences consistent à mesurer directement la pression et la température d'un échantillon d'eau mis sous vide, à l'aide d'un manomètre et d'un thermocouple. Les conditions expérimentales pour effectuer ces expériences sont décrites au chapitre 3.

Ainsi, en pratique, il est très difficile de prédire la courbe de transformation d'un échantillon sous vide : la connaissance de  $P_i$  et  $T_i$ , ne suffit pas pour localiser le point B. Il est donc nécessaire de mesurer simultanément  $P$  et  $T$  à chaque instant afin de pouvoir repérer l'état évolutif d'un échantillon.

Comme l'état final de l'échantillon est indéfini, une procédure de contrôle basée sur des méthodes de prédictions théoriques est difficilement réalisable. Il en découle que nous devons utiliser un **traitement en temps réel** pour contrôler le processus d'emballage.

### 2.3 Paramètres et conditions de mesure en temps réel

Selon les analyses précédentes et des expériences exploratoires, nous observons que dans le cas d'un liquide pur, le vide provoque une ébullition accompagnée d'une baisse de température du liquide. Nous avons aussi observé la formation des gouttelettes de gel lorsque le liquide se loge dans une structure spongieuse non-volatile. Enfin, cette formation de gel provient d'une baisse de température au-delà du point triple sur le diagramme de phases<sup>3</sup>.

Nous avons mentionné que la transformation de phase d'un liquide sous vide n'est pas *isotherme*; il n'y a non plus aucun transfert direct de chaleur avec l'environnement de la chambre à vide, le processus est donc *adiabatique* [Ben02], [Sea75] et [Moo83]. Comme la transformation dans l'état vapeur requiert une certaine quantité d'énergie d'évaporation, soit *la chaleur latente de vaporisation*, il en résulte que l'énergie thermique de la masse globale des matières contenues dans la chambre à vide fournit cette énergie et la température du système diminue. Or, l'évaporation s'alimente

---

<sup>3</sup> Nous nous basons sur les références [Sea75] et [Moo83] pour étudier les phénomènes thermodynamiques.



directement de l'énergie thermique de la masse du liquide dont la température se voit diminuer en premier. S'il n'y a pas assez de masse thermique et que les matières adjacentes ne peuvent pas fournir la chaleur d'une façon directe, le liquide atteint son point de congélation.

Pour la continuité de cet exposé, nous discutons en annexe l'analyse thermodynamique de ce phénomène. Les résultats de cette analyse théorique indiquent qu'une vaporisation d'environ 3.7% de la masse totale de l'eau à température ambiante (20 °C) entraîne une baisse de température de l'ordre de 20 °C. Ce résultat correspond bien à nos observations expérimentales<sup>4</sup>, c'est-à-dire 5% de réduction de masse.

Toutefois, il est possible de suivre et d'effectuer un certain contrôle de l'évolution du changement de phase d'une substance mise sous vide. Pour cela, il est nécessaire de connaître l'état thermodynamique de la matière étudiée à chaque instant. Dans notre cas, cet état est défini par les paramètres  $(P, V, T)$  - pression  $P$ , volume  $V$  et température  $T$  - selon la thermodynamique classique.

Au point de vue de contrôle, le volume est un paramètre relativement facile à mesurer et il peut être considéré constant durant le processus. Cependant, les paramètres de pression et de température sont difficilement mesurables avec précision à l'aide des moyens et des instruments commerciaux.

Premièrement, la précision des capteurs commerciaux est limitée selon des techniques de mesure utilisées qui, pour toute fin pratique, sont moins coûteuses et moins sophistiquées que celles des instruments de laboratoire. Il est très difficile d'interpréter les résultats de mesure de ces premiers si nous n'avons pas un algorithme ou une méthode d'interprétation appropriée. Prenons un exemple, une résolution de 4 mV sur une plage de variation de 4 V (soit 0.1%) semble en général excellente comme

---

<sup>4</sup> Nous avons fait des expériences qui consistent à peser un échantillon d'eau avant et après sa mise sous vide. Les conditions expérimentales pour effectuer la mise sous vide de l'eau sont décrites au chapitre 3.

performance d'un capteur de pression si nous balayons une variation de l'ordre de 1000 mbar. Cependant, ce même capteur avec la même résolution ne suffit pas lorsque nous voulons mesurer directement des pressions au voisinage de 0 mbar.

Deuxièmement, dans des conditions réelles d'application, les taux de transfert de chaleur et de masses entre la matière étudiée et son état thermodynamique sont des paramètres inconnus. D'une part, les conditions initiales des matières à mettre sous vide ne sont pas nécessairement fixes<sup>5</sup>, par exemple, la température ambiante, la pression atmosphérique ou bien, la présence de différents objets ayant des masses thermiques importantes. De plus, ces conditions varient dans le temps. Prenons par exemple la teneur d'eau contenue dans une matière. La teneur d'eau peut être influencée selon que la condition atmosphérique soit très humide et lourde ou qu'elle soit sèche et douce. D'autre part, selon la masse de la matière, la teneur d'eau ne sera pas nécessairement en équilibre thermodynamique avec celle de l'air ambiant.

#### **2.4 Nature des problèmes liés à la mesure des paramètres thermodynamiques**

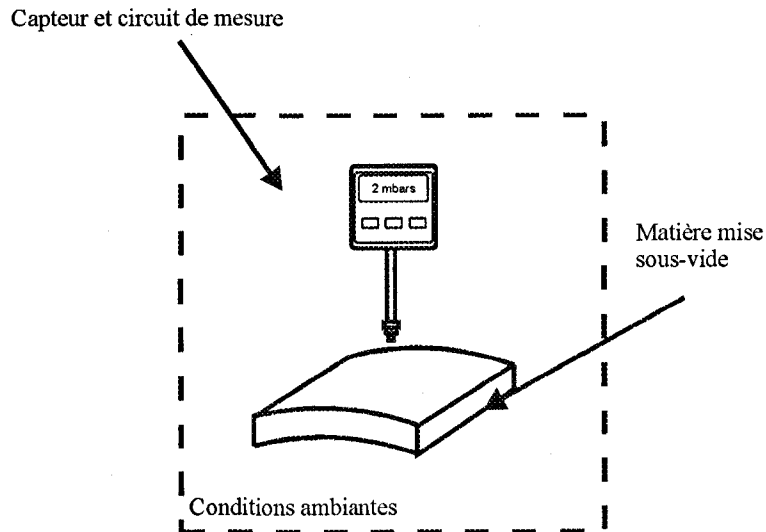
Considérons un système thermodynamique comprenant des matières à mettre sous vide et des capteurs de mesure; ce système n'est pas isolé, c'est-à-dire qu'il existe des échanges de température et de masse avec l'extérieur (cf. la Figure 2-3). Notons que les capteurs et les circuits électroniques associés font partie du système ; cela vient du fait que dans des conditions réelles d'application, nous n'avons pas nécessairement de références<sup>6</sup> pour valider les résultats de mesure. Pour ce système, mis à part les erreurs introduites par sa configuration physique, il existe plusieurs autres relations complexes de causes à effets qui peuvent fausser les mesures et leurs interprétations. Dans cette

---

<sup>5</sup> Dans les cas où les conditions initiales sont fixes, c'est-à-dire lorsque le milieu est contrôlé, le produit à mettre sous vide est généralement un matériau instable au point de vue thermodynamique (e.g. les polymères conducteurs). Alors, son comportement à basse pression est difficile à prédire [Ben02], [Cho00], [Wil01].

<sup>6</sup> Par exemple, une température ambiante ou une pression atmosphérique toujours constante.

situation, nous devons faire des analyses élaborées pour assurer la validité de nos mesures.



**Figure 2-3: Un système thermodynamique ouvert.**

De façon globale, nous avons trois types de difficultés qui sont mutuellement dépendantes. Elles sont :

1. L'exactitude des mesures des capteurs de pression et de température.
2. L'incertitude des états initiaux des matières à mettre sous vide.
3. La variabilité des conditions thermodynamiques ambiantes.

La Figure 2-4 présente un aperçu global des relations de causes à effets entre les conditions réelles d'application qui affectent le contrôle du processus et le suivi de l'évolution de phase d'une matière mise sous vide. Nous notons trois lignes d'interaction entre ces conditions. Il faut noter que dans des conditions d'applications réelles nous ne pouvons pas isoler une ligne d'interaction d'une autre comme cela a été fait dans des expériences au laboratoire. Cependant, pour bien comprendre la nature des problèmes, il est impératif d'examiner chaque ligne d'interactions séparément, du moins dans un premier temps, qualitativement.

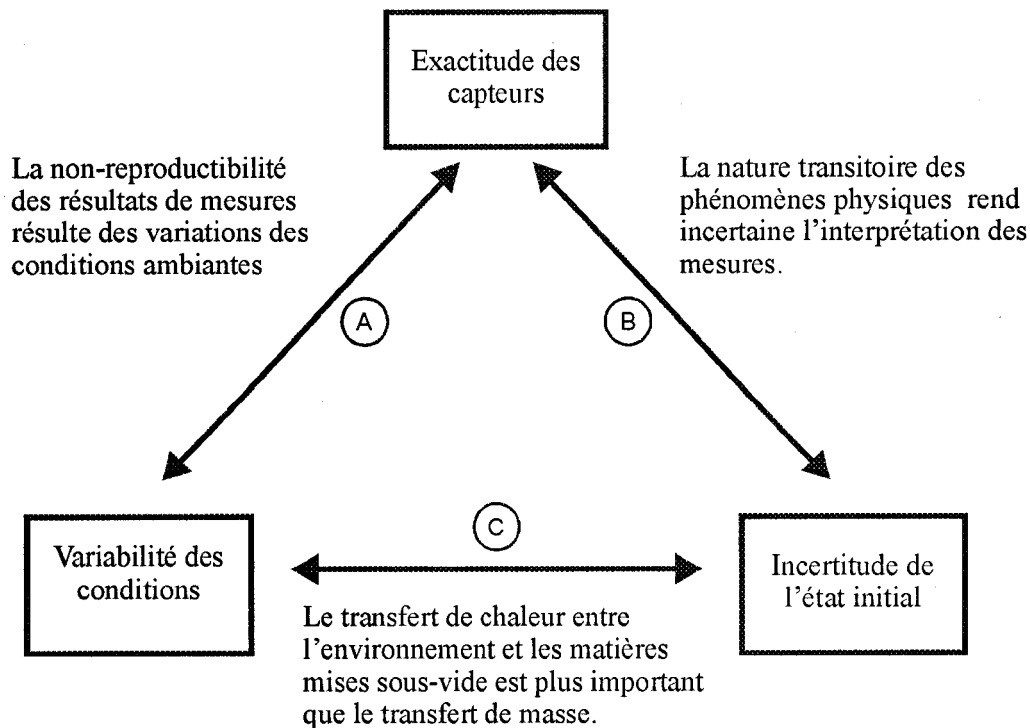


Figure 2-4: Éléments d'interactions du système thermodynamique.

#### 2.4.1 Interaction entre capteurs et conditions ambiantes (ligne d'interaction A)

L'exactitude des mesures de pression et de température des matières mises sous vide est affectée par des conditions réelles environnant l'appareil. En effet, nous avons observé des dépendances, qui sont propres à ces conditions de l'environnement, en température et en pression au niveau des capteurs et des circuits électroniques. La **non-reproductibilité** des résultats de mesures provient de cette dépendance; en d'autres termes, nous pouvons obtenir plusieurs ensembles de valeurs  $P$  et  $T$  pour un même état thermodynamique du système, tout dépendant des conditions environnementales régnant autour de l'appareil.

#### **2.4.2 Interaction entre capteurs et conditions initiales de la matière mise sous vide (ligne d'interaction B)**

Les matières à mettre sous vide proviennent généralement d'une transformation préalable<sup>7</sup>. À moins qu'il y ait une période de conditionnement, les matières elles-mêmes ne sont pas en équilibre thermodynamique à l'état initial. Alors, l'état initial étant indéterminé au moment où le processus sous vide débute, les mesures lues par les capteurs sont invalides en ce qui concerne la courbe d'évolution de phase de la matière.

En fait, ce n'est pas la précision des capteurs qui détermine l'exactitude de l'état initial de la matière. Nous rencontrons les mêmes problèmes lorsque nous utilisons des capteurs plus précis pour les mesures. C'est plutôt la **nature transitoire des phénomènes physiques** qui rend incertaine l'interprétation des mesures.

#### **2.4.3 Interaction entre les conditions ambiantes et l'état initial de la matière (ligne d'interaction C)**

Dans un environnement stable et contrôlé, les matières sont peu affectées et la stabilité de leurs états initiaux dépend du temps d'exposition dans cet environnement. Cependant, il existe plusieurs situations où les conditions ambiantes dépendent des procédés de transformation de la matière. Dans ces situations, les matières sont toujours instables au point de vue thermodynamique. Selon nos expériences, dans la majorité des cas, le **transfert de chaleur** entre l'environnement et les matières mises sous vide est plus important que le transfert de masse.

---

<sup>7</sup> Dans le secteur d'alimentation comme par exemple les plats cuisinés, les sauces, etc. dans les secteurs industriels comme par exemple des pièces plastiques ou des produits polymère et des pièces mécaniques, etc. en état transit.

Ainsi, il est impératif que nous tenons compte de ces interactions dans le développement d'une technique de mesure sans contact car la propagation des erreurs provenant de ces interactions peut être critique pour la validité de tous les processus de lectures et d'interprétation des mesures.

## **2.5 Notre approche expérimentale au développement de la méthode de mesure sans contact**

Dans notre étude, nous nous concentrons uniquement sur le cas de l'eau car celle-ci est à la base de la majorité des liquides et des solvants et elle est aussi contenue dans de nombreux produits et matériaux soumis au procédé d'emballage sous vide.

Ainsi, nous observons directement le phénomène de changement de phase d'un échantillon d'eau déposé dans une chambre à vide. Nous pouvons alors modifier les conditions initiales de l'échantillon d'eau et le soumettre à la diminution de pression allant de la pression atmosphérique jusqu'à 2 mbar.

Il est bien entendu qu'en introduisant des capteurs de pression et de température dans l'échantillon d'eau, nous pouvons observer l'évolution des paramètres physiques ( $P_{eau}$ ,  $T_{eau}$ ) décrivant le phénomène de changement de phase de l'eau. C'est le cas de mesure directe, avec contact, pour lequel des conditions expérimentales sont assez évidentes. Cependant, dans le cas de mesures sans contact, les conditions de mesures sont très différentes. Nous n'avons pas de capteurs de pression ou de température qui soient mis en contact avec l'eau; nous voulons suivre ses paramètres de pression et de température ( $P_{eau}$ ,  $T_{eau}$ ) de façon indirecte. En d'autres mots, nous devons nous baser sur d'autres paramètres physiques qui sont mesurés ailleurs et loin de l'échantillon, nous les appellerons les **paramètres globaux**, ( $X_{global}$ ,  $Y_{global}$ ,  $Z_{global}$ , ...). S'il existe une certaine relation entre ces paramètres globaux et le phénomène produit à l'endroit de

l'échantillon, nous pourrions alors déduire les paramètres désirés, c'est-à-dire  $(P_{eau}, T_{eau})$  qui décrivent le changement de phase de l'eau.

De cette manière, la mesure sans contact des paramètres  $(P_{eau}, T_{eau})$  caractérisant le changement de phase de l'eau dans une chambre à vide serait possible à l'aide des capteurs de pression et de température fixés en périphérie de la chambre à vide. Aussi, dans ce cas, la pression et la température de la chambre à vide  $(P_{cible}, T_{cible})$  mesurées par les capteurs placés en périphérie décrivent alors le comportement d'un système global, défini par tous les constituants contenus dans la chambre à vide (vapeur du produit, air résiduel, gaz provenant du dégazage des matériaux qui se trouvent immédiatement dans la chambre à vide etc.). Il est évident que ces paramètres globaux reflètent aussi les propriétés thermodynamiques de l'échantillon d'eau, faisant partie du système thermodynamique global. Alors, nous projetons l'existence d'une méthode de déduction des paramètres  $(P_{eau}, T_{eau})$  à partir des mesures de  $(P_{cible}, T_{cible})$ .

## 2.6 Conclusion

Le changement de phase de l'eau mis sous vide est un phénomène thermodynamique complexe qui semble difficile à décrire par des formulations simples. L'étude de ce phénomène repose sur les mesures des paramètres thermodynamiques  $(P_{eau}, T_{eau})$  obtenues à l'aide de capteurs. Dans le développement d'une technique de mesure sans contact, nous proposons de déduire ces paramètres à partir des mesures des capteurs de pression globale et de température globale,  $P_{cible}$  et  $T_{cible}$  du système à vide. De cette manière, les caractéristiques thermodynamiques de l'échantillon d'eau seront extraites des données englobant toutes les propriétés du système à vide en entier. De plus, pour assurer la validité et la fiabilité de cette technique de mesure sans contact, il est important d'identifier les sources d'erreurs provenant non seulement de l'incertitude des capteurs, des appareils et des instruments de mesure mais aussi des interactions entre tous les éléments du système thermodynamique sous observation.

# *Études expérimentales*

### 3.1 Introduction

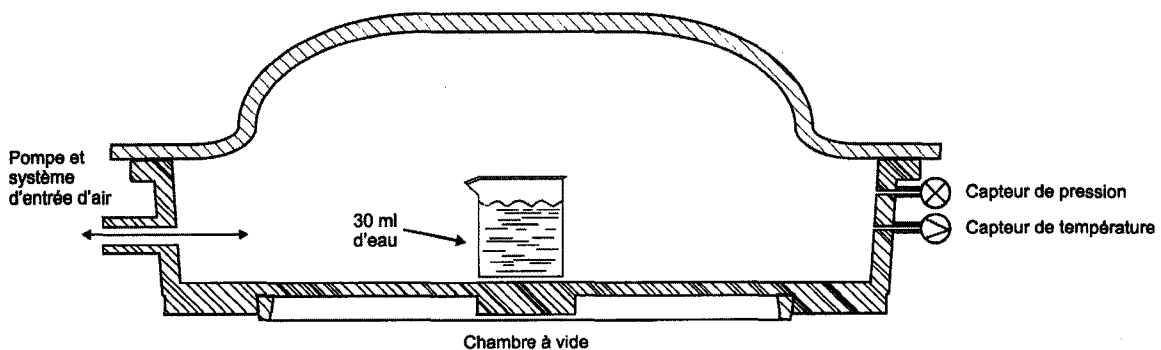
La technique de mesure sans contact que nous voulons réaliser pour suivre le changement de phase de l'eau est en premier lieu une méthode de mesure indirecte. Alors, il est essentiel que les mesures globales soient **valides**, c'est-à-dire qu'elles correspondent bien aux grandeurs à mesurer lesquelles s'obtiennent par une transformation et un traitement des données brutes. Avant de développer une telle technique, il est utile d'effectuer des études expérimentales qui nous fourniront les **données exactes** du processus de changement de phase de l'eau lors d'une diminution de pression.

Dans ce chapitre, nous examinons les conditions expérimentales qui permettent d'obtenir des mesures reflétant les conditions réelles d'application. Ces conditions expérimentales nous permettent non seulement d'observer le phénomène de changement de phase de l'eau d'une manière exacte mais aussi d'obtenir les **mesures globales** qui sont les seules mesures disponibles dans l'application réelle; ces dernières serviront de **données entrantes** pour une technique d'étalonnage permettant le suivi de changement de phase de l'eau dans des applications commerciales.



Notre méthodologie<sup>1</sup> consiste donc à examiner les différentes corrélations existantes entre les mesures des capteurs et les paramètres thermodynamiques et d'élaborer une procédure d'étalonnage en se basant sur ces corrélations.

### 3.2 Conditions expérimentales



**Figure 3-1 : Emplacement des capteurs utilisés dans une application réelle.**

La Figure 3-1 présente le schéma d'une chambre à vide typique d'un appareil d'emballage sous vide. Dans l'application réelle de notre technique de mesure sans contact, nous proposons d'installer des capteurs commerciaux de pression et de température sur la périphérie de la chambre à vide (cf. la Figure 3-1). Les mesures fournies par ces capteurs seront les seules mesures disponibles dans l'application réelle et commerciale. Notre objectif est de pouvoir interpréter le changement de phase de

---

<sup>1</sup> Notre méthodologie est basée selon les éléments d'interactions du système thermodynamique que nous avons examinés au chapitre 2. En outre, cette méthodologie est inspirée de celle de Reynolds *et al.* [Rey00] qui ont fait l'étalonnage d'un capteur commercial de pression pour des mesures de basses pressions.

l'échantillon d'eau déposé au centre de la chambre à vide (cf. la Figure 3-1) à partir des mesures fournies par ces capteurs.

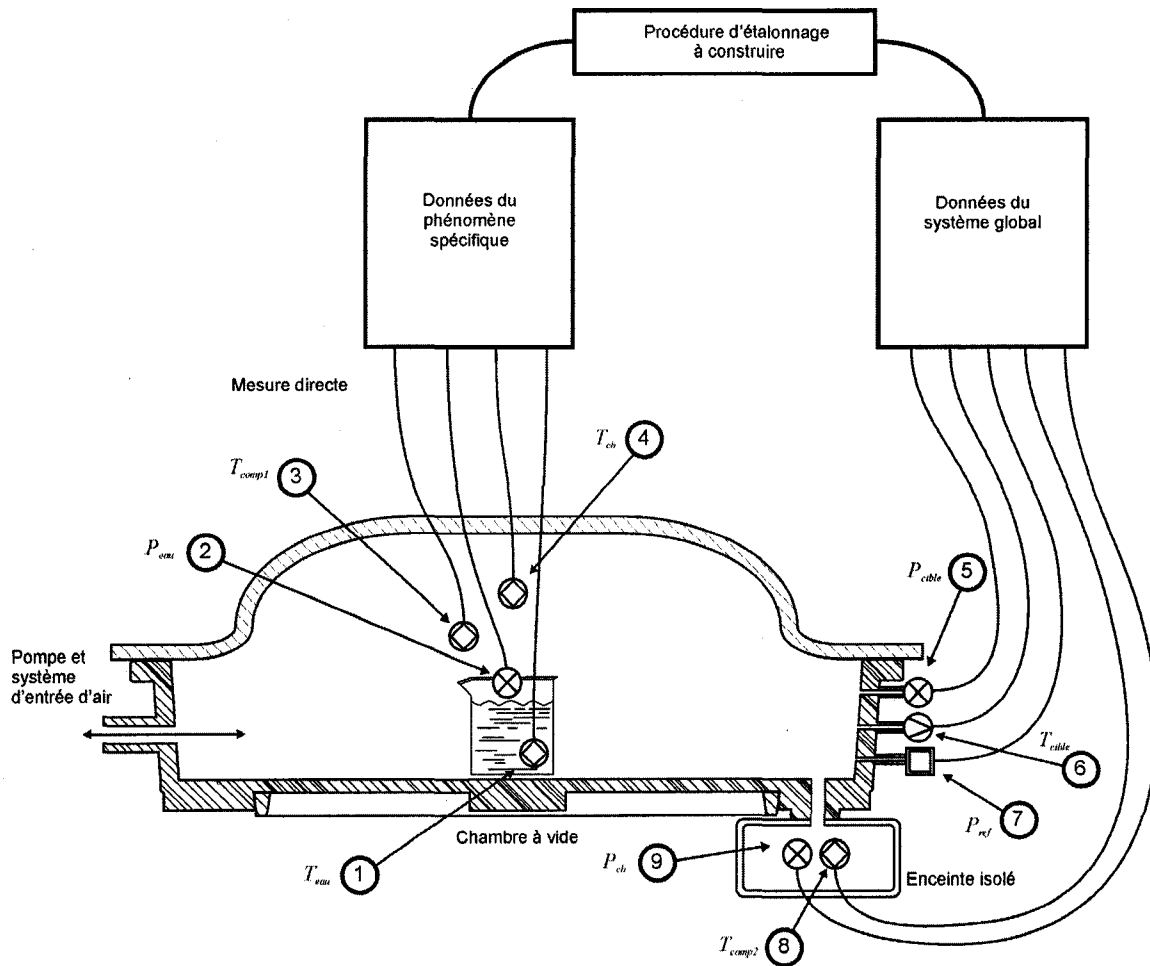
Pour atteindre cet objectif, nous devons effectuer des études et des analyses des corrélations entre les mesures obtenues à partir de ces capteurs et les paramètres thermodynamiques caractérisant le changement de phase des échantillons d'eau mis sous vide. Pour ces études et analyses, nous devons obtenir des mesures additionnelles, soient la pression partielle de vapeur et la température d'eau ainsi que la pression et la température de la chambre à vide.

Alors, nos conditions expérimentales deviennent plus élaborées. Elles sont présentées sur la Figure 3-2.

Pour refléter fidèlement les applications réelles, la chambre à vide ainsi que le système de pompage mécanique et le circuit de pompage utilisé dans les appareils à emballage sous vide commercial font partie de nos conditions expérimentales<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> La chambre à vide, construite en acier inoxydable de grade 304, a un volume de 21 litres et présente un taux de fuite de  $1.2 \times 10^4$  mol/s (ou  $3 \text{ mbar} \times 1 \text{ xs}^{-1}$ ). Le couvercle en acrylique est moulé dans une forme de dôme particulière qui lui permet de supporter une pression de force totale de 3700g kg. La pompe utilisée est une pompe mécanique de type ailette possédant une vitesse de pompage de  $21 \text{ m}^3/\text{h}$  et pouvant atteindre 2 mbar.



**Figure 3-2: Schéma simplifié des conditions expérimentales pour la cueillette des données.**

Ces conditions expérimentales nous fournissent 3 groupes de mesure :

1. Des mesures des paramètres thermodynamiques de l'échantillon d'eau qui nous permettront de vérifier le phénomène de changement de phase de l'eau d'une manière précise selon les lois thermodynamiques.
2. Des mesures qui serviront à l'établissement d'un modèle de RNA pour la construction d'une procédure d'étalonnage.

3. Des mesures de référence et de vérification qui seront utilisées pour assurer le monitoring du déroulement des expériences et qui serviront de références pour l'ensemble des données expérimentales.

### **3.2.1 Capteurs de pression et de température**

Pour obtenir ces mesures, plusieurs capteurs de températures et de pression sont installés selon la Figure 3-2. Le Tableau 3-1 résume l'utilisation et l'emplacement des divers capteurs.

Premièrement, comme nous l'illustrons sur la Figure 3-2, pour étudier le phénomène de changement de phase d'un échantillon d'eau, nous devons mettre des capteurs en contact direct avec l'échantillon pour prélever des mesures spécifiques de pression partielle de vapeur et de température de l'échantillon d'eau, noté ( $P_{eau}$ ,  $T_{eau}$ ). Ces mesures sont prélevées à l'aide d'un thermocouple et d'un capteur de pression aux points (1) et (2) sur la Figure 3-2.

La réponse du capteur de pression  $P_{eau}$  peut être affectée par une forte et brusque variation de température de son environnement immédiat. Pour s'assurer de la validité des mesures de pression, un thermocouple  $T_{comp1}$  au point (3) sur la Figure 3-2 mesure la température autour de ce dernier capteur de pression afin de permettre une compensation logicielle<sup>3</sup> en temps réel, si nécessaire.

---

<sup>3</sup> Dans ce cas, la compensation logicielle est réalisée à l'aide du système d'acquisition de données auquel sont branchés tous les capteurs. Le système acquiert une donnée brute  $x$  qui peut être corrigée par une nouvelle valeur  $y = mx + b$  où les constantes  $m$  et  $b$  peuvent être ajustées manuellement selon la température ambiante et la pression atmosphérique de la journée.

**Tableau 3-1 : Utilisation et l'emplacement des divers capteurs.**

| Capteur et emplacement ( )                                   | Utilisation   |
|--|---|
| <u>Groupe 1</u> : paramètres thermodynamiques                |   |
| • Capteur de pression $P_{eau}$                              | (1) pour l'étude thermodynamique                                      |
| • Capteur de température $T_{eau}$                           | (2) pour l'étude thermodynamique                                      |
| <u>Groupe 2</u> : paramètres pour construire RNA             |   |
| • Capteur de pression $P_{cible}$                            | (5) paramètre global  |
| • Thermocouple $T_{cible}$                                   | (6) paramètre global  |
| <u>Groupe 4</u> : paramètres de référence et de vérification |   |
| • Thermocouple $T_{comp1}$                                   | (3) pour la compensation des mesures du capteur de pression $P_{eau}$ |
| • Capteur de pression $P_{ch}$                               | (9) pour la validation des mesures du capteur de pression $P_{cible}$ |
| • Thermocouple $T_{comp2}$                                   | (8) pour la compensation des mesures du capteur de pression $P_{ch}$  |
| • Thermocouple $T_{ch}$                                      | (4) pour la validation du thermocouple $T_{cible}$                    |
| • Manomètre numérique $P_{ref}$                              | (7) pour référence des lectures de pression $P_{ch}$ et $P_{cible}$   |

Deuxièmement, dans l'application réelle et commerciale, les seules mesures disponibles seront obtenues par des capteurs commerciaux de pression et de température fixés à la périphérie de la chambre à vide, aux points (5) et (6) sur la Figure 3-2. Pour que ces mesures nous permettent d'interpréter le changement de phase de l'eau, nous allons étalonner ces capteurs de pression  $P_{cible}$  et de température  $T_{cible}$ .

Afin de s'assurer de la validité des mesures des capteurs cibles. Nous prélevons aussi les mesures de pression et de température de la chambre à vide à l'aide du capteur de pression  $P_{ch}$  et du thermocouple  $T_{ch}$ . Ces capteurs sont situés près des capteurs cibles aux points (4) et (9) sur la Figure 3-2. En principe, les mesures de pression  $P_{cible}$  et de température  $T_{cible}$  doivent correspondre aux mesures de pression  $P_{ch}$  et de température  $T_{ch}$ .

Pour assurer la validité des mesures du capteur de pression  $P_{ch}$ , celui-ci est isolé thermiquement par rapport à son environnement immédiat; de plus, la température du lieu immédiat où est localisé ce capteur est continuellement mesurée à l'aide du thermocouple  $T_{comp2}$ , au point (8) sur la Figure 3-2 afin de permettre une compensation logicielle en temps réel, si nécessaire. Enfin, un manomètre  $P_{ref}$  situé à la proximité, location (7), des capteurs de pression  $P_{cible}$  et  $P_{ch}$  apporte une vérification supplémentaire à la validité des mesures fournies par les capteurs.

En résumé, ces conditions expérimentales nous permettent non seulement d'obtenir les données pour le développement d'un RNA mais aussi d'obtenir des moyens précis pour traiter des erreurs fortuites et systématiques provenant des diverses sources (cf. la section 2.4).

### **3.2.2 Instruments de mesure**

La technique de mesure sans contact à développer nécessite des mesures en temps réel. Pour cela, les conditions expérimentales décrites précédemment sont réalisées de telle sorte qu'il soit possible d'enregistrer simultanément 6 mesures différentes. La Figure 3-3 complète le schéma de l'instrumentation de nos conditions expérimentales. En voici les détails :

Les capteurs cibles utilisés sont des capteurs commerciaux de pression MPX2100AP de Motorola et de température AD22100KT de Analog Device. Ils ont été choisis pour leur accessibilité et leur faible coût. Les capteurs cibles de pression  $P_{cible}$  et de température  $T_{cible}$  sont préparés pour nos conditions expérimentales à l'aide d'un circuit d'instrumentation (cf. la Figure 3-3). Ils sont branchés au système d'acquisition de données pour l'enregistrement de leurs mesures brutes.

Les autres capteurs de pression utilisés sont aussi des capteurs commerciaux MPX2100AP qui sont branchés à des circuits d'instrumentation et au système d'acquisition de données (cf. la Figure 3-3). Ces capteurs sont réglés avec précision. Grâce au système d'acquisition de données, les mesures brutes des capteurs de pression sont compensées en temps réel de façon logicielle si cela est nécessaire. De plus, les lectures de ces pressions sont vérifiées à l'aide d'un manomètre numérique qui est relié à la chambre à vide (cf. la Figure 3-2).

Les mesures de température sont obtenues à l'aide des thermocouples de type J (Fer/Constantan<sup>4</sup>) qui sont branchés directement au système d'acquisition de données.

Le Tableau 3-2 résume l'ensemble des capteurs et des instruments de mesure utilisés et les Images A5-1, A5-2 et A5-3 (cf. l'annexe 5) montrent l'installation physique des conditions expérimentales ainsi que les moyens utilisés pour minimiser les interactions néfastes pouvant introduire des erreurs de lecture des capteurs de pression.

---

<sup>4</sup> Le constantan est un alliage de cuivre avec 43% de nickel.

**Tableau 3-2: Capteurs et instruments de mesure dans nos conditions  
expérimentales.**

| <b>Description</b>  | <b>Spécification</b>                                    | <b>Précision</b>                            |
|---|---|---|
| <b>Capteurs à étalonner</b>   |   |   |
| Capteur de pression $P_{cible}$   | MPX2100AP<br>(Motorola)<br>AD22100KT<br>(Analog Device) | < $\pm 10$ mbar à obtenir                   |
| Capteur de température $T_{cible}$  |   | < $\pm 5$ °C à obtenir                      |
| <b>Capteurs laboratoires</b>  |   |   |
| Capteur de pression $P_{ch}$<br>Capteur de pression $P_{eau}$   | MPX2100AP<br>(Motorola)                                 | $\pm 0.5$ mbar                              |
| Thermocouple $T_{eau}$<br>Thermocouple $T_{ch}$<br>Thermocouple $T_{ref3}$<br>Thermocouple $T_{ref4}$ | Thermocouple de<br>type J                               | $\pm 1.5$ °C                                |
| <b>Instruments de mesure</b>  |   |   |
| Manomètre numérique $P_{ref}$   | Psi-Tronix  | 0.25% sur 2 à 1013 mbar                     |
| Système d'acquisition de données  | Agilent 39740A  | 20 canaux avec<br>convertisseurs de 22 bits |



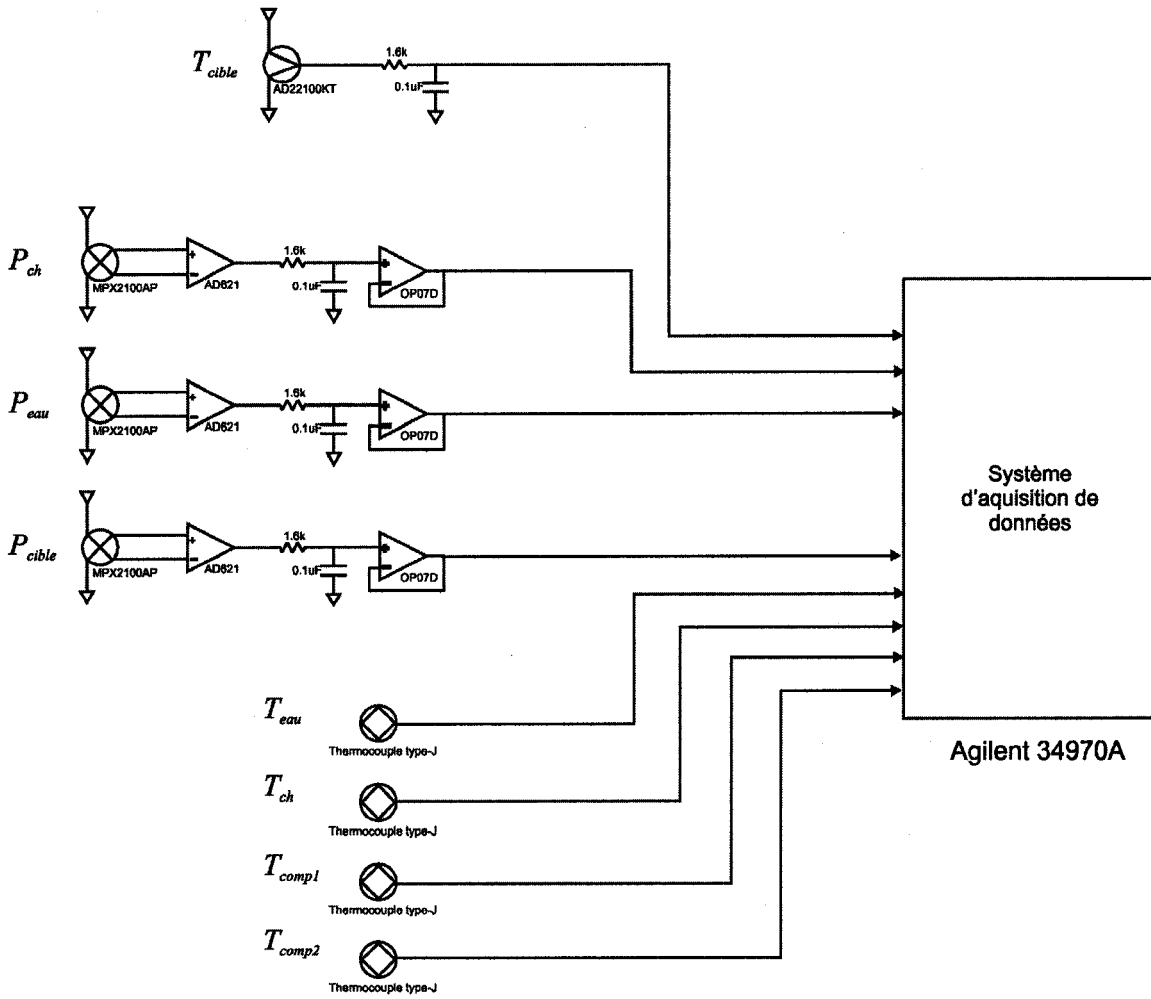


Figure 3-3: Schéma de l'instrumentation.

### 3.3 Cueillette des données expérimentales

Nous avons recueilli des données expérimentales relatives à l'évolution de plusieurs échantillons d'eau mis sous vide. Ces derniers ont des températures initiales comprise entre 5 et 85°C.

Les mesures fournies par les capteurs sont enregistrées par le système d'acquisition de données. Ce sont des données relatives à la pression partielle de vapeur et à la température des échantillons d'eau ainsi que la pression et la température à l'intérieur de la chambre à vide.

Nous avons classé nos données expérimentales en 3 groupes (cf. la section 3.2) :

1. Les paramètres thermodynamiques : ce sont la pression partielle de vapeur d'eau  $P_{eau}$  et sa température  $T_{eau}$ . Ces données sont obtenues à l'aide des mesures du capteur de pression et du thermocouple mis directement en contact avec l'échantillon d'eau.
2. Les paramètres pour l'établissement du RNA peuvent être subdivisés en 2 sous-groupes :
  - a. Les paramètres globaux de pression : ce sont les mesures du capteur de pression  $P_{cible}$  et les mesures du capteur de pression  $P_{ch}$  mesurant la pression à l'intérieur de la chambre à vide.
  - b. Les paramètres globaux de température : ce sont les mesures du capteur de température  $T_{cible}$  et les mesure des thermocouples  $T_{ch}$  mesurant la température à l'intérieur de la chambre à vide.
3. Les paramètres de référence : ce sont des mesures d'un manomètre numérique relié à la chambre à vide et du thermocouple  $T_{ch}$ . Les instruments fournissant ces

mesures ont été préalablement calibrés par des laboratoires de calibration (ref. Cole-Parmer et Agilent).

Les paramètres  $P_{cible}$ ,  $P_{eau}$ ,  $P_{ch}$ ,  $T_{cible}$ ,  $T_{eau}$  et  $T_{ch}$  sont enregistrés simultanément par le système d'acquisition de données sur toute la durée des expériences de mise sous vide d'un échantillon d'eau de 30 ml stabilisé à une température initiale donnée  $T_{init}$  comprise entre 5 et 85°C.

Le cycle de changement de phase de l'eau mise sous vide dure 45 secondes. Durant ce cycle, chaque paramètre est enregistré par intervalle de 70 ms. Ainsi, plus de 600 lectures sont acquises pour chaque paramètre; et cela pour une seule valeur de température initiale  $T_{init}$  de l'échantillon d'eau. Les données ont été acquises pour 8 valeurs différentes de  $T_{init}$ , soient 11, 15, 29, 33, 41, 53, 67 et 79°C<sup>5</sup>.

### 3.4 Analyse des données expérimentales

Comme nous avons recueilli un grand nombre de données expérimentales, nous devons les examiner en plusieurs étapes.

En premier lieu, nous devons assurer la validité de toutes les valeurs mesurées en les comparant avec des mesures de références et de vérification.

En deuxième lieu, nous devons examiner la concordance des lois thermodynamiques du changement de phase de l'eau<sup>6</sup> avec le 1<sup>er</sup> groupe de données expérimentales, soient

---

<sup>5</sup> Cette plage de température est choisie selon les diverses applications d'emballage sous vide à teneur en eau que l'on retrouve par exemple dans le secteur industriel comme l'emballage de polymères conducteurs ou par exemple dans le secteur d'alimentation comme l'emballage de plats cuisinés, d'aliments à faible acide, etc. [Bur89].

<sup>6</sup> Ces lois de thermodynamiques classiques se retrouvent dans [Ben02], [Sea75] et [Smi71].

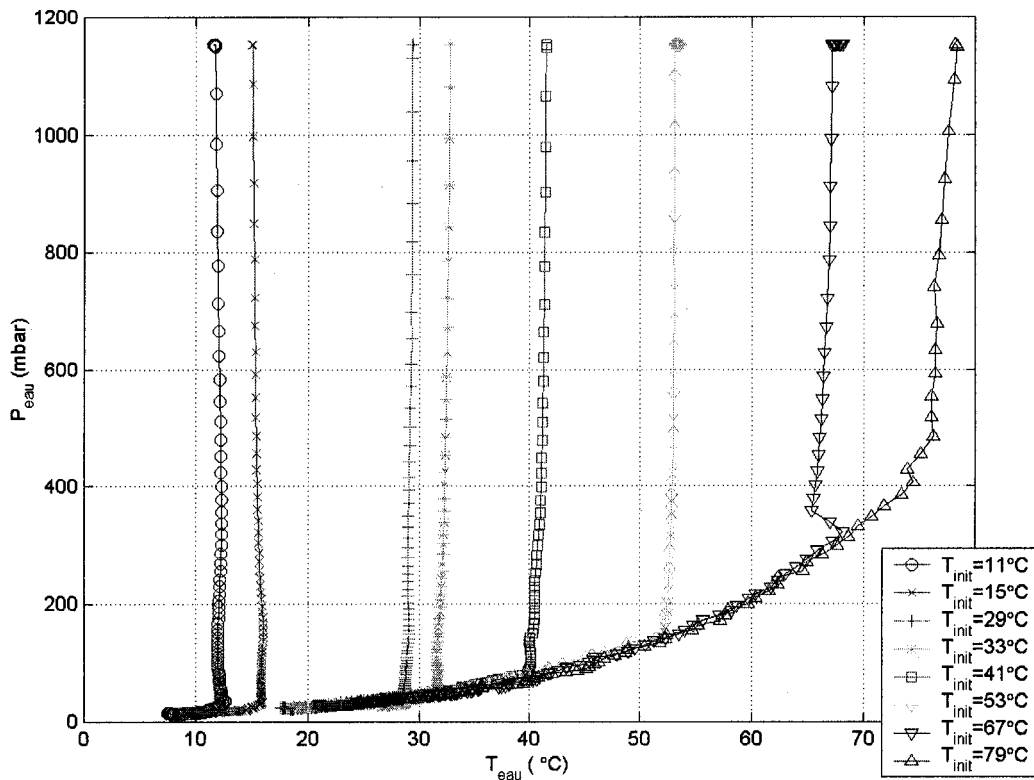
les paramètres thermodynamiques de pression partielle de vapeur et température d'eau ( $P_{eau}$ ,  $T_{eau}$ ).

En troisième lieu, nous étudions diverses correspondances possibles entre les deux paramètres thermodynamique ( $P_{eau}$  et  $T_{eau}$ ) avec les autres paramètres globaux du système sous vide soient,  $P_{cible}$ ,  $P_{ch}$ ,  $T_{cible}$ ,  $T_{ch}$  et  $T_{init}$ .

### **3.4.1 Paramètres thermodynamiques de pression partielle de vapeur et de température de l'eau**

Les données expérimentales thermodynamiques des échantillons d'eau mis sous vide sont présentées à la Figure 3-4.

Selon nos conditions expérimentales, nous devrions présenter la variation de la température de l'échantillon d'eau  $T_{eau}$  en fonction de la pression partielle de vapeur, cependant pour pouvoir comparer avec la théorie thermodynamique, la pression partielle de vapeur est reportée en ordonnée sur la Figure 3-4 et la température est en abscisse.



**Figure 3-4: Courbes expérimentales de changement de phase de l'eau.**

Sur cette figure, nous présentons l'évolution du phénomène physique des échantillons d'eau ayant 8 températures initiales différentes. Les 8 courbes présentant la variation du couple des paramètres  $(P_{eau}, T_{eau})$  sont semblables. Nous distinguons deux stades d'évolution du couple  $(P_{eau}, T_{eau})$  sur chaque courbe:

1. Au début de la mise sous vide, une grande diminution de pression  $\Delta P$  entraîne une faible diminution de température  $\Delta T$ ; c'est-à-dire  $\Delta P/\Delta T \gg \varepsilon$ , où  $\varepsilon$  est un nombre très petit.
2. À partir d'un point donné sur la courbe, soit le point de discontinuité, une faible diminution de pression  $\Delta P$  entraîne une grande diminution de température  $\Delta T$ ; c'est-à-dire  $\Delta P/\Delta T \ll \varepsilon$ , où  $\varepsilon$  est un nombre très petit.

Nous voyons que les premières parties des courbes sont presque verticales. Les deuxièmes parties des courbes possèdent une même allure générale. Cela correspond à la théorie thermodynamique classique [Ben02], [Rei65] et [Sea75]. Au point de vue d'observation expérimentale, l'ébullition de l'eau se manifeste lorsque la pression et la température arrivent au point de discontinuité de la courbe. La deuxième partie des courbes constitue la courbe de saturation de pression de vapeur d'eau. Nos valeurs expérimentales de saturation correspondent bien aux données compilées dans des tables de références [Smi71]. Par exemple, le point (41°C, 75 mbar)<sup>7</sup> sur la Figure 3-4 correspond aux valeurs des tables (41°C, 77.80 mbar).

Ces résultats démontrent la validité des paramètres thermodynamiques. Maintenant, il est important d'examiner l'utilité des paramètres globaux par rapport au phénomène thermodynamique. Pour cela, nous devons étudier les questions relatives à l'existence et à la nature des corrélations entre les paramètres globaux et les paramètres thermodynamiques.

Nous proposons d'examiner ces questions pour chacun des paramètres  $P_{eau}$  et  $T_{eau}$ .

### **3.4.2 Corrélation entre $P_{eau}$ et $P_{cible}$**

Dans nos conditions expérimentales, la pression lue par le capteur cible est traduite en tension et nous utilisons directement ces valeurs en tension  $v_{P_{cible}}$  pour simplifier les traitements conséquents.

---

<sup>7</sup> Les coordonnées de ce point sont établies à l'aide des données enregistrées par le système d'acquisition de mesure. Ces données expérimentales sont reportées sur la Figure 3-4.

La Figure 3-5 démontre non seulement l'existence d'une corrélation mais aussi d'une relation linéaire entre  $v_{Pcible}$  et  $P_{eau}$ . À l'aide de la méthode des moindres carrés, nous pouvons établir la relation entre  $v_{Pcible}$  et  $P_{eau}$ :

$$P_{eau} = av_{Pcible} + b \quad (3.1)$$

où  $a = 664.4074 \text{ mbar/V}$ .

$b = -16.4364 \text{ mbar}$ .

De plus, nous avons observé que l'équation (3.1) est valide pour toutes les valeurs de  $T_{eau}$  et de  $T_{init}$ .

Examinons maintenant s'il existe des corrélations entre les paramètres globaux et  $T_{eau}$ .

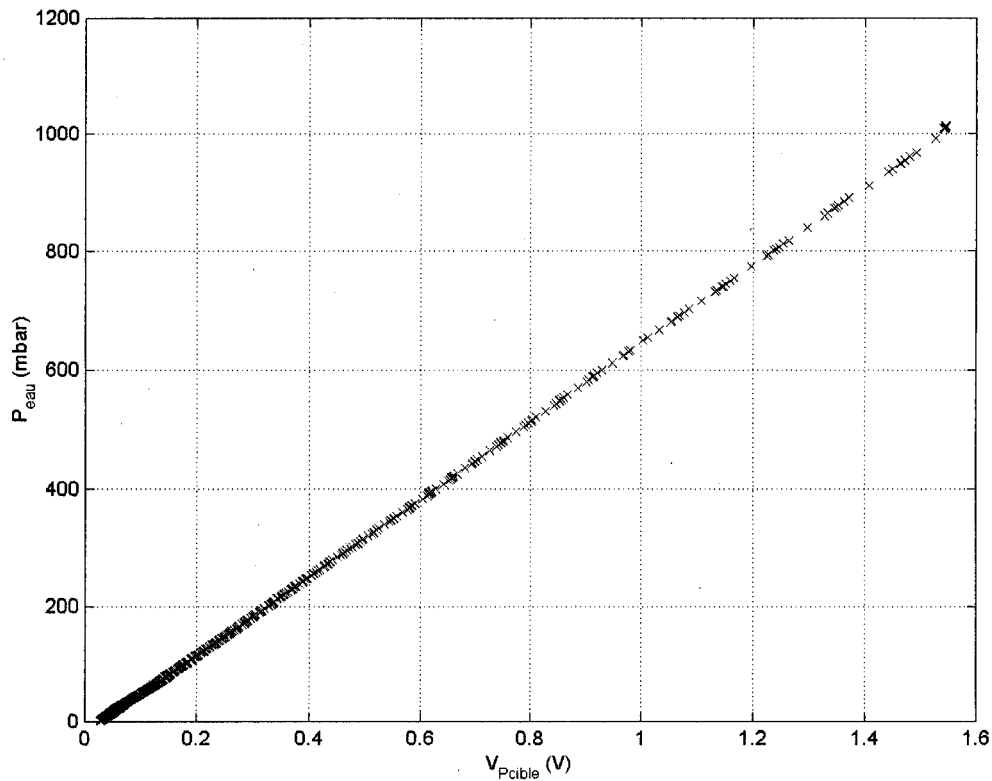


Figure 3-5: Relation linéaire entre  $P_{eau}$  et  $v_{Pcible}$ .

### 3.4.3 Corrélations entre $T_{eau}$ et $T_{cible}$

L'établissement des corrélations entre  $T_{cible}$  et  $T_{eau}$  est complexe car la température globale à l'intérieur de la chambre à vide  $T_{cible}$  dépend de plusieurs facteurs :

Premièrement, il est évident que la température  $T_{cible}$  dépend de la température initiale  $T_{init}$  de l'échantillon d'eau.

Deuxièmement, le processus de transformation de l'état liquide à l'état vapeur de l'eau s'effectue aux dépens de l'énergie thermique globale contenue dans la masse d'eau liquide. Cette énergie thermique quoique mesurable sur la masse d'eau, selon la loi thermodynamique classique, est difficilement mesurable dans la vapeur qui s'y dégage. En d'autres mots, si nous connaissons la masse et la température initiales de l'eau ainsi que la masse et la température finales de l'eau, la quantité d'énergie<sup>8</sup> transférée s'écrit :

$$l_{l \rightarrow v} \Delta m = mC\Delta T \quad (3.2)$$

où  $l_{l \rightarrow v}$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau,

$C$  est la chaleur spécifique de l'eau,

$m$  est la masse de l'eau.

Nous notons que toutes les variables dans ces équations se rapportent seulement à la masse d'eau à l'état liquide (cf. l'annexe 1). Étant donné que le paramètre global  $T_{cible}$  se rapporte à l'état gazeux de l'eau, une relation analytique entre  $T_{eau}$  et  $T_{cible}$  n'est pas évidente.

---

<sup>8</sup> cf. l'annexe 1.



Troisièmement, nous ne pouvons pas ignorer le transfert de chaleur entre la vapeur d'eau et toutes les matières qui constituent la chambre à vide et son contenu. Nos conditions expérimentales ne sont pas prévues pour mesurer ces types de transferts de chaleur.

Toutefois, nous pouvons établir expérimentalement des correspondances entre  $T_{eau}$  et  $(P_{cible}, T_{cible}, T_{init})$ .

La Figure 3-6 présente ces correspondances. Sur cette Figure, nous utilisons directement le signal en tension des capteurs de pression  $v_{P_{cible}}$  et de température  $v_{T_{cible}}$  à la place de  $P_{cible}$  et  $T_{cible}$ .

Pour chaque température initiale, nous pouvons tracer une courbe décrivant  $T_{eau}$  en fonction de  $v_{P_{cible}}$  et  $v_{T_{cible}}$ . Huit (8) courbes pour 8 températures initiales comprises dans la plage [5°C, 79°C] y sont présentées. Il est difficile de présenter ces courbes par une fonction :

$$T_{eau} = f(P_{cible}, T_{cible}, T_{init}) \quad (3.1)$$

Cependant, la courbe elle-même représente une relation de correspondance bien définie :

$$\text{Soient, } \Pi_{cible} = \{P_{cible} \in [2 \text{ mbar}, 1013 \text{ mbar}]\}$$

$$T_{cible} = \{T_{cible} \in [15^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}]\}$$

$$T_{init} = \{T_{init} \in [11^\circ\text{C}, 79^\circ\text{C}]\}$$

$$T_{init} = \{T_{eau} \in [7^\circ\text{C}, 78^\circ\text{C}]\}$$

$$Y = \Pi_{cible} \times T_{cible} \times T_{init} \times T_{init}$$

$$\text{nous avons}^9 : \quad \forall T_{eau} \in T_{eau}, \exists y \in Y : y = (P_{cible}, T_{cible}, T_{init}) \rightarrow T_{eau} \quad (3.2)$$

<sup>9</sup> Nous utilisons la notation algébrique conventionnelle, telle que dans [Len64], pour le produit d'ensemble ( $\times$ ) et la définition d'application ( $\rightarrow$ ).

C'est ainsi que la reconstitution de  $T_{eau}$  à partir des paramètres globaux est réalisable par une procédure d'étalonnage utilisant la méthode des RNA.

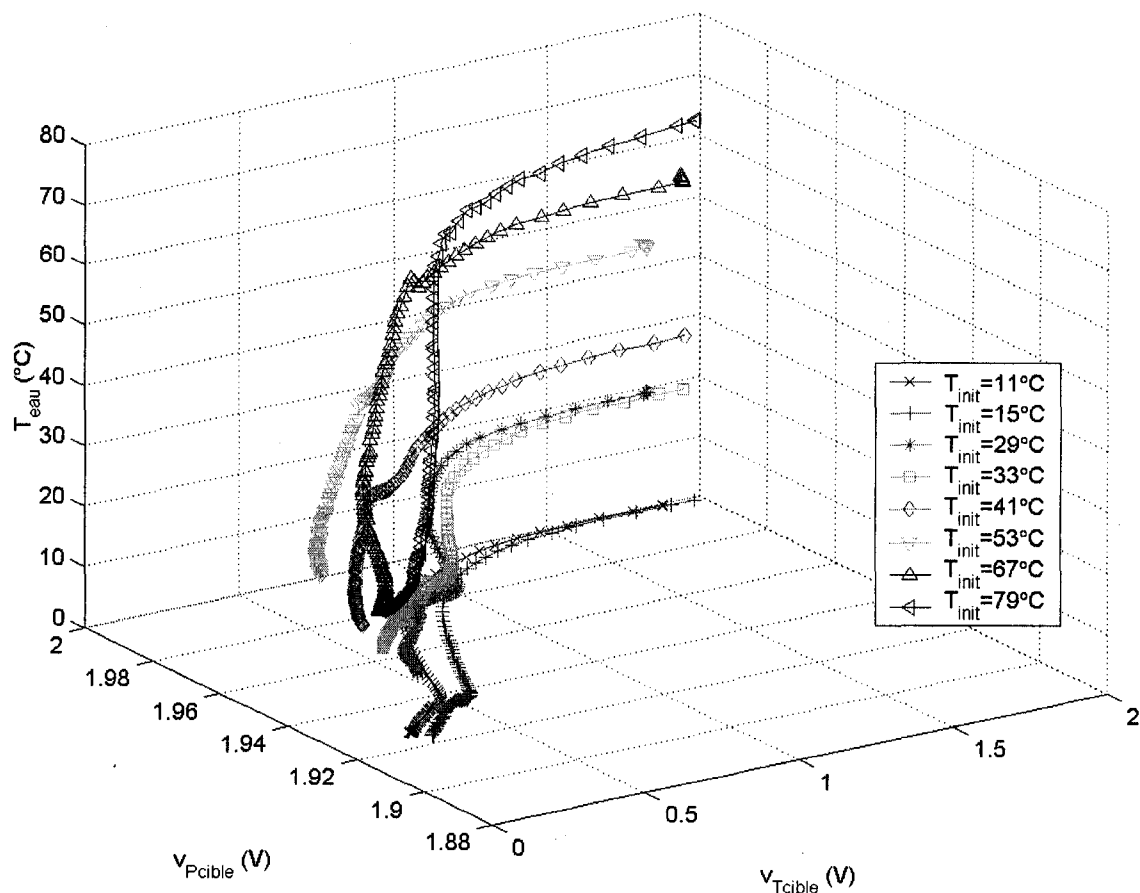


Figure 3-6 : Corrélations entre  $T_{eau}$  et  $(v_{Pcible}, v_{Tcible}, v_{Tinit})$ .

### 3.5 Conclusion

Les conditions expérimentales ont été réalisées pour la cueillette des données nécessaires à l'établissement de la technique de mesure sans contact des paramètres thermodynamiques de l'eau mise sous vide. Nous avons démontré des correspondances entre les paramètres  $P_{eau}$  et  $T_{eau}$  et les paramètres globaux caractérisant le système sous vide.

La relation linéaire pour déterminer  $P_{eau}$  à partir de  $v_{Pcible}$  est très bien définie.

Cependant, la recherche d'une relation analytique pour calculer le deuxième paramètre thermodynamique  $T_{eau}$  à partir des paramètres globaux présente des difficultés d'ordre pratique. En effet, nous ne pouvons pas contrôler tous les détails et mesurer tous les paramètres gouvernant les phénomènes physiques qui ont lieu à l'intérieur de la chambre à vide, par exemple le transfert des chaleurs latente et sensible de la vapeur avec toutes les matières qui s'y présentent. Pourtant, nous avons réussi à trouver une correspondance bien définie entre  $T_{eau}$  et les paramètres globaux ( $P_{cible}$ ,  $T_{cible}$ ,  $T_{init}$ ) ou ( $v_{Pcible}$ ,  $v_{Tcible}$ ,  $v_{Tinit}$ ).

Les résultats de nos études expérimentales et le grand nombre de données expérimentales nous permettent d'envisager la méthode des RNA pour établir les correspondances entre le paramètre thermodynamique  $T_{eau}$  et les paramètres globaux pour réaliser notre technique de mesure sans contact.

# *Méthode des RNA pour l'établissement de $T_{eau}$*

### 4.1 Introduction

Nous avons réussi à obtenir des données thermodynamiques décrivant le changement de phase de l'eau grâce à des capteurs mis en contact avec l'échantillon d'eau. Nous avons aussi démontré une possibilité de déduire ces mêmes données à partir de capteurs mesurant des paramètres globaux de la chambre à vide lesquels sont sans contact avec ces échantillons d'eau.

Dans ce chapitre, nous développons en détail une méthode pour reconstituer les deux paramètres thermodynamiques  $P_{eau}$  et  $T_{eau}$  à partir des trois paramètres globaux  $P_{cible}$ ,  $T_{cible}$  et  $T_{init}$ ; plus précisément à partir des signaux de sorties des capteurs de pression et de température, soient  $v_{Pcible}$  et  $v_{Tcible}$ , respectivement, et d'un signal en tension  $v_{Tinit}$  correspondant à un  $T_{init}$  donné.

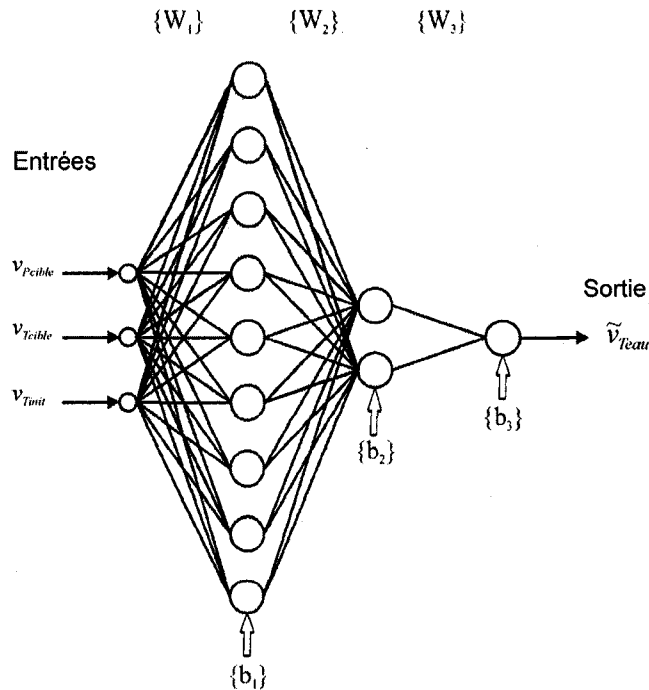
D'après le chapitre précédent, nous savons que la relation entre  $v_{Pcible}$  et  $P_{eau}$  est linéaire et bien définie par l'équation (3.1); alors la reconstitution de  $P_{eau}$  s'effectue directement par des calculs algébriques. Cependant, la relation entre  $T_{eau}$  et les autres paramè-

tres est difficile à définir de façon analytique ainsi; la reconstitution de  $T_{eau}$  s'obtient par une procédure d'étalonnage que nous construirons à l'aide de la méthode des RNA.

#### 4.2 Établissement du RNA pour reconstituer $T_{eau}$

Le choix de la méthode des RNA est fondé principalement sur la forme quoique bien définie mais non spécifique des corrélations entre les paramètres globaux et le paramètre thermodynamique  $T_{eau}$ . Nous avons appliqué la méthode des RNA en nous basant sur les travaux de Patra et *al.* [Pat99], [Pat00] et de Pereira et *al.* [Per00] où des approches par RNA ont été utilisées pour l'étalonnage de capteurs de pression et de température dans des conditions d'applications différentes.

Nous avons suivi les procédures générales de *network pruning* et de *cross validation* décrites dans la référence [Hay99] et avons construit un modèle de RNA multicouches 3-9-2-1 (cf. la Figure 4-1).



Tous les signaux sont numérisés et normalisés.

**Figure 4-1: RNA multicouche 3-9-2-1.**

En particulier, la construction de ce modèle de RNA s'effectue par un **processus d'apprentissage** réalisé à l'aide d'un algorithme de calculs bien établi. À partir des données expérimentales, cet algorithme modifie progressivement les poids synaptiques du réseau jusqu'à ce que l'architecture du RNA parvienne à fournir une estimation de  $T_{eau}$  qui se trouve dans la marge d'erreur établie. D'autre part, la capacité d'apprentissage de ce modèle de RNA lui permet aussi d'accomplir un autre processus, le **processus de généralisation** par lequel le RNA peut fournir une réponse valide représentant la température  $T_{eau}$  à partir de nouvelles valeurs d'entrée représentant des paramètres globaux; ces dernières ne faisant pas partie du processus d'apprentissage.

Dans ce projet, nous avons effectué nos travaux de synthèses avec MATLAB version 5 et *Neural Network Toolbox* version 4 pour la construction du RNA multicouches 3-9-2-1<sup>1</sup>. En nous référant à la Figure 4-1, les caractéristiques des entrées et de sortie du RNA se résument comme suit :

Les entrées de notre modèle de RNA sont les **valeurs numérisées et normalisées** du triplet  $(v_{P_{cible}}, v_{T_{cible}}, v_{T_{init}})$  où :

- $v_{P_{cible}}$  est la réponse du capteur mesurant la pression à l'intérieur de la chambre à vide c'est-à-dire  $P_{cible}$ ,
- $v_{T_{cible}}$  est la réponse du capteur mesurant la température à l'intérieur de la chambre à vide c'est-à-dire  $T_{cible}$ ,
- $v_{T_{init}}$  est une tension constante qui correspond à une température initiale donnée de l'eau c'est-à-dire  $T_{init}$ .

La sortie de notre modèle de RNA est la valeur numérisée et normalisée  $\tilde{v}_{T_{eau}}$  représentant la réponse d'un capteur idéal mesurant la température de l'échantillon d'eau  $T_{eau}$ .

---

<sup>1</sup> En particulier, nous avons utilisé l'algorithme de rétro-propagation [Rie93] fourni par le *Toolbox* de Matlab.

En d'autres termes, le RNA traitera les signaux d'entrées ( $v_{Pcible}, v_{Tcible}, v_{Tinit}$ ) et de sorties  $\tilde{v}_{Teau}$  dans le domaine numérique. Ainsi, pour l'apprentissage du RNA, nos données expérimentales à l'état brut, c'est-à-dire en tension (V) ou en unité physique de température (°C), doivent être transformées convenablement pour le domaine numérique.

La transformation des données expérimentales pour l'apprentissage du RNA s'effectue en deux étapes principales :

1. La conversion A/N des données expérimentales brutes.
2. La normalisation des données numérisées.

#### **4.2.1 Conversion A/N des données expérimentales**

Dans nos conditions réelles d'application, les conversions A/N des sorties des capteurs sont effectuées sur 10 bits<sup>2</sup>. Nous préparons donc les données expérimentales pour l'apprentissage du RNA avec ce format numérique.

Pour un paramètre  $X$ , soit  $v_{X-num}$  une valeur numérisée d'un signal analogique  $v_X$  exprimé en volts, la formule de conversion A/N sur 10 bits s'écrit :

$$v_{X-num} = \text{Partie\_entière} \left( \frac{v_X}{V_{ref}} \times 2^{10} \right) \quad (4.2)$$

où  $V_{ref}$  est la tension de référence.

$V_{ref} = 5V$  dans ce travail.

La formule (4.2) peut être appliquée directement sur les valeurs expérimentales de  $v_{Pcible}$  et de  $v_{Tcible}$  qui sont les réponses en tension (V) des capteurs cibles de pression et de température.

---

<sup>2</sup> Dans nos conditions expérimentales, les conversions A/N des sorties des capteurs sont effectuées sur 16 bits par le système d'acquisition de données.

Dans le cas des valeurs expérimentales de la température de l'eau  $T_{eau}$  et de sa température initiale  $T_{init}$ , ces données ont été acquises en unité physique, soit en °C à l'aide des thermocouples. Il est donc nécessaire d'exprimer les valeurs acquises en °C en terme de tension (V) de façon à ce que ces mêmes valeurs, c'est-à-dire en °C, s'obtiennent par des capteurs de même type que le capteur cible de température, soit un capteur de température AD22100KT de Analog Device. Alors, pour une température  $T$  en °C mesurée par ce capteur, la sortie  $v_T$  en tension (V) s'écrit<sup>3</sup>:

$$v_T = 0.0225T + 1.375 \quad (4.3)$$

L'expression (4.3) nous permet d'exprimer  $T_{eau}$  et  $T_{init}$  en tension  $v_{Teau}$  et  $v_{Tinit}$ , respectivement.

Nous pouvons ensuite numériser  $v_{Teau}$  et  $v_{Tinit}$  en appliquant la formule (4.2).

Les domaines des paramètres résultant des conversions A/N à l'aide des formules (4.2) et (4.3) sont présentés dans le Tableau 4-1.

**Tableau 4-1 : Domaines des paramètres dans la conversion A/N sur 10 bits.**

|             | $X$           | $v_X$             | $v_{X-num}$ |
|-------------|---------------|-------------------|-------------|
| $P_{cible}$ | 2 à 1013 mbar | 0.0288 à 1.5444 V | 6 à 315     |
| $T_{cible}$ | 15 à 25°C     | 1.8951 à 1.9755 V | 387 à 403   |
| $T_{init}$  | 11 à 79°C     | 1.6225 à 3.1525 V | 331 à 643   |
| $T_{eau}$   | 7 à 78°C      | 1.5424 à 3.1378 V | 315 à 640   |

<sup>3</sup> D'après les spécifications du manufacturier Analog Device.



## 4.2.2 Normalisation des données pour l'apprentissage du RNA

Nous venons de numériser 4 groupes de données expérimentales représentant 4 paramètres  $P_{cible}$ ,  $T_{cible}$ ,  $T_{init}$  et  $T_{eau}$ . La normalisation des valeurs  $v_{X-num}$  d'un groupe  $X$  s'effectue en fonction de la valeur maximale de  $v_{X-num}$  dans ce groupe,  $\max\{v_{X-num}\}$ , selon:

$$v_{X-num-norm} = \frac{v_{X-num}}{\max\{v_{X-num}\}} \quad (4.11)$$

Le Tableau 2 illustre les valeurs maximales pour les 4 groupes de paramètres  $P_{cible}$ ,  $T_{cible}$ ,  $T_{init}$  et  $T_{eau}$  provenant de l'ensemble des données expérimentales numérisées dans la section précédente.

**Tableau 4-2: Valeurs maximales numérisées de chaque groupe de paramètre.**

| $v_{X-num}$         | $\max\{v_{X-num}\}$ |
|---------------------|---------------------|
| $v_{P_{cible-num}}$ | 315                 |
| $v_{T_{cible-num}}$ | 403                 |
| $v_{T_{init-num}}$  | 643                 |
| $v_{T_{eau-num}}$   | 640                 |

En utilisant les valeurs maximales du Tableau 4-2, les domaines des paramètres résultant de la normalisation des données expérimentales numérisées à l'aide de la formule (4.11) sont présentés dans le Tableau 4-3.

**Tableau 4-3 : Domaines des paramètres normalisés.**

|             | $X$           | $v_{X-num}$ | $v_{X-num-norm}$ |
|-------------|---------------|-------------|------------------|
| $P_{cible}$ | 2 à 1013 mbar | 6 à 315     | 0.0190 à 1       |
| $T_{cible}$ | 15 à 25°C     | 387 à 403   | 0.9603 à 1       |
| $T_{init}$  | 11 à 79°C     | 331 à 643   | 0.5148 à 1       |
| $T_{eau}$   | 7 à 78°C      | 315 à 640   | 0.4922 à 1       |

### 4.3 Apprentissage du RNA pour l'établissement de $T_{eau}$

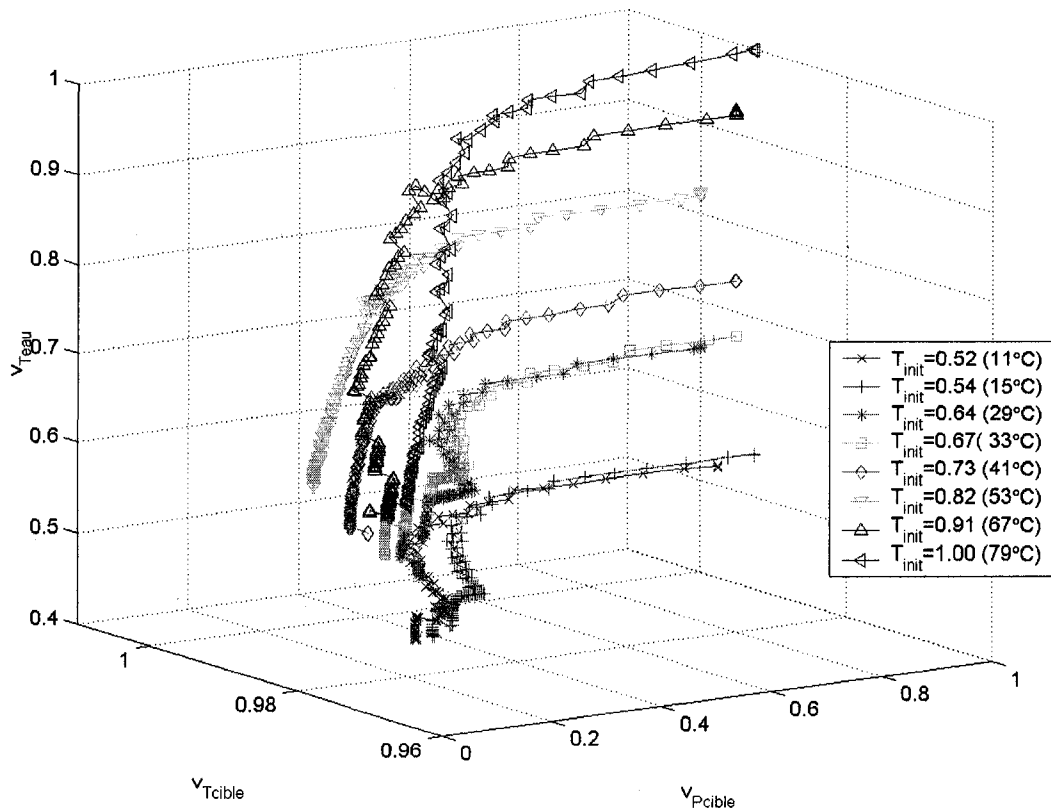
Nous pouvons maintenant représenter les corrélations entre ( $v_{Pcible-num-norm}$ ,  $v_{Tcible-num-norm}$ ,  $v_{Tinit-num-norm}$ ) et  $v_{Teau-num-norm}$  dans le domaine numérique sur la Figure 4-2 et nous construisons notre modèle de RNA multicouches 3-9-2- à partir de ces corrélations.

Nous pouvons constater que non seulement l'allure des courbes de la Figure 4-2 est très proche à l'allure des courbes obtenues dans le domaine analogique (cf. la Figure 3-6) mais aussi que le degré de précision relatif à la conversion A/N sur 10 bits est suffisante pour l'interprétation du phénomène thermodynamique de changement de phase de l'eau dans notre application. En fait, les courbes de la Figure 4-2 sont les courbes numérisées et normalisées sur 10 bits de la Figure 3-6.

Ainsi, les points sur les courbes de la Figure 4-2 servent de données d'apprentissage pour notre RNA<sup>4</sup>.

---

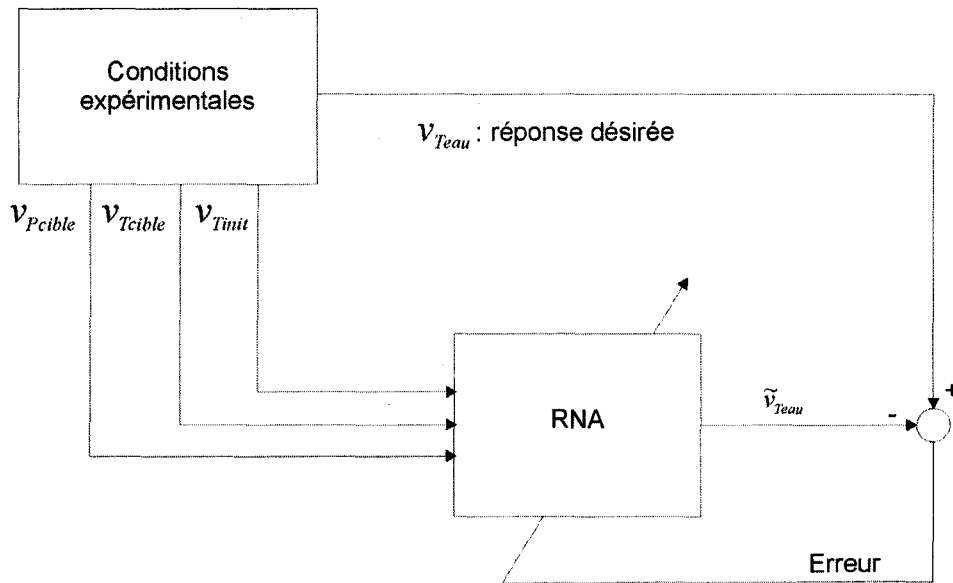
<sup>4</sup> Nous aurions pu aussi faire l'apprentissage du RNA à partir des données analogiques et ensuite numériser le résultat obtenu. Nous avons préféré suivre le flot des signaux depuis les capteurs vers le RNA.



**Figure 4-2: Courbes expérimentales de changement de phase représentées dans le domaine numérique.**

Nous avons utilisé au total 916 données expérimentales de triplets ( $v_{Pcible-num}$ ,  $v_{Tcible-num}$ ,  $v_{Tinit-num}$ ) comme signal d'entrées pour l'apprentissage du RNA.

L'apprentissage du RNA a été effectué selon le principe de la Figure 4-3. Pour cela, nous utilisons l'algorithme de Levenberg-Maquard. Cet algorithme est plus rapide que l'algorithme de rétro-propagation. Le réseau converge vers une erreur quadratique moyenne (MSE) de  $\sim 8 \times 10^{-5}$  après 5500 itérations d'époque. Notamment, les méthodes de *cross validation* et de *early stopping method training* ont permis d'atteindre un point de la courbe d'apprentissage du RNA, où la tangente à la courbe est proche de 0 [Hay99].



Tous les signaux sont numérisés et normalisés.

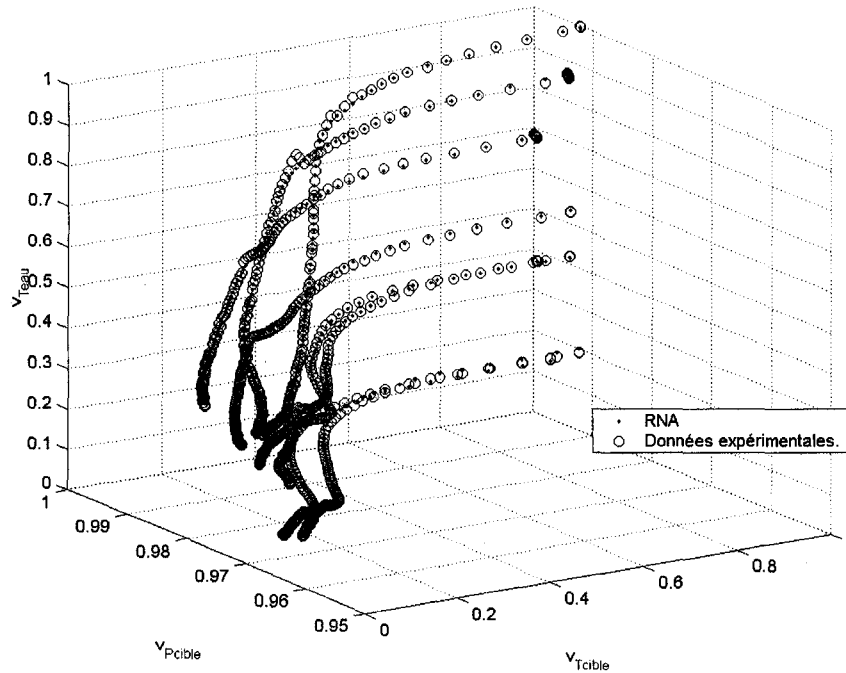
**Figure 4-3: Principe utilisé pour l'apprentissage du RNA.**

#### **4.4 Généralisation du RNA et résultats obtenus**

Il est évident que l'utilité du modèle de RNA 3-9-2-1 pour des applications réelles se confirme seulement si la réponse du RNA est valide dans la limite des erreurs acceptables lorsqu'une entrée représentant un triplet de paramètres globaux lui est soumis.

Ainsi, pour valider notre modèle de RNA, nous avons simulé à l'aide de MATLAB notre modèle de RNA avec les données d'apprentissage de la section précédente, soient les 916 triplets ( $v_{Pcible-num-norm}$ ,  $v_{Tcible-num-norm}$ ,  $v_{Tinit-num-norm}$ ) et les données de généralisation; ces dernières constituent un total de 228 triplets. Les résultats des simulations sont présentés sur la Figure 4-4. Nous observons que l'allure générale des courbes obtenues par le RNA est identique à celle des courbes de la Figure 4-2, établies par les corrélations existant entre  $T_{eau}$  et les paramètres globaux. D'autre part, nous voyons que les points obtenus par la

simulation du RNA sont dans la proximité immédiate des points expérimentaux (cf. la Figure 4-5).

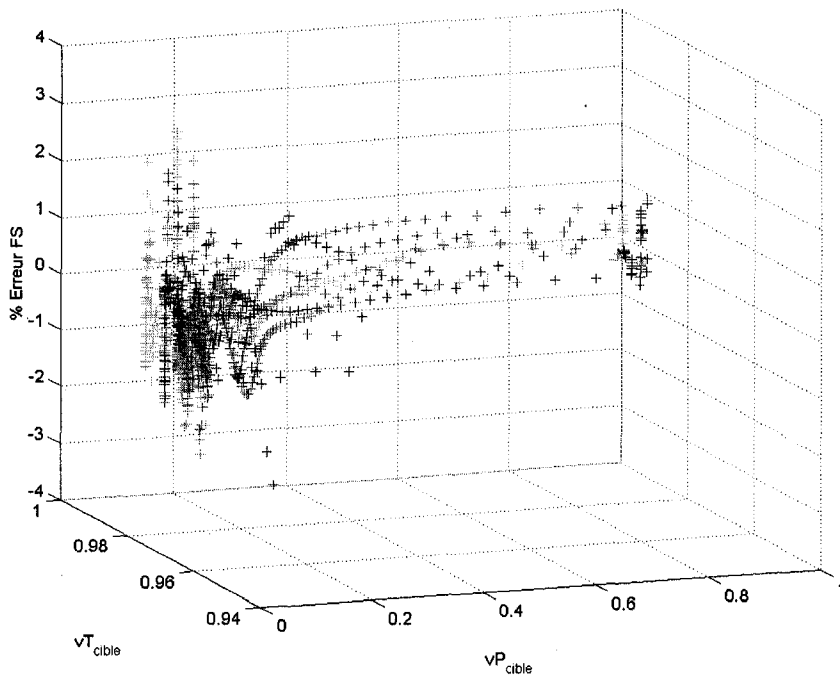


**Figure 4-4 : Résultats des simulations de l'étalonnage réalisé par notre modèle de RNA multicouches 3-9-2-1.**

Nous pouvons alors examiner et calculer l'erreur sur les estimations réalisées par le RNA. L'erreur en %FS (full scale)<sup>5</sup> est présentée sur la Figure 4-5. Nous observons que pour la plage de pression [200 mbar, 1013 mbar], l'erreur entre les valeurs estimées par le RNA et les données expérimentales est de  $\pm 2\%$ , soit une erreur de 1.4 °C sur l'estimation de la température de l'eau<sup>6</sup>. Pour la plage de pression [2 mbar, 200 mbar], l'erreur est de  $\pm 4\%$ , soit une erreur de 2.7 °C sur l'estimation de la température de l'eau.

<sup>5</sup> L'erreur %FS (full-scale) est définie par  $\%FS = (v_{X-num-norm} - \tilde{v}_{X-num-norm}) \times 100$ .

<sup>6</sup> les calculs d'erreur sont détaillés en annexe.



**Figure 4-5 : Erreur (%FS –full scale) sur les valeurs estimées par le RNA.**

Ainsi, le RNA multicouche 3-9-2-1 que nous avons construit est décrit dans le Tableau 4-4. Notre méthode d'étalonnage pour reconstituer  $T_{eau}$  à partir des paramètres globaux  $P_{cible}$ ,  $T_{cible}$  et  $T_{init}$  est valide dans nos limites d'erreur relative aux conditions d'application réelle.

**Tableau 4-4: RNA multicouche 3-9-2-1 pour implantation.**

| <b>Couche 1</b> |           |           |          |           |
|-----------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| $w_{ij}$        | 1         | 2         | 3        | bias      |
| 1               | 10.1420   | -32.4490  | -10.0470 | 39.8400   |
| 2               | -3.6570   | 98.8660   | -25.8670 | -85.9860  |
| 3               | -119.1550 | -116.7500 | 89.6940  | 46.0120   |
| 4               | 0.0000    | 0.0200    | 0.3150   | 0.5880    |
| 5               | -1.5800   | 113.2030  | 1.3660   | -101.5640 |
| 6               | 0.1020    | 2.6260    | -49.9800 | 24.5120   |
| 7               | 30.6840   | 60.5290   | 1.7110   | -59.6210  |
| 8               | 30.9930   | 77.5900   | 2.1760   | -76.4310  |
| 9               | -32.2130  | -105.5820 | -2.7320  | 103.8480  |

| <b>Couche 2</b> |         |          |         |          |        |
|-----------------|---------|----------|---------|----------|--------|
| $w_{ij}$        | 1       | 2        | 3       | 4        | 5      |
| 1               | -0.4670 | -12.0530 | -0.0520 | -17.0390 | 1.9010 |
| 2               | 9.7370  | -3.6810  | -3.6810 | 1.7470   | 6.7830 |

| <b>Couche 2 (suite)</b> |         |          |         |         |         |
|-------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|
| $w_{ij}$                | 6       | 7        | 8       | 9       | bias    |
| 1                       | 0.2240  | -26.4630 | 36.9740 | 12.6090 | 3.0940  |
| 2                       | -2.8710 | 6.5800   | 5.7610  | -9.3650 | 12.4730 |

| <b>Couche 3</b> |          |         |         |
|-----------------|----------|---------|---------|
| $w_{ij}$        | 1        | 2       | bias    |
| 1               | -39.1920 | 22.2080 | 17.5140 |

Les  $w_{ij}$  désignent les poids du RNA pour une couche donnée.

Ces résultats démontrent l'efficacité de la technique d'estimation du RNA. En effet, l'obtention d'un degré de précision de  $\pm 4\%$  pour la reconstitution de  $T_{eau}$  dans une plage de variation relativement étendue [7 °C, 78 °C] à partir d'une plage étroite de variation de  $T_{cible}$ , soit [15 °C, 25 °C], est une performance remarquable. Quoique nous ignorons les détails thermodynamiques dans le processus de changement de phase à l'intérieur de la chambre à vide, il ne paraît pas *a priori* très évident que l'extraction de la température de l'eau  $T_{eau}$  à partir de la température de la vapeur et du gaz résiduel dans la chambre à vide soit précise dans la limite expérimentale. Nous croyons que cette per-

formance est d'une part attribuable à la précision des circuits de traitements des signaux et celle des instruments de mesure et d'autres part à la vitesse d'étalonnage qui est inférieure au temps de transfert de chaleur entre la vapeur d'eau et la chambre à vide elle-même. En plus, cette performance est aussi liée à la qualité de l'apprentissage qui a atteint son point optimal (cf. la section 4.3).

#### **4.5 Conclusion**

Nous avons réussi à construire, de façon synthétique, un modèle de RNA multicouche 3-9-2-1 pour notre procédure d'étalonnage. Ce RNA nous permet de reconstituer le paramètre thermodynamique de température de l'eau à partir des paramètres globaux de pression et de température à l'intérieur de la chambre à vide ainsi que de la température initiale de l'eau.

Dans l'ensemble, le modèle de RNA proposé fournit une estimation satisfaisante de la température de l'eau pour des cas où la température initiale de l'eau est comprise entre 6°C et 79°C. Le modèle de RNA estime la température de l'eau  $T_{eau}$  avec des erreurs acceptables de l'ordre de  $\pm 1.4^\circ\text{C}$  et  $\pm 2.7^\circ\text{C}$  pour une plage de pression appliquée de [200 mbar, 1013 mbar] et de [2 mbar, 200 mbar], respectivement.



# *Implantation de la technique de mesure sans contact*

### 5.1 Introduction

Les études de simulation de notre modèle de RNA multicouches 3-9-2-1 démontrent la capacité de prédiction du modèle dans l'application de mesure sans contact de la température des échantillons d'eau mis sous vide.

Cette technique peut être utile au point de vue d'applications réelles si l'implantation matérielle est réalisable avec des composants électroniques facilement accessibles. Cela présente plusieurs défis relatifs au fait que nous choisissons d'implanter notre modèle de RNA dans un microcontrôleur de bas niveau (8 bits). Un tel microcontrôleur est bénéfique pour notre contexte d'application commerciale par son faible coût et sa grande accessibilité. En revanche, il est difficile de réaliser des opérations de calculs fonctionnels avec des nombres réels sur des microcontrôleurs 8 bits, lesquels ont seulement la capacité d'exécuter des opérations arithmétiques élémentaires.

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu la technique logicielle (*software*) relative à l'implantation du modèle de RNA pour que le microcontrôleur de bas niveau

puisse accomplir des calculs fonctionnels tels les calculs de tangente hyperbolique avec un degré de précision acceptable pour notre application, soit une précision de l'ordre de  $10^{-3}$ .

En deuxième lieu, il est évident que les signaux bruts provenant des capteurs de pression et de température doivent être conditionnés électroniquement avant d'être acheminés vers les entrées du microcontrôleur où s'implantent les logiciels du RNA. Alors, nous réalisons des circuits de conditionnement des signaux qui serviront à filtrer, amplifier et convertir les données brutes des capteurs pour rendre accessibles leurs traitements numériques.

Enfin, nous soumettrons notre implantation matérielle à des essais réels.

## 5.2 Choix du microcontrôleur

À première vue, pour implanter notre modèle de RNA 3-9-2-1, nous serions enclin à utiliser un DSP (Digital Signal Processing) plutôt qu'un microcontrôleur de bas niveau car le DSP traite facilement des nombres de 32-bits et peut réaliser sans difficulté l'évaluation de calculs fonctionnels telles les fonctions trigonométriques, exponentielles et logarithmiques. Toutefois, les coûts de production et de développement liés à l'implantation du RNA sur un DSP sont trop élevés pour certaines applications commerciales qui lui seraient destinées.

Nous proposons d'implanter le RNA dans un microcontrôleur 8-bits. D'abord, nous évaluons que le suivi **en temps réel** du changement de phase de l'eau est possible puisque le processus de mise sous vide de l'eau est suffisamment lent, en étant de l'ordre de 30 secondes, par rapport à la vitesse de calculs du microprocesseur qui est typiquement de quelques  $\mu$ s pour une opération élémentaire à une cadence d'horloge d'une dizaine de MHz. D'autre part, bien que les capacités de calculs de ces microcontrôleurs soient limitées, nous pouvons quand même développer des routines logicielles pour **élargir les**

**capacités de calculs d'un tel microcontrôleur de bas niveau** afin de lui permettre d'accomplir les calculs requis par le RNA.

Il y a une grande variété de microcontrôleurs tout aussi performants les uns que les autres et il y a aussi un risque relié à l'avancement rapide de la technologie électronique. Le choix du microcontrôleur est une tâche plus ou moins rationnelle. Notre choix repose d'une part sur le crédit passé des familles de microcontrôleurs et d'autre part sur la polyvalence des outils de développement<sup>1</sup>.

Ainsi, nous choisissons le **microcontrôleur 8-bits PIC18F452** de Microchips Technology pour l'implantation matérielle de ce projet.

Ce microcontrôleur répond aux critères du projet dont la précision, la vitesse, le faible coût et la facilité d'approvisionnement, etc. Particulièrement, le PIC18F452 possède plusieurs caractéristiques intéressantes telles l'instruction de multiplication, les pointeurs de tables, un convertisseur analogique numérique de 10 bits, 32 K de mémoire flash et une opération à 40 MHz.

Le Tableau 5-1 présente les caractéristiques de performance du microcontrôleur ainsi que les exigences minimales du projet.

**Tableau 5-1 : Caractéristiques du PIC18F452.**

| <b>Fonction</b>          | <b>PIC18F452</b>                         | <b>Exigence minimale</b>   |
|--------------------------|--|--|
| Instructions d'opération | Addition 8-bits<br>Multiplication 8-bits | Opération de bases sur des <b>nombres réels</b> : addition, soustraction, multiplication et division |
| Convertisseur A/N        | 10 bits                                  | 10 bits minimum  |
| Mémoire                  | 32 K                                     | 16 K minimum   |
| Vitesse d'horloge        | 40 MHz                                   | 20 MHz   |

<sup>1</sup> Par exemple dans le cas où nous voudrions effectuer des mise à jour futures du microcontrôleur.

### 5.3 Implantation matérielle de la technique de mesure sans contact

Nos circuits électroniques de mesure sans contact sont divisés en deux modules d'après l'évolution des signaux traités (cf. la Figure 5-1) :

1. Le **module de préparation des signaux** traite les signaux bruts des capteurs de pression et de température correspondant à la pression partielle et à la température de l'eau ainsi qu'une valeur de tension correspondant à la température initiale de l'échantillon d'eau. Ce module est constitué principalement de circuits de conditionnements de signaux qui opèrent dans le domaine analogique. Les signaux traités sont au niveau convenable pour la conversion A/N.
2. Le **module d'étalonnage** a pour entrées les signaux préparés et numérisés par le module de préparation des signaux. Le module d'étalonnage est constitué principalement du RNA qui opère dans le domaine numérique. La sortie de ce module est une valeur numérique qui correspond à une estimation de la température de l'échantillon d'eau.

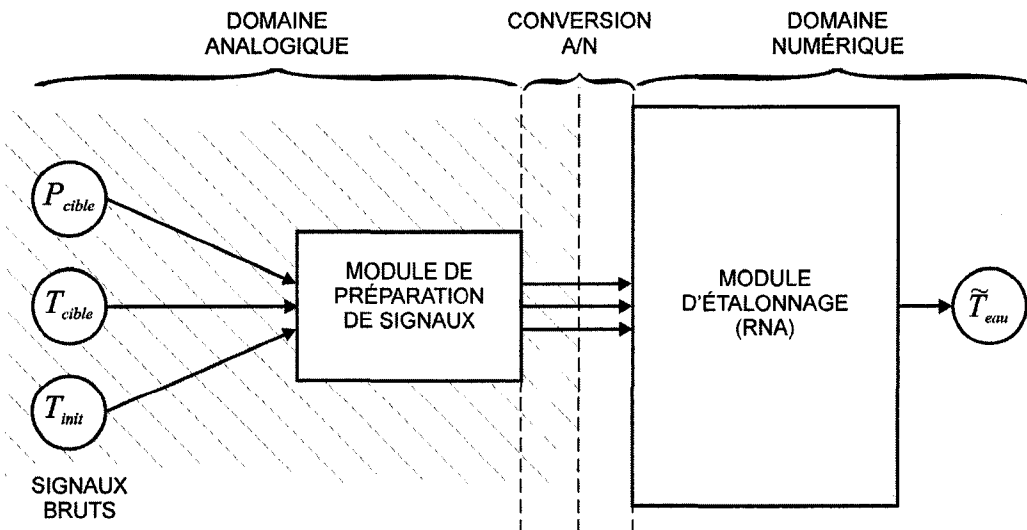


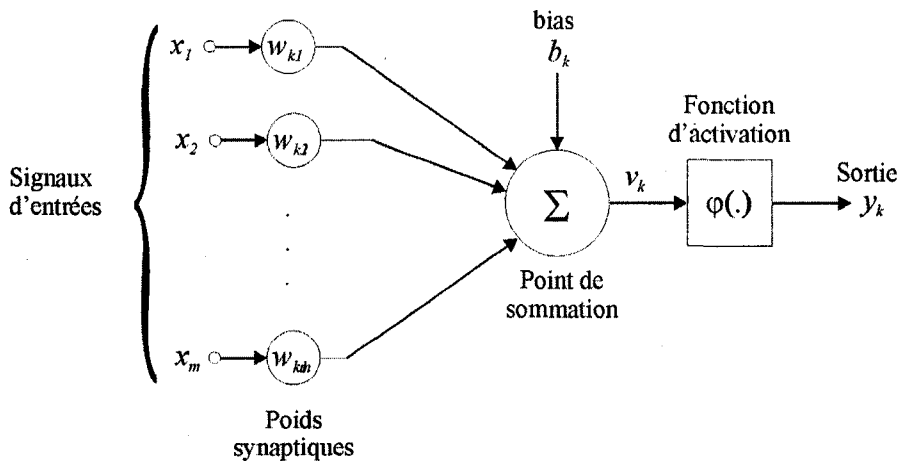
Figure 5-1: Schéma d'implantation.

Pour la clarté de ce texte nous commençons par le **domaine numérique**, soit le RNA, et remontons vers le **domaine analogique**, soit les circuits de conditionnements de signaux.

#### 5.4 Domaine numérique

Pour implanter notre modèle de RNA multicouche 3-9-2-1 dans le microcontrôleur, nous allons d'abord examiner l'architecture du RNA et le simplifier sous la forme la plus simple afin d'identifier les opérations primaires de calculs qui seront requises par le RNA.

Examinons la composante de base d'un RNA, soit le neurone. Le modèle simplifié est présenté sur la Figure 5-2 (le détail de cette simplification est présenté en annexe).



**Figure 5-2 : Modèle de neurone simplifié avec  $n$  signaux d'entrée et une entrée fixe (biais).**

La formulation mathématique de ce modèle de neurone s'écrit :

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j \quad (5.1)$$

et

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (5.2)$$

où

- les  $\{x_j\}_{j=0}^m$  sont les  $m$  signaux d'entrées (incluant le biais) du neurone  $k$ ,
- les  $\{w_{kj}\}_{j=0}^m$  sont les poids synaptiques du neurone  $k$  pour les  $m$  signaux d'entrées (incluant le biais),
- $\varphi(.)$  est la fonction d'activation.

Nous utilisons cette forme pour l'implantation de notre RNA 3-9-2-1. Les valeurs de  $m$  pour l'équation (5.1) sont présentées dans le Tableau 5-2 :

**Tableau 5-2 : Valeurs de  $m$  pour le RNA multicouches 3-9-2-1.**

|     | Couche 1 | Couche 2 | Couche 3 |
|-----|----------|----------|----------|
| $m$ | 3        | 9        | 2        |

Le modèle de RNA multicouche 3-9-2-1 à implanter possède les caractéristiques présentées dans le Tableau 5-3 suivant :

**Tableau 5-3 : Caractéristiques du RNA multicouche 3-9-2-1.**

|                                | Caractéristique         |
|--------------------------------|-------------------------|
| Nombre de nœuds sources        | 3                       |
| Nombre de neurones             |                         |
| Couche d'entrées               | 3                       |
| 1 <sup>ère</sup> couche cachée | 9                       |
| 2 <sup>e</sup> couche cachée   | 2                       |
| Couche de sortie               | 1                       |
| Domaine du RNA                 | [0,1]                   |
| Image du RNA                   | [0,1]                   |
| Fonction d'activation          | $\varphi(v) = \tanh(v)$ |

En outre, notons que le RNA est complètement branché, i.e. tous les nœuds de la couche  $i$  sont branchés à tous les nœuds de la couche adjacente suivante ( $i+1$ ).

Ainsi, pour un triplet d'entrées du RNA 3-9-2-1, le microcontrôleur doit effectuer au total toutes les opérations résumées dans le Tableau 5-4 :

**Tableau 5-4 : Nombre d'opération nécessaire pour 1 cycle de calculs exécuté par le RNA.**

| Opération             | Nombre total d'opérations   | Expression de calculs où l'opération est requise   |
|-----------------------|---|--|
| Multiplication        | $47 = (3 \times 9)$<br>$+ (9 \times 2)$<br>$+ (2 \times 1)$       | Pour un neurone $k$ , la multiplication du poids synaptique $w_{kj}$ et de la $j^{\text{ième}}$ entrée $x_j$ qui lui est associée s'écrit : $w_{kj}x_j$ .<br><br>Les poids $w_{kj}$ se retrouvent dans le Tableau 4-4.   |
| Addition              | $59 = (3+1) \times 9$<br>$+ (9+1) \times 2$<br>$+ (2+1) \times 1$ | Pour un neurone $k$ , la forme d'addition s'écrit:<br><br>$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj}x_j = \sum_{j=1}^m w_{kj}x_j + w_{k0}x_0 = \sum_{j=1}^m w_{kj}x_j + b_k \quad (5.3)$ où $w_{k0} = b_k$ , $x_0 = +1$ et $m$ représente le nombre d'entrées qui alimente le neurone. |
| Fonction d'activation | $12 = 9 + 2 + 1$  | Pour un neurone $k$ , la forme de la fonction d'activation $\varphi$ s'écrit :<br><br>$\varphi(v_k) = \tanh(v_k) \quad (5.4)$  |

#### **5.4.1 Choix d'une représentation numérique sur 24 bits dans la notation à point fixe**

Nous voulons manipuler des **nombre réels** sans alourdir les tâches du microcontrôleur. Pour cela, nous devons établir une représentation numérique qui soit à la fois adaptée à notre contexte d'application et facile à traiter par le microcontrôleur.

Alors, nous devons déterminer les nombres minimales de bits nécessaires pour représenter la partie entière et la partie décimale de tous les nombres qui seront traités par le RNA.

#### 5.4.1.1 Partie entière des nombres manipulés par le RNA

À l'exception des neurones de la couche d'entrée, les valeurs d'entrées de tous les autres neurones sont comprises entre  $[-1,+1]$ . Les entrées des neurones de la première couche sont normalisées et les entrées des neurones des seconde et troisième couches sont en fait les sorties des neurones des couches précédentes : leurs valeurs appartiennent donc à l'image de la fonction d'activation tangente hyperbolique. Ainsi, en nous basant sur l'équation (5.3), le nombre le plus élevé  $n_j^{élévé}$  qui pourrait être manipulé par le neurone  $j$  s'écrit :

$$n_j^{élévé} = \sum_i |1 \times w_{ij}| + b_j \quad (5.5)$$

et le nombre le plus élevé  $n_{rna}^{élévé}$  que le RNA pourrait manipuler est alors :

$$n_{rna}^{élévé} = \max(\{n_j^{élévé} | j \in I_w\}) \quad (5.6)$$

où  $I_w$  est l'ensemble de tous les indices de tous les poids du RNA.

De cette expression, nous pouvons donc extraire les nombres  $n_j^{élévé}$  de chaque neurone de modèle de RNA multicouches 3-9-2-1 en nous référant au Tableau 4-2 du Chapitre 4. Ces nombres  $n_j^{élévé}$  sont reproduits dans le Tableau 5-5.



**Tableau 5-5: Nombre le plus élevé pour chaque neurone du RNA 3-9-2-1.**

| $n_j^{elevé}$ | Couche 1 | Couche 2 | Couche 3 |
|---------------|----------|----------|----------|
| 1             | 92.4780  | 110.8760 | 78.9140  |
| 2             | 42.4040  | 63.3400  |          |
| 3             | 371.6110 |          |          |
| 4             | 0.9230   |          |          |
| 5             | 14.5850  |          |          |
| 6             | 77.2200  |          |          |
| 7             | 33.3030  |          |          |
| 8             | 34.3280  |          |          |
| 9             | 244.3750 |          |          |

Sur le Tableau 5-5, nous constatons que la partie entière du nombre le élevé lourd que pourrait manipuler le RNA est 371 (ou 372, en effectuant l'arrondissement). Un mot de 9 bits est donc suffisant pour représenter les parties entières positives manipulées par le RNA.

#### **5.4.1.2 Partie décimale des nombres manipulés par le RNA**

La partie décimale est reliée à la précision des nombres manipulés par le RNA.

En premier lieu, il nous faut déterminer la précision nécessaire qui assure une réponse valide du RNA. Des tests de calculs à l'aide de MATLAB<sup>2</sup> montrent qu'un RNA construit sur des nombres réels, arrondis à  $10^{-3}$ , présente une erreur de  $\sim 2\%$  par rapport à une représentation des nombres réels à  $o(10^{-16})$ . Ce niveau de précision intrinsèque est suffisant pour ce projet.

---

<sup>2</sup> Dans MATLAB, les nombres sont enregistrés de façon interne dans le *long format* spécifié par le standard de point flottant IEEE. Les points flottants ont une précision finie de 16 chiffres décimaux significatifs et une plage finie de  $10^{-308}$  à  $10^{+308}$ .

Pour représenter une partie décimale à l'ordre de  $10^{-3}$ , il faut au minimum 10 bits puisque

$$\frac{1}{2^{10}} = 0.000977 \quad (5.7)$$

#### 5.4.1.3 Configurations de 24 bits représentant un nombre réel

En somme, il nous faut au minimum 20 bits pour représenter un nombre réel :

- 9 bits pour représenter la partie entière
- 10 bits pour représenter la partie décimale
- 1 bit pour indiquer le signe

Afin de faciliter la programmation et d'optimiser les opérations du microcontrôleur, il est pratique d'utiliser un nombre de bits qui soit un multiple de 8. Alors, une représentation numérique sur 24 bits est donc suffisante. Ainsi, avec 24 bits, nous avons deux configurations possibles pour représenter un nombre réel. Le Tableau 5-6 montre ces deux configurations:

**Tableau 5-6 : Configurations possibles pour une représentation 24-bits.**

|                 | bit de signe | partie entière | partie décimale |
|-----------------|--------------|----------------|-----------------|
| configuration 1 | 1 bit        | 10 bits        | 13 bits         |
| configuration 2 | 1 bit        | 11 bits        | 12 bits         |

**La configuration 1 améliore la précision du nombre réel :** 13 bits sont utilisés pour la partie décimale et le nombre représenté possède une précision supérieure de trois ordres de magnitude à la précision souhaitée, soit  $2^{-10}$ .

**La configuration 2 facilite l'implantation matérielle :** avec 12 bits pour représenter les parties décimales, cette configuration est suffisamment précise puisque le nombre représenté possède une précision supérieure de deux ordres de magnitude à la précision souhaitée. L'avantage de cette configuration est qu'elle simplifie

considérablement l'implantation matérielle comparativement à la configuration 1. En effet, les données à traiter doivent être normalisées, pour cela, il est plus commode de manipuler la partie décimale en 12 bits plutôt que 13 bits<sup>3</sup>.

Pour ce projet, la configuration 2 est plus intéressante que la configuration 1. Nous adoptons une **représentation numérique signée sur 24 bits, dans la notation à point fixe, à une précision de  $2^{-12}$**  pour la représentation numérique de l'implantation du RNA.

### 5.5 Conversion A/N et la représentation 24 bits

La conversion A/N du microcontrôleur PIC18F452 résulte en une représentation numérique de 10 bits, c'est-à-dire un entier compris entre 0 et 1023 ( $2^{10}-1$ ). Il est nécessaire de normaliser et transformer cette valeur dans la représentation numérique signée sur 24 bits dans la notation à point fixe avec une précision de  $2^{-12}$  que nous appelons dorénavant la *représentation numérique choisie*.

Considérons en premier lieu la transformation d'un nombre entier de 10 bits dans la forme numérique choisie.

Soit  $N_{10bits}$  un entier de 10 bits:

$$N_{10bits} = \text{xxxxxxxxxx} \quad (5.13)$$

où  $x=1$  ou  $0$ .

Le même nombre dans la représentation numérique choisie :

$$N_{24bits} = s\text{0xxxxxxxxxx.000000000000} \quad (5.14)$$

où  $x = 1$  ou  $0$ .

et où le bit de signe est égal à 0 ( $s=0$ ) puisque  $N_{10bits}$  est positif.

---

<sup>3</sup> La raison de cet avantage sera apparente dans les sections suivantes.

Le passage de 10 bits à 24 bits est équivalent à une multiplication par  $2^{12}$  (ou un décalage vers la gauche de 12 bits à partir du LSB), c'est-à-dire :

$$N_{24\text{bits}} = N_{10\text{bits}} \times 2^{12} \quad (5.15)$$

Appliquons maintenant cette relation de transformation à notre procédure de normalisation d'un signal d'entrée. Soit  $N_{A/N_{10\text{bits}}}$  le résultat de conversion A/N du microcontrôleur PIC18F452 (cf. le Tableau 4-1). Pour l'ensemble des  $\{N_{A/N_{10\text{bits}}}\}$ , il existe une valeur maximale sur 10 bits que nous utilisons pour la normalisation.

$$MAX\_N_{10\text{bits}} = \max\{N_{A/N_{10\text{bits}}}\} \quad (5.16)$$

Nous avons :

$$\begin{aligned} sig_{norm} &= \frac{N}{MAX\_N} \\ &= \frac{N_{A/N_{10\text{bits}}}}{MAX\_N_{10\text{bits}}} \\ &= \frac{N_{A/N_{24\text{bits}}}}{MAX\_N_{24\text{bits}}} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Avec la relation de transformation, équation (5.15), nous pouvons écrire :

$$sig_{norm} = \frac{N_{A/N_{24}}}{MAX\_N_{24}} = \frac{N_{A/N_{10\text{bits}}} \times 2^{12}}{MAX\_N_{10\text{bits}} \times 2^{12}} \quad (5.18)$$

qui est équivalent à :

$$sig_{norm} = \left( \frac{N_{A/N_{10\text{bits}}}}{2^{12}} \right) \times \left( \frac{2^{12}}{MAX\_N_{10\text{bits}}} \right) \quad (5.19)$$

Notons que la 2<sup>e</sup> parenthèse de l'équation (5.19) est une constante :

$$coef\_norm_{24\text{bits}} = \frac{2^{12}}{MAX\_N_{10\text{bits}}} \quad (5.20)$$

L'expression (5.19) facilite l'implantation de la routine de transformation du résultat brut de la conversion A/N sur 10 bits en sa valeur correspondante normalisée dans la représentation numérique choisie sur 24 bits.

D'après cette expression, pour obtenir la valeur d'entrée normalisée  $v_i$  du RNA dans la représentation numérique choisie sur 24 bits, il suffit d'effectuer directement une multiplication (24 bits  $\times$  24 bits) du résultat brut de la conversion A/N sur 10 bits par une constante<sup>4</sup> de normalisation exprimée dans la représentation choisie.

Les signaux analogiques du microcontrôleur sont ainsi transformés convenablement pour être appliqués à l'entrée du RNA 3-9-2-1.

## 5.6 Opérations de base

La capacité de calculs élémentaires du microcontrôleur PIC18F452 peut être utilisée pour des calculs de fonctions élaborées grâce à des techniques logicielles et numériques particulières en nous servant des avantages de la notation à point fixe [Hor80], [Pet78], [Tes97] et [Tom88]. Des routines spécifiques peuvent être écrites et implantées en premier lieu pour les opérations de base sur les nombres réels; et en deuxième lieu pour des évaluation des combinaisons linéaires et des fonctions tangentes hyperboliques.

Ces techniques sont présentées dans le Tableau 5-7 pour les opérations d'addition, de soustraction, de multiplication et de division. Une fois implantées, ces routines seront utilisées pour exécuter les calculs plus élaborées qui nécessitent dans bien des cas des algorithmes adaptés.

---

<sup>4</sup> Dans la base 10, le coefficient de normalisation est en fait le résultat de la division de  $2^{12}$  par l'entier  $MAX\_N$ . Il est ensuite facile de convertir ce résultat dans la représentation désirée et de le pré-enregistrer dans le microcontrôleur.

Le Tableau 5-7 résume les techniques logicielles et numériques utilisées dans nos routines d'opérations de calculs.

**Tableau 5-7: Opérations de base sur des nombres réels 24 bits.**

| <b>Opération</b> | <b>Techniques logicielles et numériques pour les routine des opérations</b>  |
|------------------|--|
| Addition         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les nombres réels 24 bits sont représentés sur 3 blocs de 8 bits.</li> <li>• L'instruction d'addition ADDWF est utilisée pour effectuer l'addition du 1<sup>er</sup> bloc de 8 bits à partir du LSB.</li> <li>• L'instruction d'addition avec propagation de la retenue ADDWFC est utilisée pour l'addition du 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> bloc de 8 bits.</li> </ul>  |
| Multiplication   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les nombres réels 24 bits sont représentés sur 6 blocs de 4 bits, ce qui facilite la programmation par l'usage de <i>low</i> et <i>high nipples</i>.</li> <li>• La routine de multiplication 24 bits par 24 bits contient une sous-routine de troncature pour ramener à 24 bits le résultat 48 bits de la multiplication.</li> <li>• Le principe de l'algorithme de multiplication est détaillé en annexe.</li> </ul> |
| Soustraction     | C'est une addition avec un nombre qui est représenté par la complémentation à 2 : $a - b = a + (-b)$ .   |
| Division         | <p>C' est une multiplication avec un nombre inverse : <math>a \div b = a \times \frac{1}{b}</math>.</p> <p>Dans l'implantation, <math>\frac{1}{b}</math> est pré-enregistré dans une table mémoire.</p>  |

## 5.7 Établissement des routines de calculs de combinaisons linéaires et de la fonction tangente hyperbolique

Le module d'étalonnage a pour tâche principale d'effectuer des calculs faisant appel aux opérations sur les paramètres décrits dans les équations (5.3) et (5.4).

Il est plus commode de considérer les deux catégories de calculs suivants.

### 5.7.1 Combinaisons linéaires

Les calculs des termes individuels des combinaisons linéaires de l'équation (5.1)

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j$$

associée au neurone  $k$ , se programment directement à l'aide des routines

d'opérations élémentaires établies précédemment.

### 5.7.2 Calculs de la tangente hyperbolique

Avec les quatre opérations de base, la fonction d'activation tangente hyperbolique  $\varphi(v_k) = \tanh(v_k)$  de l'équation (5.2) est évaluée selon les méthodes d'analyse numérique.

D'après l'équation (5.6) et le Tableau 5-5, la fonction d'activation tangente hyperbolique est définie entre  $[-n_{rna}^{élevé}, +n_{rna}^{élevé}]$  ou explicitement,  $[-372, 372]$ . Ce domaine est trop étendu pour l'évaluation de la fonction  $\tanh(x)$  par le développement de Taylor. Alors, il est plus approprié d'utiliser la technique d'approximation polynomiale sur plusieurs petits intervalles inclus dans le domaine de définition de la fonction. Il est bien entendu qu'il y a plusieurs façon d'effectuer des approximations polynomiales par morceaux. Nous avons choisi les sous-intervalles suivants:

$$\tanh(x) \approx \begin{cases} 1 & , & 4.12 < x \\ p_1^+(x) & , & 2.60 < x < 4.12 \\ p_2^+(x) & , & 1.00 < x < 2.60 \\ p(x) & , & -1.00 < x < 1.00 \\ p_2^-(x) & , & -2.60 < x < -1.00 \\ p_1^-(x) & , & -4.12 < x < -2.60 \\ -1 & , & x < -4.12 \end{cases} \quad (5.8)$$

où :  $p(x)$  est le développement limité de  $\tanh(x)$  au 9<sup>e</sup> ordre, valable entre  $-1$  et  $1$ ,

$$p(x) = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 - \frac{17}{315}x^7 + \frac{62}{2835}x^9 \quad (5.9)$$

et :  $p_1^+(x)$  et  $p_1^-(x)$  sont des polynômes symétriques ( $p_1^-(-x) = -p_1^+(x)$ ) d'ordre 3,

$$\begin{aligned} p_1^+(x) &= 0.0034x^3 - 0.0400x^2 + 0.1586x + 0.7876 \\ p_1^-(x) &= 0.0034x^3 + 0.0400x^2 + 0.1586x - 0.7876 \end{aligned} \quad (5.10)$$

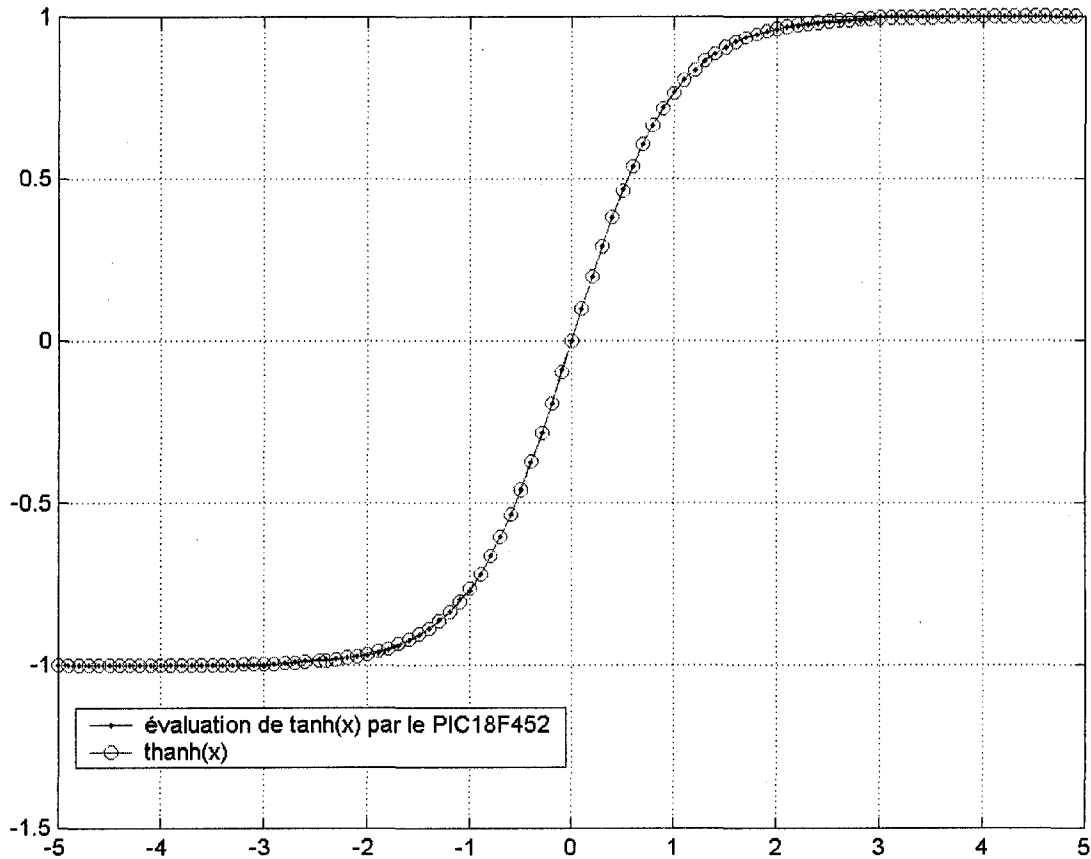
et :  $p_2^+(x)$  et  $p_2^-(x)$  sont des polynômes symétriques ( $p_2^-(-x) = -p_2^+(x)$ ) d'ordre 3,

$$\begin{aligned} p_2^+(x) &= 0.0606x^3 + 0.0438x^2 + 1.0906x - 0.05 \\ p_2^-(x) &= 0.0606x^3 - 0.0438x^2 + 1.0906x + 0.05 \end{aligned} \quad (5.11)$$

L'évaluation de ces polynômes découle directement de l'application des routines des opérations de base.

La Figure 5-3 présente la courbe d'approximation de la fonction tangente hyperbolique ainsi obtenue. L'approximation est convenable pour ce projet, l'erreur globale est de 0.8% . En effet si nous utilisons des développements trop élaborés pour  $\tanh(x)$  comme par exemple des polynômes d'approximation d'ordre très élevé ou des intervalles de définition des polynômes d'approximation trop étroits, la vitesse globale de calculs sera affectée. D'autre part, si le développement de la tangente hyperbolique est trop simple comme par exemple des polynômes d'approximation de bas ordre ou des intervalles de définition des polynômes d'approximation trop larges, la précision de calculs sera insuffisante.





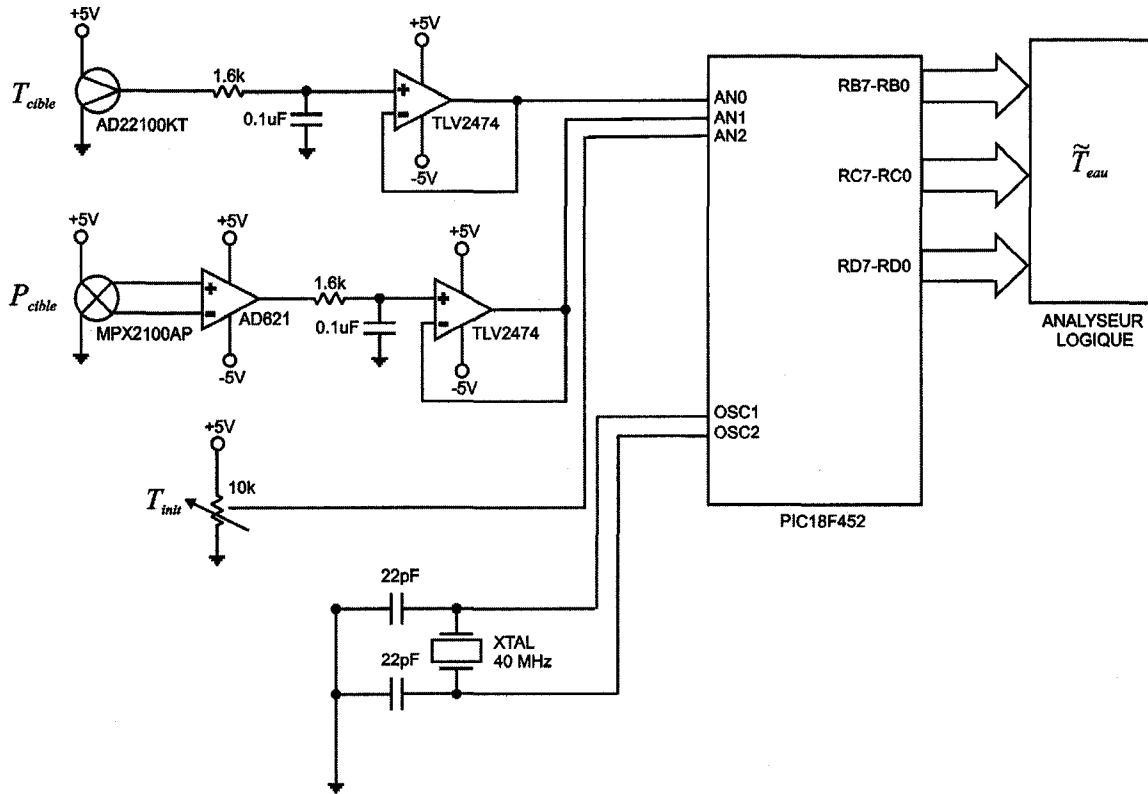
**Figure 5-3: Approximation de la tangente hyperbolique.**

Ainsi, ces techniques logicielles et numériques permettent l'étalonnage par le RNA 3-9-2-1 sur le PIC18F452.

### **5.8 Schéma du circuit d'étalonnage**

Le schéma général des circuits électroniques d'étalonnage est présenté à la Figure 5-4. Les circuits faisant partie du domaine analogique sont classiques. Ce sont des filtres passe-bas RC et des amplificateurs opérationnels en configuration « suiveur ». Les signaux de sorties des amplificateurs s'acheminent directement vers les ports analogiques du PIC18F452 qui est le seul composant principal du domaine numérique.

Les ports analogiques AN0, AN1 et AN2 du PIC18F452 sont les trois entrées analogiques appropriées pour les signaux des capteurs de pression et de température  $P_{cible}$  et  $T_{cible}$  ainsi que pour un signal constant de tension correspondant à  $T_{init}$ . La conversion A/N sur 10 bits s'effectue automatiquement par les modules internes du microcontrôleur.



**Figure 5-4: Schéma du circuit d'implantation du RNA 3-9-2-1.**

En plus des protections thermiques qui sont réalisées mécaniquement (cf. les Images 3-2 et 3-3 en annexe), les lignes de transmission des signaux de tous les capteurs sont protégées électriquement par une mise à la masse (*shielding*). Cette précaution réduit les interactions par émissions électro-magnétiques (EMI).

Considérons maintenant les circuits du domaine analogique<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>Nous avons construits les circuits en nous basant sur les références [Bik98], [Bis00], [Bis01], [Hah99], [Jac98], [Kar00], [Luc96] et [Mal67].

### 5.8.1 Circuits de filtrage

Ce sont des filtres passe-bas RC classique avec une fréquence de coupure de 100 Hz:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.12)$$

Avec  $R = 1.6 \text{ k}\Omega$  et  $C = 10\mu\text{F}$ .

Cette fréquence de coupure assure une atténuation des interférences hautes fréquence et les signaux thermiques produits par les capteurs.

### 5.8.2 Circuits de conditionnement des signaux

Un capteur de pression du type MPX2100AP et un capteur de température du type AD22100KT ont été utilisés pour mesurer les paramètres globaux  $P_{cible}$  et  $T_{cible}$ . Les caractéristiques électriques de ces capteurs sont présentés dans l'annexe. Les Tableau 5-8 et Tableau 5-9 résumant les propriétés importantes pour la conception des circuits de conditionnement de signaux.

**Tableau 5-8: Propriétés des capteurs relatives à la conception des circuits de conditionnement de signaux.**

| Capteur   | Sensibilité  | Impédance de sortie | Paramètre physique à mesurer |
|-----------|--------------|---------------------|------------------------------|
| MPX2100AP | 0.04 mV/mbar | 1.8 k $\Omega$      | 0 à 1000 mbar                |
| AD22100KT | 22.5 mV/°C   | 41 k $\Omega$       | -50 à 150 °C                 |

**Tableau 5-9: Propriétés des ports analogiques du PIC18F452 relatives à la conception de circuits de conditionnement de signaux.**

| Ports d'entrées du PIC18F452 | Impédance d'entrées | Tension minimale | Tension maximale |
|------------------------------|---------------------|------------------|------------------|
| AN0                          | 2.5 k $\Omega$      | 0.061 V          | 4.85 V           |
| AN1                          | 2.5 k $\Omega$      | 0.061 V          | 4.85 V           |
| AN2                          | 2.5 k $\Omega$      | 0.061 V          | 4.85 V           |

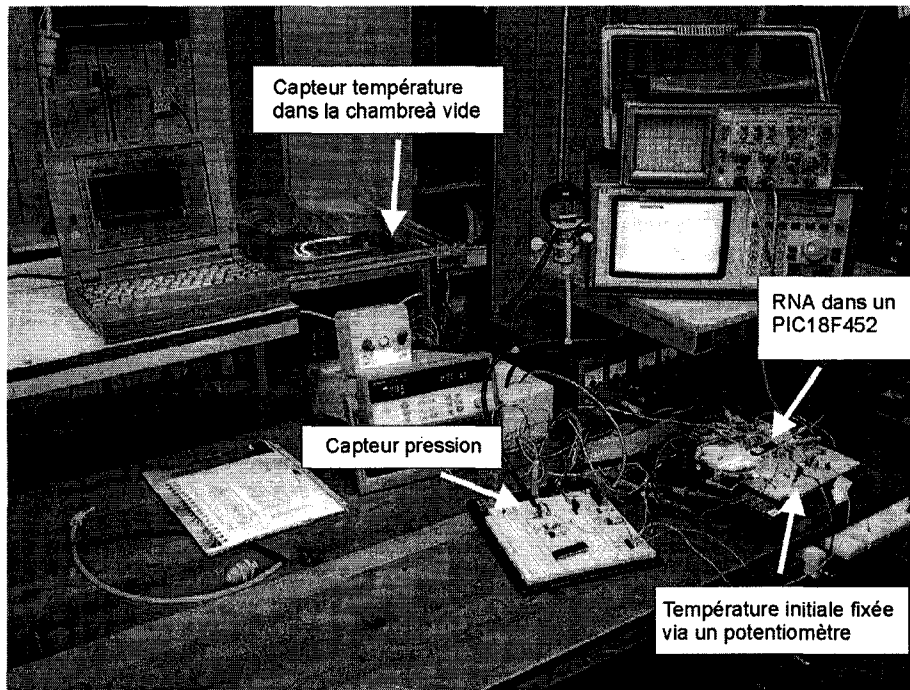
Selon les données des Tableaux 5-8 et 5-9, il nécessite évidemment des circuits de conditionnement des signaux bruts provenant des capteurs. Les conditionnements requis pour des capteurs sont détaillés dans le Tableau 5-10.

**Tableau 5-10: Types de conditionnement pour les signaux bruts des capteurs.**

| Capteur                    | Type de conditionnement   |
|----------------------------|---|
| MPX2100AP<br>(pression)    | <p>Amplification :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplificateur d'instrumentation AD621.</li> <li>• Gain de 100, sensibilité amplifiée = 4 mV/mbar.</li> <li>• Erreur maximale sur le gain : 0.15%.</li> <li>• Impédance de sortie : 1 M<math>\Omega</math>.</li> </ul> <p>Adaptation d'impédance</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplificateur opérationnel <i>rail-to-rail</i> TLV2474 en montage suiveur.</li> <li>• Impédance de sortie : 0.6<math>\Omega</math>.</li> </ul> |
| AD22100KT<br>(température) | <p>Adaptation d'impédance</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplificateur opérationnel <i>rail-to-rail</i> TLV2474 en montage suiveur.</li> <li>• Impédance de sortie : 0.6<math>\Omega</math>.</li> </ul>   |

Les circuits électroniques ainsi réalisés permettent une transmission maximale des signaux bruts des capteurs aux ports d'entrées du microcontrôleur PIC18F452.

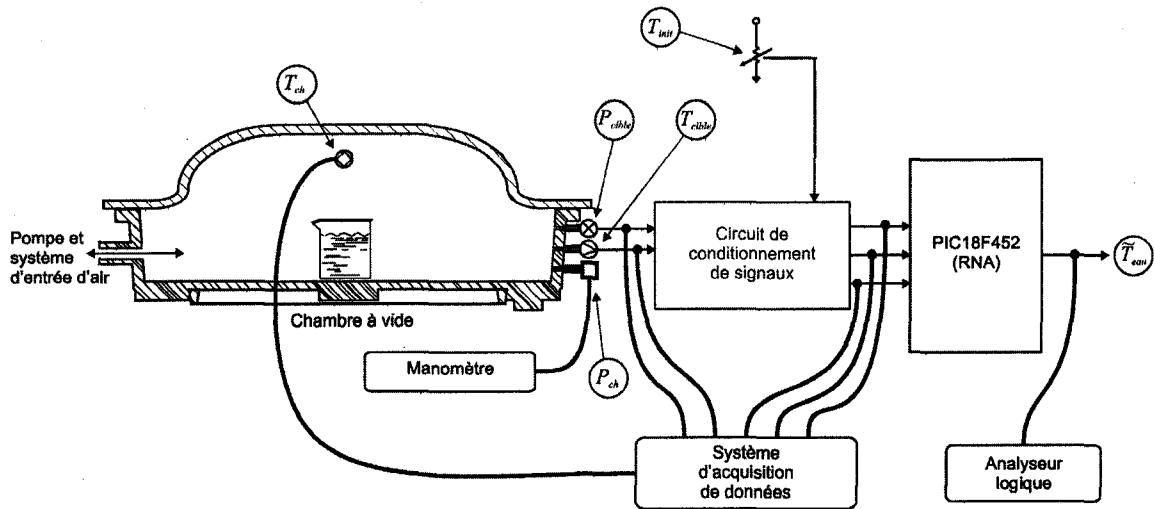
## 5.9 Tests et la validation de l'implantation matérielle



**Image 5-1: Matériels implantés pour l'étalonnage des capteurs de pression et de température.**

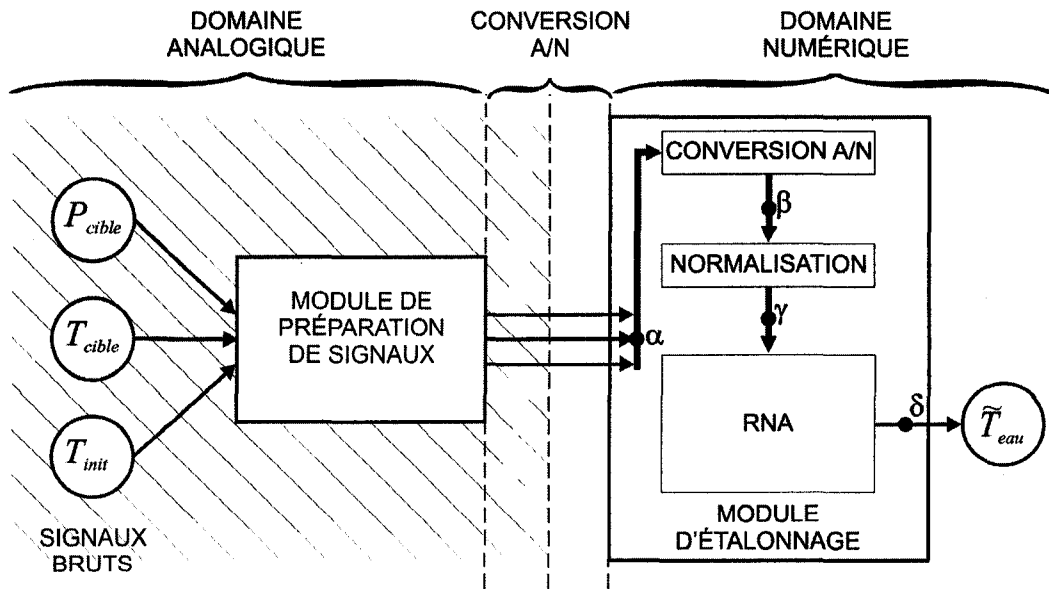
La validation de notre technique de mesure sans contact à l'aide de notre modèle de RNA 3-9-2-1 implanté dans le microcontrôleur 8-bits PIC18F452 est démontrée à l'aide des conditions expérimentales présentées sur l'Image 5-1. Nous y distinguons la chambre à vide en arrière plan qui est modifiée dans sa version commerciale afin de recevoir des capteurs mesurant les paramètres globaux ainsi que des capteurs mesurant des paramètres thermodynamiques et référentiels.

La comparaison de la lecture pour des paramètres spécifiques et référentiels ( $v_{Peau}$ ,  $v_{Teau}$ ,  $P_{ref}$ ,  $T_{ref}$ ) avec les valeurs de ces mêmes paramètres thermodynamiques estimées par le RNA 3-9-2-1 établira la validité de notre technique de mesure sans contact. Le schéma bloc de l'Image 5-1 est présenté sur la Figure 5-5, et les détails relatifs aux capteurs sont identiques à ceux des conditions expérimentales décrites dans le chapitre 2.



**Figure 5-5: Schéma bloc de l'implantation matérielle de notre technique de mesure intégrée dans nos conditions d'application.**

En plus des lectures des capteurs, nous recueillons aussi des données de vérification à différents points de nos circuits d'étalonnage.



**Figure 5-6: Points d'acquisition de données pour la vérification des résultats fournis par la technique de mesure sans contact.**

Ainsi, nous avons 3 ensembles de données expérimentales suivantes:

1. L'ensemble de données pour les paramètres globaux.
2. L'ensemble de données pour les paramètres spécifiques et référentiels.
3. L'ensemble de données de vérification.

Ces données s'obtiennent aux divers points de test sur le circuit électronique global. La Figure 5-6 présente un schéma illustrant les points tests et d'acquisition des données dont les explications se trouvent dans le Tableau 5-11.

**Tableau 5-11: Points d'acquisition de données de validation du RNA 3-9-2-1.**

| Point de test | Description  | Instrument d'acquisition | Lieu d'acquisition                 |
|---------------|--|--------------------------|------------------------------------|
| $\alpha$      | Signaux analogues conditionnés des capteurs de pression et de température. | Agilent 34970A           | Ports AN0, AN1 et AN2 du PIC18F452 |
| $\beta$       | Résultat de conversion A/N des signaux analogues.                          | HP 1583B                 | Ports B,C et D du PIC18F452        |
| $\gamma$      | Résultat de normalisation des signaux numérisé                             | HP 1583B                 | Ports B,C et D du PIC18F452        |
| $\delta$      | Sortie du RNA  | HP 1583B                 | Ports B,C et D du PIC18F452        |
| $\epsilon^6$  | Mesures de la pression de référence  | Psi-Tronix               | Intérieur de la chambre à vide     |
| $\phi^7$      | Mesures de température de référence  | Agilent 34970A           | Intérieur de la chambre à vide     |

<sup>6</sup> Le point d'acquisition  $\epsilon$  se trouve dans la chambre à vide et n'apparaît pas sur la Figure 5-6.

<sup>7</sup> Le point d'acquisition  $\phi$  se trouve dans la chambre à vide et n'apparaît pas sur la Figure 5-6.

## 5.10 Résultats obtenus

Plusieurs expériences similaires à celle du chapitre 3 ont été effectuées avec des échantillons de 30 ml d'eau à plusieurs températures initiales. Cette fois, les données obtenues servent à l'établissement de la validité de notre technique de mesure sans contact. Les courbes représentant l'évolution du changement de phase d'eau obtenues par les capteurs des paramètres thermodynamiques sont tracées et comparées avec les courbes obtenues par les valeurs d'estimation du RNA 3-9-2-1 à partir des capteurs des paramètres globaux. Ces courbes se superposent dans la limite d'erreurs expérimentales. Les Figures 5-7 montrent un nombre de courbes typiques obtenues avec des échantillons d'eau à différentes températures initiales. Dans l'ensemble, 96% des résultats d'estimation fournis par le RNA présentent une erreur %FS inférieure ou égale à 4%. La Figure 5-8 illustre cette performance du RNA. Nous observons que l'erreur d'estimation de  $T_{eau}$  est plus grande dans les zones de basse pression. En effet, dans l'intervalle [200, 1013 mbar], l'estimation de  $T_{eau}$  présente 4% d'erreur %FS par rapport à la lecture du capteur de température spécifique  $T_{eau}$  tandis que dans l'intervalle [2,200 mbar], l'estimation de  $T_{eau}$  présente 6% d'erreur %FS par rapport à la lecture du capteur de température spécifique  $T_{eau}$ . En fait, à basse pression, le changement de phase est déjà avancé et se manifeste par des éclaboussements d'eau. Dans cette zone, le phénomène thermodynamique est imprédictible.

L'estimation de la pression partielle de l'eau  $P_{eau}$  ne présente pas de grande difficulté car nous savons déjà que cela est dû à la relation linéaire entre  $P_{eau}$  et  $P_{cible}$ . L'estimation de  $P_{eau}$  est obtenue avec une erreur inférieure à 0.5%FS.

Notons que ces limites d'erreurs sont semblables<sup>8</sup> à celles des études de simulation du chapitre 4.

---

<sup>8</sup> Les superpositions des courbes obtenues par le RNA avec les courbes expérimentales sur les Figure 5-7 ne sont pas aussi explicites que les superpositions observées sur la Figure 4-4, celles-ci n'étant pas tracées à



Nous résumons ces observations dans le Tableau 5-12.

**Tableau 5-12: Performance de l'implantation matérielle de la technique de mesure sans contact.**

| Description  | Spécification  |
|--|--|
| Erreur du RNA 3-9-2-1 sur l'estimation de : <ul style="list-style-type: none"> <li>• La pression de l'eau <math>P_{eau}</math></li> <li>• La température de l'eau <math>T_{eau}</math></li> </ul>  | $< 0.5\%$<br>$< 4 \%$<br>(96% des cas)                       |
| Erreur dans la conversion A/N et normalisation sur : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les mesures de température</li> <li>• Les mesures de pression</li> </ul>   | $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$<br>$\pm 0.12 \text{ mbar}$         |
| Caractéristiques relatives au microcontrôleur <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcontrôleur 8-bits utilisé pour l'implantation</li> <li>• Mémoire nécessaire pour l'implantation du RNA</li> <li>• Temps de calcul pour 1 cycle d'estimation à une cadence d'horloge de 40 MHz</li> </ul> | PIC18F452<br>7 KB<br>1.125 ms                                |
| Caractéristiques des paramètres d'application <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plage d'application de la température initiale de l'eau</li> <li>• Plage d'application de la pression</li> </ul>  | $[5, 85]$<br>en $^{\circ}\text{C}$<br>$[2, 1013]$<br>en mbar |

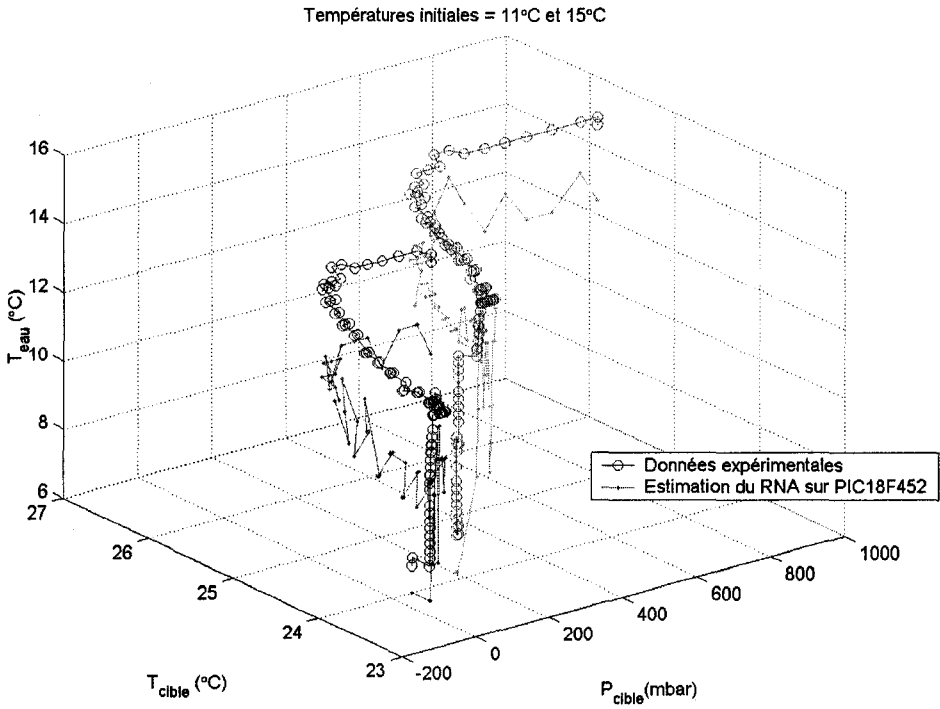
Ainsi, nous avons démontré que les résultats obtenus par la technique d'étalonnage à l'aide de la méthode des RNA possèdent une précision amplement suffisante pour permettre une application pratique dans des appareils commerciaux.

De plus, l'implantation de cette technique dans un microcontrôleur 8-bits est possible et la performance du PIC18F452 est adéquate pour permettre un étalonnage en

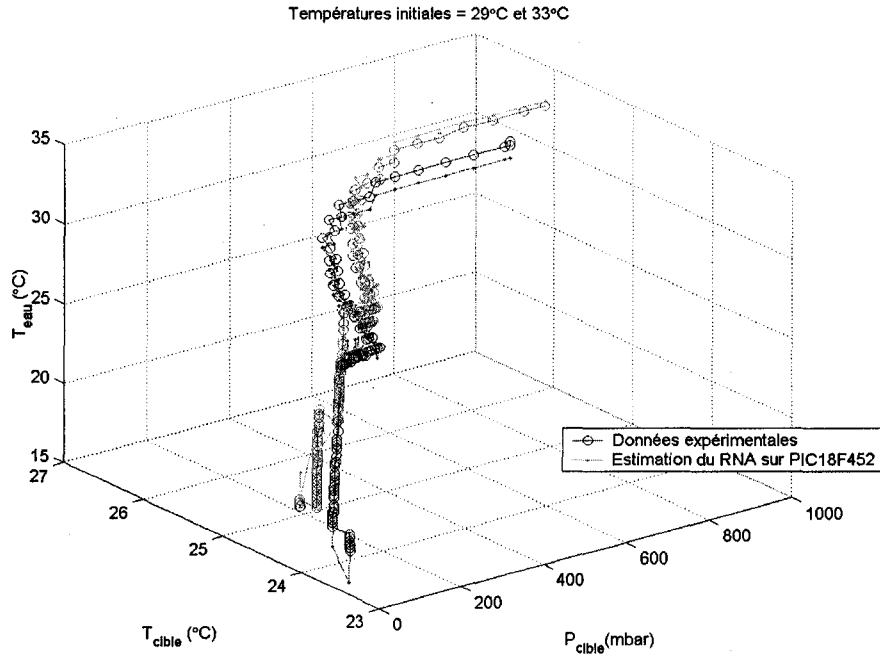
---

la même échelle. Un grossissement de la Figure 4-4 montre des superpositions de courbes similaires à celles obtenues sur les Figures 5-7.

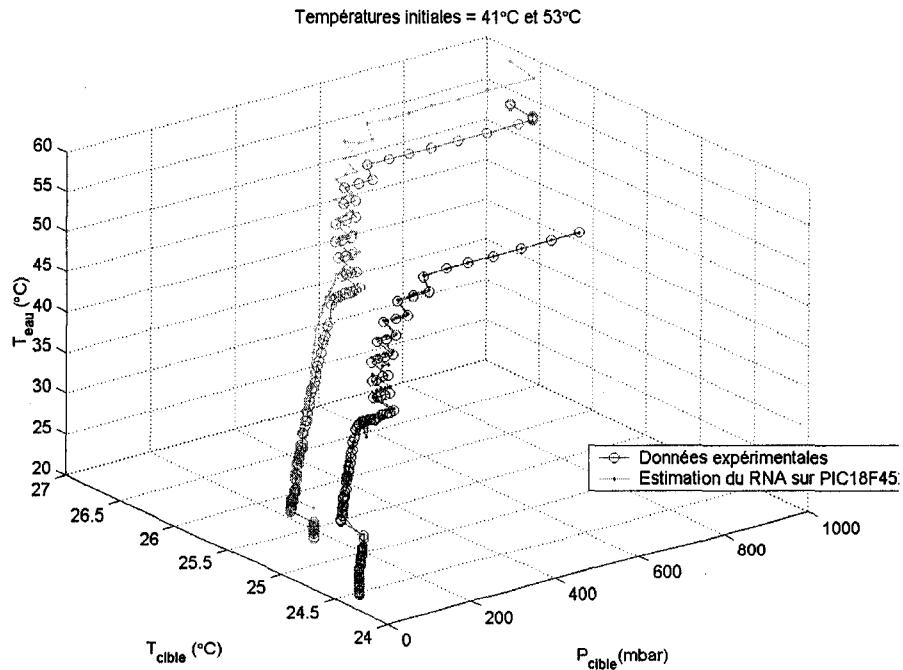
temps réel d'un phénomène physique relativement lent, de l'ordre de quelques secondes, comme le phénomène d'ébullition d'eau mise sous vide.



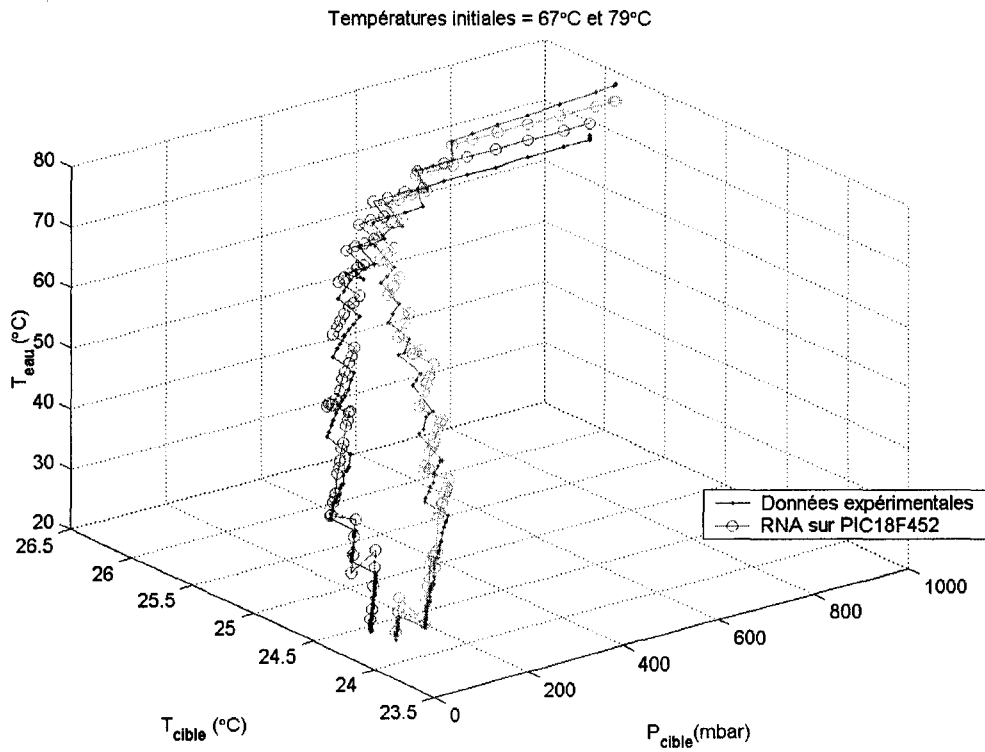
**Figure 5-7a: Courbes de changement de phase de l'eau obtenues par l'étalonnage des capteurs de pression et de température ( $T_{\text{init}} = 11^\circ\text{C}$  et  $15^\circ\text{C}$ ).**



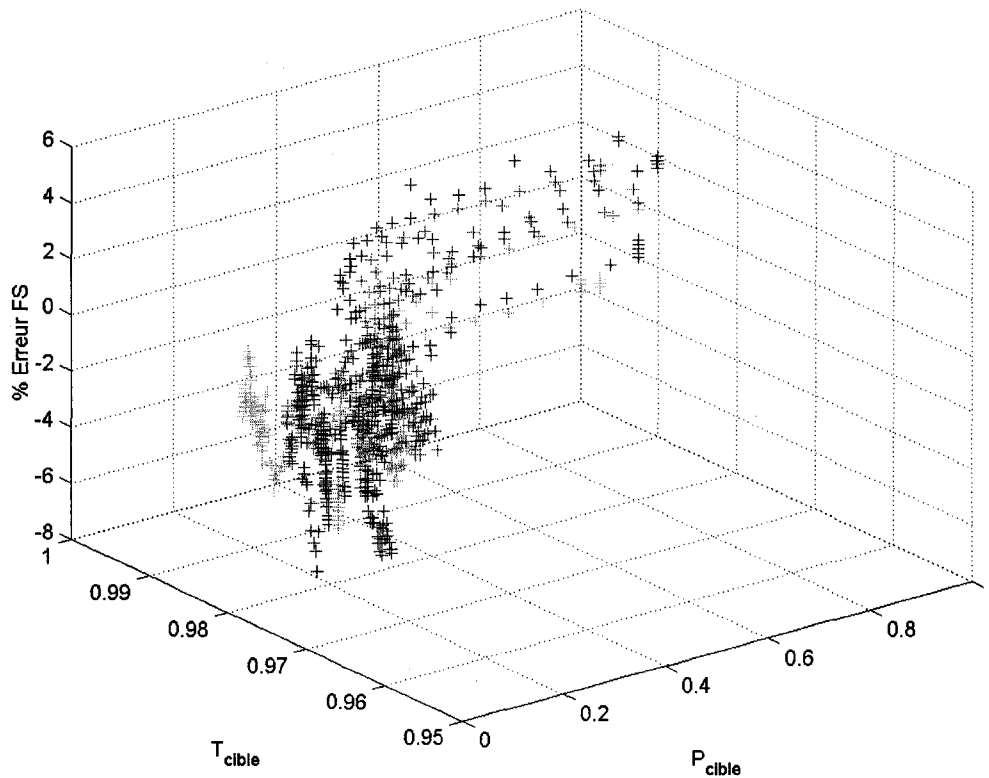
**Figure 5-7b: Courbes de changement de phase de l'eau obtenues par l'étalonnage des capteurs de pression et de température ( $T_{init} = 29^{\circ}\text{C}$  et  $33^{\circ}\text{C}$ ).**



**Figure 5-7c: Courbes de changement de phase de l'eau obtenues par l'étalonnage des capteurs de pression et de température ( $T_{init} = 41^{\circ}\text{C}$  et  $53^{\circ}\text{C}$ ).**



**Figure 5-7d: Courbes de changement de phase de l'eau obtenues par l'étalonnage des capteurs de pression et de température ( $T_{init} = 67^\circ\text{C}$  et  $79^\circ\text{C}$ ).**



**Figure 5-8 : Limites d'erreur d'étalonnage par le RNA 3-9-2-1.**

### **5.11 Conclusion**

L'implantation matérielle de notre procédure d'étalonnage basée sur un modèle de RNA multicouches 3-9-2-1 dans un microcontrôleur 8 bits est possible grâce à des techniques logicielles et numériques particulières. En nous servant des avantages de la notation à point fixe, nous avons développé des algorithmes permettant l'extension de la capacité du microcontrôleur 8-bits PIC18F452 aux calculs élaborés de combinaisons linéaires et l'évaluation de fonctions  $\tanh(x)$ . Tous les développements logiciels requièrent 7KB de mémoire dans le microcontrôleur.

Avec des capteurs et des circuits de conditionnement de signaux convenables, ces matériels se prêtent à l'étalonnage de capteurs pour l'estimation des paramètres thermodynamiques caractérisant le changement de phase de l'eau sans contact. Sous la cadence d'horloge de 40 MHz, un cycle d'étalonnage est d'environ 1.125 ms, ce qui est suffisamment rapide pour un cycle typique de mise sous vide de l'eau qui dure environ 40 secondes. L'étalonnage est valide dans la limite d'erreur acceptable : la pression partielle de vapeur d'eau est estimée avec une erreur inférieure à 0.5% pour une plage de pression appliquée entre 1013 et 2 mbar; et la température de l'eau est estimée, dans 96% des cas, avec une erreur inférieure à 4% pour une plage de température variant entre 5 et 85°C.

# *Conclusion générale*

La technique de mesure sans contact développée dans ce travail fait appel aux technologies récentes de la méthode des RNA, des capteurs, des microcontrôleurs et des logiciels.

En premier lieu, nous avons démontré la capacité du RNA 3-9-2-1 pour l'étalonnage des capteurs et sa possibilité d'implantation dans un microcontrôleur 8-bits. En outre, nous avons réalisé cela avec des composants électroniques commerciaux universellement accessibles dont le PIC18F452 (Microchips Technology) et les capteurs de pression MPX2100AP (Motorola) et de température AD22100KT (Analog Device).

En deuxième lieu, ce travail révèle des aspects intéressants du RNA implanté.

1. Ce RNA est flexible et modifiable pour d'autres applications réelles et variées. En effet, nous avons développé des algorithmes et des procédures logiciels de supports et d'extensions de la capacité de calculs du microcontrôleur 8-bits de telle façon que celui-ci soit adaptable à une variété d'application. Pour cela, il suffit de changer les paramètres de branchements conformément à la nouvelle structure d'un RNA multicouche et de mettre à jour la table mémoire des poids synaptiques.

2. L'existence de corrélations bien définies entre des paramètres globaux et des paramètres spécifiques, soient les paramètres thermodynamiques dans ce travail, suffit pour rendre la méthode des RNA applicable. Dans ce cas, la méthode des RNA est peu intensive au point de vue des matériels électroniques.
3. Il est évident qu'une méthode de mesure indirecte (sans contact) comme celle de ce travail peut propager des erreurs dans le processus d'extraction et d'estimation. Cependant, des précautions et des designs bien étudiés réduisent le risque d'erreur et augmentent la performance du RNA.
4. Dans le développement de cette technique de mesure sans contact, le domaine numérique est indépendant du domaine analogique. En d'autres termes, le RNA pourrait être adapté et appliqué à d'autres situations pourvues que le signal d'entrée demeure égal ou inférieur à 3 et qu'une seule sortie soit requise.

Ainsi, nous espérons que ce travail ouvre un champ d'application plus vaste. Nous espérons aussi que le suivi du changement de phase de l'eau mise sous vide est un exemple intéressant qui démontre la performance de la méthode des RNA dans une technique de mesure sans contact.



## Références

- [Ano92] “Sound power measurement”, *Application Note 1230*, Hewlett-Packard, 1992.
- [Ben02] W. Benenson, J. W. Harris, H. Stocker, H. Lutz, *Handbook of physics*, A.I.P. Press, Springer, 2002, chap. 19.
- [Bik98] E. Bicking, “Fundamentals of pressure sensor technology”, *Sensors*, Nov. 1998, pp. 30-43.
- [Bis00] J. Bishop, “Thermistor temperature transducer-to-ADC application”, *Analog application journal*, May 2000, pp. 44-47.
- [Bis01] J. Bishop, “Pressure transducer-to-ADC application”, *Analog Application Journal*, Feb. 2002, pp. 38-40.
- [Bur89] G. Bureau et J.-L. Multon, *L’emballage des denrées alimentaires de grande consommation*, Technique et Documentation – Lavoisier, 1989, chap. 26,27.
- [Cho00] J.I.-T. Chong, D. CC Lam and P. Tong, “Measurement of water evaporation for popcorning”, *Intern. Symp. Adv. Pack. Mater.*, 2000, pp. 131-134
- [Hah99] A. Hahn, “Application of rail-to-rail operational amplifiers”, *Application Report*, Texas Instrument, Dec. 1999.
- [Hay99] S. Haykin, *Neural Network: a comprehensive foundation*, Prentice Hall, 1999, chap. 1,2,3,4.
- [Hor80] P. Horowitz and W. Hill, *The art of electronics*, Cambridge university press, 1980, chap. 1,3,7,8.
- [Jac98] E. Jacobsen and J. Baum, “The A-B-C of signal-conditioning amplifier design for sensor applications” (AN1525), *Motorola sensor device data*, 1998, pp. 3.267-3.273
- [Kar00] J. Karki, “Fully differential amplifiers”, *Analog application journal*, Texas Instruments, Aug. 2002, pp. 38-41
- [Kla02] K.B. Klaassen, *Electronic measurement and instrumentation*, Cambridge, 2002, chap. 1, 2, 3.
- [Len64] A. Lentin et J. Rivaud, *Leçons d’algèbre moderne*, Vuibert, 1964. Chap 1.

- [Luc96] “Stability and Thermal Hysteresis of silicone pressure sensor”, *Lucas NovaSensor Application Note 1*, Sept. 1996.
- [Mal67] A. P. Malvino, *Electronic instrumentation fundamentals*, McGraw-Hill, 1967, chap. 2.
- [Mor91] R.Z. Morawski, L. Lemire, M. Ben Slima et A. Barwicz, “The use of spline for static calibration of electronic measuring systems – A comparative study”, *Proc. IEEE Instrum. & Meas. Technology Conf.* (Atlanta, 14-16 Mai 1991).
- [Moo83] J. H. Moore, C. C. Davis, M. A. Coplan, *Building scientific apparatus*, Addison-Wesley, 1983, chap. 1,3,6.
- [Pat99] J.C. Patra and A. van den Bos, “Modeling and development of an ANN-based smart pressure sensor in a dynamic environment”, *Measurement*, vol. 26, pp. 249-262, 1999.
- [Pat00] J. C. Patra, A. C. Kot et G. Panda, “An intelligent pressure sensor using neural networks”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol 49, No. 4, Août 2000, pp. 829-834
- [Per00] J.M. D. Pereira, O. Postolache, P. M. B. S. Girão, et M. Cretu. “Minimizing temperature drift errors of conditioning circuits using artificial neural networks”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 49, No 5, pp.1122-1127, Oct. 2000.
- [Pet78] J.L. Peterson, *Computer organization and assembly language programming*, Academic Press, 1978, chap. 1.
- [Pri00] J.C. Principe, N.R. Euliano and W.C. Lefebvre, *Neural and adaptive systems: fundamentals through simulations*, Wiley & sons, 2000, chap. 1,2,3.
- [Rei65] F. Reif, *Fundamentals of statistical and thermal physics*, McGraw-Hill, 1965, chap.8.
- [Rey00] J.K. Reynolds, D. Catling, R. C. Blue, N. I. Maluf, T. Kenny, “Packaging a piezoresistive pressure sensor to measure low absolute pressures over a wide sub-zero temperature range”, *Sens. Actuators*, 83 (2000), 142-149.
- [Rie93] M. Riedmiller and H. Braun, “A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm”, *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, San Francisco, CA, April 1993.
- [Sea75] F.W. Sears et G.L. Salinger, *Thermodynamics, kinetics theory, and statistical thermodynamics*, Addison-Wesley, 1975, chap. 3,6,7,8,9.

- [Smi71] Smithsonian Meteorological Table 6<sup>th</sup>, ed. (1971).
- [Tes97] F.J. Testa, "Fixed point routines" (AN617), Microchips Technology, 1997, pp. 1-14, 243-245
- [Tom88] W. J. Tompkins and J.G. Webster, Interfacing sensors to the IBM PC, Prentice Hall, 1988, chap. 1,2,5.
- [Wil01] N. B. Wilding, "Computer simulation of fluid phase transitions", *Am. J. Phys.*, Vol. 69, No 11, pp.1147-1155, Nov. 2001.

## *Analyse thermodynamique du changement de phase d'un liquide mis sous vide*

Nous avons observé qu'un liquide mis sous vide subit un changement de phase ainsi qu'une baisse rapide de température. Nous analysons ce phénomène à l'aide de la théorie thermodynamique. Dans cette étude, nous examinons le changement de phase de l'eau, une composante importante dans la plupart des produits mis sous vide.

### Conditions expérimentales

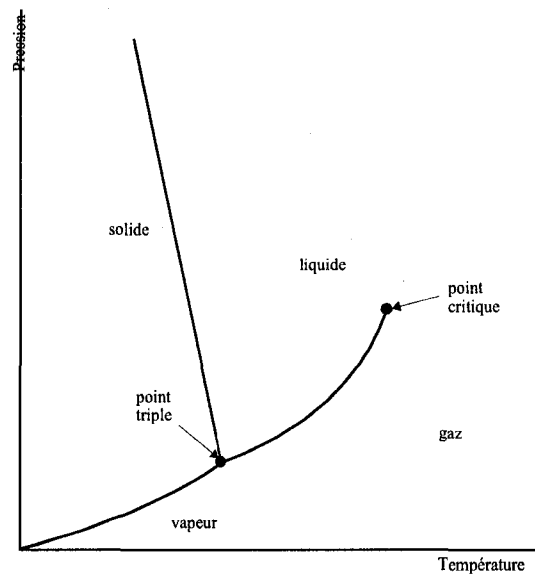
Soit une masse  $m$  d'eau à l'état liquide, dans une chambre à vide. Notre système, initialement à la pression atmosphérique (1000 mbar) et à température ambiante (20°C), est soumis à une diminution de pression allant jusqu'à 2 mbar. Le temps pour mettre le système sous vide est relativement court par rapport au temps de transfert thermique et radiant de l'environnement avec la chambre à vide. Nous pouvons donc considérer le système comme isolé.

Or, en première approximation, le système est considéré *adiabatique* car la transformation n'implique aucun transfert d'énergie avec l'environnement de la chambre à vide.

A priori, le système *n'est pas isotherme*.

### Analyse thermodynamique

D'après le diagramme de phase  $P$ - $T$  de l'eau (cf. la Figure A1-1), nous voyons qu'une diminution de la pression entraîne un changement de phase liquide  $\rightarrow$  vapeur.



**Figure A1-1 : Diagramme de phase de l'eau.**

Pour qu'une petite quantité de masse  $\Delta m$  d'eau puisse passer de la phase liquide à la phase gazeuse, la masse  $\Delta m$  doit absorber une quantité d'énergie de vaporisation  $\Delta Q$  égale à :

$$\Delta Q = l_{l \rightarrow v} \Delta m \quad (\text{A1.1})$$

où  $l_{l \rightarrow v}$  est la chaleur latente de vaporisation.

Cette énergie  $\Delta Q$  provient d'une baisse de température  $\Delta T$  de la masse  $m$  en entier et s'écrit :

$$\Delta Q = mC\Delta T \quad (\text{A1.2})$$

où  $C$  est la chaleur spécifique de l'eau.

De (A1.1) et (A1.2), nous avons donc :

$$l_{l \rightarrow v} \Delta m = m C \Delta T \quad (\text{A1.3})$$

Nous remarquons que la diminution de  $\Delta m$  au premier membre de l'équation est accompagnée d'une diminution de  $\Delta T$  au second membre, et vice-versa. Ainsi, les conventions de signes se réfèrent aux échanges d'énergie des équations thermodynamiques et ces conventions sont bien respectées dans l'équation (A1.3).

En notations infinitésimales, nous avons:

$$\frac{dm}{m} = \frac{C dT}{l_{l \rightarrow v}} \quad (\text{A1.4})$$

que nous pouvons intégrer entre l'état initial ( $m_0, T_0$ ) et l'état final ( $m, T$ ) :

$$\ln\left(\frac{m}{m_0}\right) = \frac{C}{l_{l \rightarrow v}} (T - T_0) \quad (\text{A1.5})$$

En introduisant  $\Delta m_{vap} = m_0 - m$ , la quantité de masse d'eau évaporée lors de la transformation, nous avons alors :

$$\ln\left(1 - \frac{\Delta m_{vap}}{m_0}\right) = \frac{C}{l_{l \rightarrow v}} (T - T_0) \quad (\text{A1.6})$$

dont nous pouvons développer le logarithme népérien car  $\Delta m_{vap}/m_0 \ll 1$  :

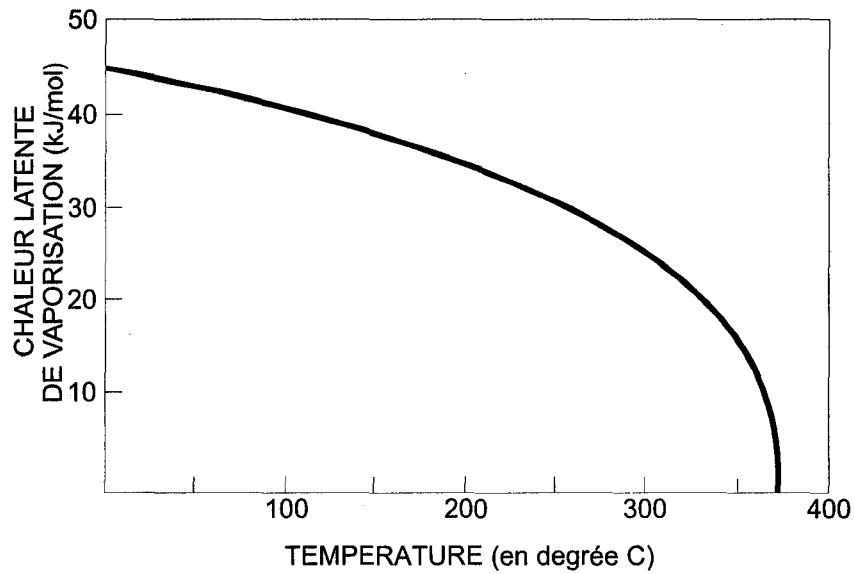
$$\ln(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots \quad x \ll 1 \quad (\text{A1.7})$$

Ainsi, au premier ordre, nous obtenons :

$$\frac{\Delta m_{vap}}{m_0} = \frac{C}{l_{l \rightarrow v}} (T_0 - T) \quad (\text{A1.8})$$

Cette équation exprime la variation de la masse d'eau évaporée en fonction de la variation de température.

D'après la Figure A1-2 (cf. [Sea75]), Nous pouvons considérer  $C$  et  $l_{l \rightarrow v}$  constants puisque notre étude se fait sur un intervalle de température très petit, de l'ordre de 20°C.



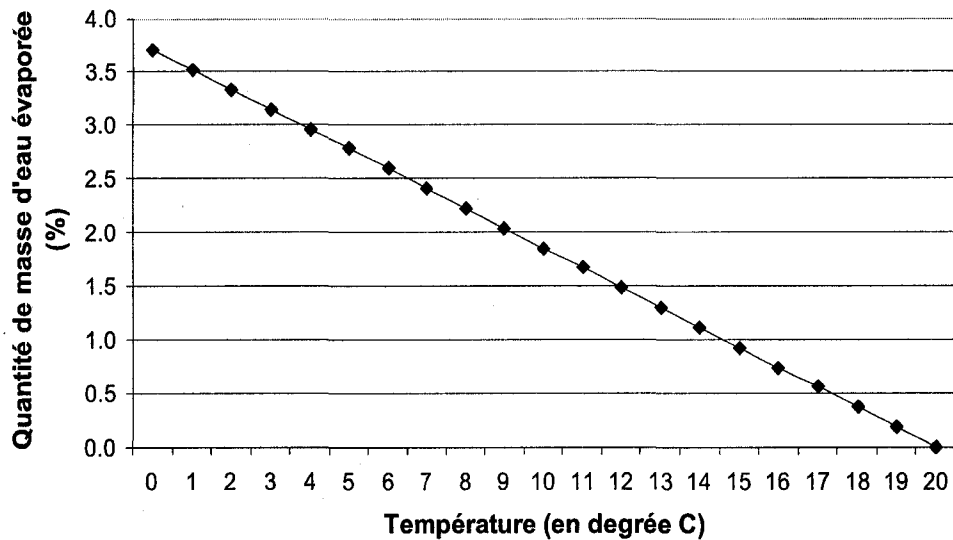
**Figure A1-2 : Chaleur latente de vaporisation de l'eau en fonction de la température (cf. [Sea75]).**

Nous appliquons donc les valeurs numériques :

$$C = 4.2 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$l_{l \rightarrow v} = 22.6 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$$

qui nous permet de tracer la variation de la masse d'eau évaporée lorsque la température varie entre 0°C et 20°C (cf. la Figure A1-3).



**Figure A1-3 : Variation de la quantité de masse d'eau évaporée lorsqu'une température finale comprise entre 0 °C et 20 °C est atteinte.**

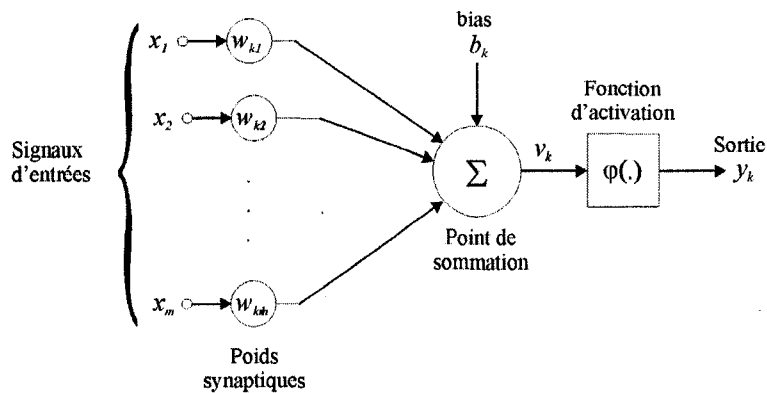
**Ainsi, lorsque la température atteint le point de congélation, seulement 3,7% de la masse d'eau liquide s'est évaporée.**

Ce résultat correspond aux expériences effectuées en laboratoire, où nous observons une perte de masse d'environ 5%. Lors de l'expérimentation, une perte supplémentaire de masse est due à différentes manipulations tels le retour d'air et l'ouverture du couvercle laquelle met le système étudié en contact avec le milieu extérieur.



## *Simplification d'un modèle de neurone pour identification des opérations de base*

Le modèle simple d'un neurone est présenté sur la Figure A2-1.



**Figure A2-1: Modèle simple de neurone.**

Globalement, un neurone peut être représenté par deux éléments : (i) une combinaison linéaire de sortie  $v_k$  et (ii) une transformation affine appliquée à  $v_k$ , cela est traduit par la paire d'équation suivante :

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j \tag{A2.1}$$

et

$$y_k = \varphi(v_k + b_k) \quad (\text{A2.2})$$

où

- $\{x_j\}_{j=1}^m$  sont les signaux d'entrées du neurone  $k$ ,
- $\{w_{kj}\}_{j=1}^m$  sont les poids du neurone  $k$ ,
- $\varphi(\cdot)$  est la fonction d'activation,
- $b_k$  est le biais.

La fonction d'activation a pour rôle de limiter l'amplitude de sortie du neurone sur une plage de valeurs finies (e.g. les intervalles fermés  $[0,1]$  ou  $[-1,1]$ ).

Le biais, noté  $b_k$ , est un paramètre externe introduit dans le modèle de neurone présenté sur la Figure A2-1. Le biais a pour effet d'augmenter ou de diminuer la valeur d'entrée  $(v_k + b_k)$  de la fonction d'activation selon que  $(v_k + b_k)$  est positif ou négatif. Il est à noter que son rôle, détaillé dans des livres de référence comme [Hay99] ou [Pri00], est relativement complexe. Mentionnons toutefois que sa présence introduit le caractère *affine* à la transformation appliquée sur  $v_k$ . Intuitivement, le biais permet donc de déplacer  $v_k$  dans une région plus ou moins sensible de la fonction d'activation. En outre, si le neurone est considéré au sein d'un RNA multicouche, le signal de sortie  $y_k$  devient un signal d'entrée d'un neurone d'une couche subséquente. Ainsi, le biais ne peut être négligé et sa présence est essentielle.

Dans le but de simplifier l'implantation d'un neurone (et donc d'un réseau de neurones), le modèle de neurone peut se reformuler, de façon mathématiquement équivalente, en introduisant un nouveau signal d'entrée  $x_0 = +1$  pondéré par son poids  $w_{k0} = b_k$ . Dans ce cas, la paire d'équations peut se ré-écrire par :

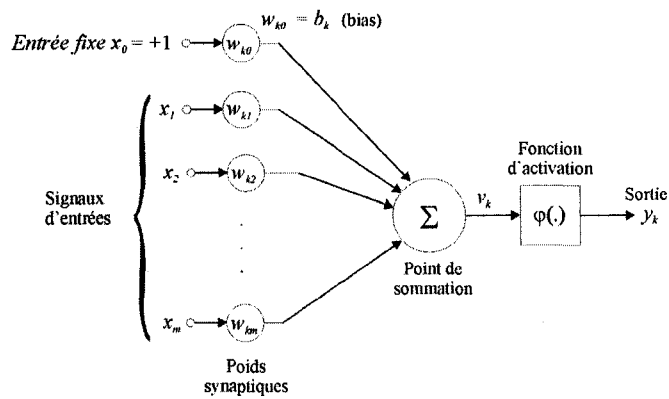
$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j \quad (\text{A2.3})$$

et

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (\text{A2.4})$$

Cette forme est plus simple à manipuler puisque le caractère affine devient implicite dans la transformation  $y_k$ . Cette forme a été utilisée pour l'implantation du RNA dans ce projet.

La Figure 2 montre le modèle de neurone formulé par les équations (A2.3) et (A2.4).



**Figure A2-2: Modèle de neurone avec une entrée fixe (biais).**

### *Multiplication 24 bits par 24 bits dans une représentation numérique choisie*

#### Multiplication

Le microcontrôleur PIC18F452 possède déjà l'instruction MUL qui exécute la multiplication de deux nombres de 8 bits. La routine de multiplication des nombres réels 24 bits utilisée pour l'implantation du RNA est basée sur des documents techniques fournis par Microchips Technology [Tes97].

La multiplication est basée sur le principe suivant :

Soient deux nombres réels, AARGB et BARGB, représentés sur 24 bits en utilisant la syntaxe binaire, le produit de AARGB par BARGB s'écrit

$$\text{AARGB} \leftarrow \text{AARGB} * \text{BARGB}$$

$$\text{où, } \text{AARGB} = \text{AARGB0:AARGB1:AARGB2} \quad (\text{AARGB}<23> = \text{msb})$$

$$\text{BARGB} = \text{BARGB0:BARGB1:BARGB2} \quad (\text{BARGB}<23> = \text{msb})$$

$$(\text{AARGB0} \cdot 2^{16} + \text{AARGB1} \cdot 2^8 + \text{AARGB2} \cdot 2^0) \cdot$$

$$(\text{BARGB0} \cdot 2^{16} + \text{BARGB1} \cdot 2^8 + \text{BARGB2} \cdot 2^0) =$$

$$\begin{aligned}
& (AARGB0 :BARGB1 + AARGB1 :BARGB0) \cdot 2^{24} + \\
& (AARGB0 :BARGB2 + AARGB1 :BARGB1 + AARGB2 :BARGB0) \cdot 2^{16} + \\
& (AARGB1 :BARGB2 + AARGB2 :BARGB1) \cdot 2^8 + \\
& (AARGB2 :BARGB2) \cdot 2^0 + \\
& (-1) \cdot AARGB<7> \cdot AARGB0 :AARGB1 :AARGB2 \cdot 2^{24} + \\
& (-1) \cdot BARGB<7> \cdot BARGB0 :BARGB1 :BARGB2 \cdot 2^{24}
\end{aligned}$$

Cette relation est démontrée dans [Tes97]. En fait, cette routine de multiplication traite d'abord le produit de deux nombre signés dans la représentation à complément à 2 comme si les nombres ne sont pas signés et, pour chaque arguments négatifs, une soustraction est opérée sur l'argument opposé à partir du bit le plus significatif.

### Troncature

Dans la représentation numérique choisie (cf. le chapitre 5, section 5.5), le résultat obtenu par la multiplication (24 bits  $\times$  24 bits) est un nombre de 48 bits (*double length*) qui peut être ramené sur 24 bits en négligeant les 12 premiers bits en partant du LSB, soit la partie représentée par  $2^{-12}, 2^{-13}, 2^{-14}, \dots, 2^{-24}$ . L'erreur d'arrondissement (*round-off error*) est donc de  $2^{-n-1}$ , soit  $2^{-13}$  [Pet78]. Précédemment, il a été établi que cette perte soit acceptable pour ce projet. Une routine de troncature permet donc de ramener le résultat de la multiplication sur 24 bits. Cette routine est construite en deux parties:

1. Une division par  $2^{12}$  (décalage de 12 bits en partant du LSB).
2. L'élimination des bits d'ordre supérieurs qui sont inutilisés dans la représentation de la partie entière. Ces bits forment soit une famille de 00h ou de FFh selon que le résultat de la multiplication est positif ou négatif.

## Annexe 4

### *Conversion de l'erreur d'estimation du RNA en unité de température*

Le RNA implanté estime la réponse désirée d'un capteur mesurant la température de l'eau lors de sa mise sous-vide.

Comme le RNA traite des valeurs normalisées, l'erreur d'estimation  $\Delta\tilde{v}_N^{Teau}$  est définie par

$$\Delta\tilde{v}_N^{Teau} = v_N^{Teau} - \tilde{v}_N^{Teau} \quad (\text{A4.1})$$

où

- $v_N^{Teau}$  est la réponse désirée du capteur de température AD22100KT.
- $\tilde{v}_N^{Teau}$  est l'estimation de cette réponse.

L'erreur d'estimation  $\Delta\tilde{v}_N^{Teau}$  peut être convertie dans l'unité du paramètre physique qu'il représente, soit la température de l'eau en °C:

$$\Delta\tilde{v}_N^{Teau} = v_N^{Teau} - \tilde{v}_N^{Teau} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta\tilde{T}_{eau} = T_{eau} - \tilde{T}_{eau} \quad (\text{A4.2})$$

où

- $\Delta\tilde{T}$  est l'erreur faite par le RNA sur l'estimation de la température de l'eau.
- $T_{eau}$  est la température de l'eau.
- $\tilde{T}_{eau}$  est l'estimation de la température de l'eau, basée sur  $\tilde{v}_N^{Teau}$ .

En effet, d'après les spécification du manufacturier Analog Device, la réponse  $v^T$  du capteur de température AD22100KT, en fonction de la température  $T$ , est obtenue par la relation

$$v^T = \frac{V_+}{5V} \times [1.375 \text{ V} + (22.5 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \times T] \quad (\text{A4.3})$$

où  $V_+$  est la tension d'alimentation du capteur. Le capteur étant alimenté à 5 V, sa réponse idéale s'écrit alors, en tension (V) :

$$v^T = 1.375 + 0.0225 \times T \quad (\text{A4.4})$$

Cette réponse  $v^T$  est analogique. Une fois convertie par un convertisseur A/N de 10 bits ayant pour tension de référence 5 V, le nombre  $v_{10bits}^T$  correspondant à  $v^T$  s'écrit :

$$v_{10bits}^T = \frac{v^T}{5} \times 1024 \quad (\text{A4.5})$$

Ainsi, en normalisant la réponse désirée du capteur de température, nous avons donc :

$$v_N^{Teau} = \frac{v_{10bits}^{Teau}}{v_{MAX}^{Teau}} = \frac{1024}{5} \times \frac{1.375 + 0.0225 \times T_{eau}}{v_{MAX}^{Teau}} \quad (\text{A4.6})$$

où  $v_{MAX}^{Teau}$  est la réponse maximale qui lui est possible d'atteindre, dans les conditions expérimentales réalisées. De même, l'estimation faite par le RNA peut s'écrire :

$$\tilde{v}_N^{Teau} = \frac{\tilde{v}_{10bits}^{Teau}}{v_{MAX}^{Teau}} = \frac{1024}{5} \times \frac{1.375 + 0.0225 \times \tilde{T}_{eau}}{v_{MAX}^{Teau}} \quad (\text{A4.7})$$

À partir des équations (A4.6) et (A4.7), nous avons :

$$\Delta \tilde{v}_N^{Teau} = \frac{1024}{5} \times \frac{0.0225}{v_{MAX}^{Teau}} (T_{eau} - \tilde{T}_{eau}) = \frac{4.608}{v_{MAX}^{Teau}} \Delta T_{eau} \quad (\text{A4.8})$$

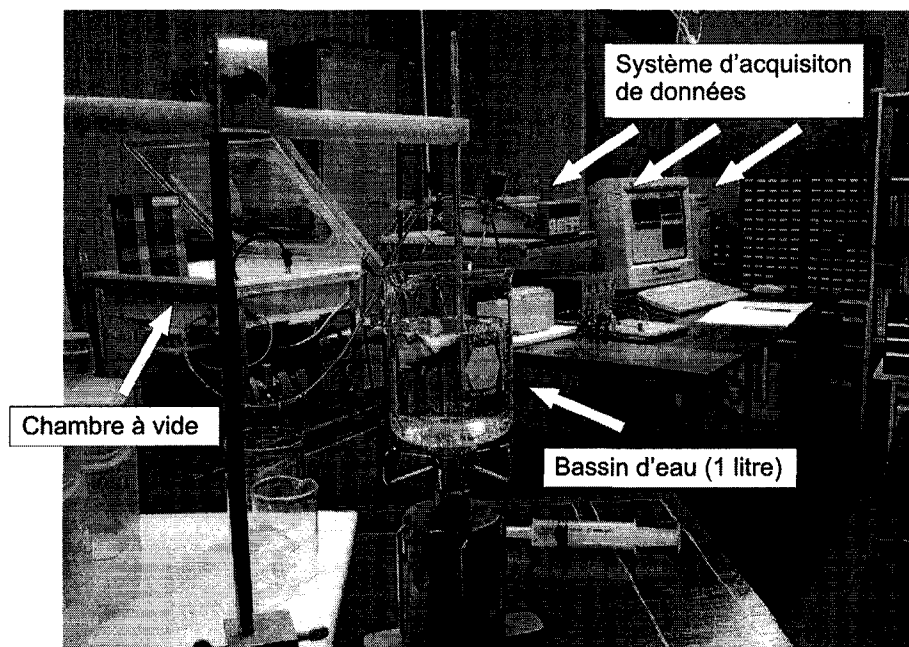
d'où

$$\Delta \tilde{T}_{eau} = \frac{v_{MAX}^{Teau}}{4.608} \Delta \tilde{v}_N^{Teau} \quad (\text{A4.9})$$

Ainsi, pour  $v_{MAX}^{Teau} = 641$ , l'erreur d'estimation du RNA peut être exprimée en température par :

$$\Delta \tilde{T}_{eau} = 139.11 \times \Delta \tilde{v}_N^{Teau} \quad (\text{A4.10})$$

*Images des conditions expérimentales*



**Image A5-1: Les conditions expérimentales et l'installation physique des instruments.**



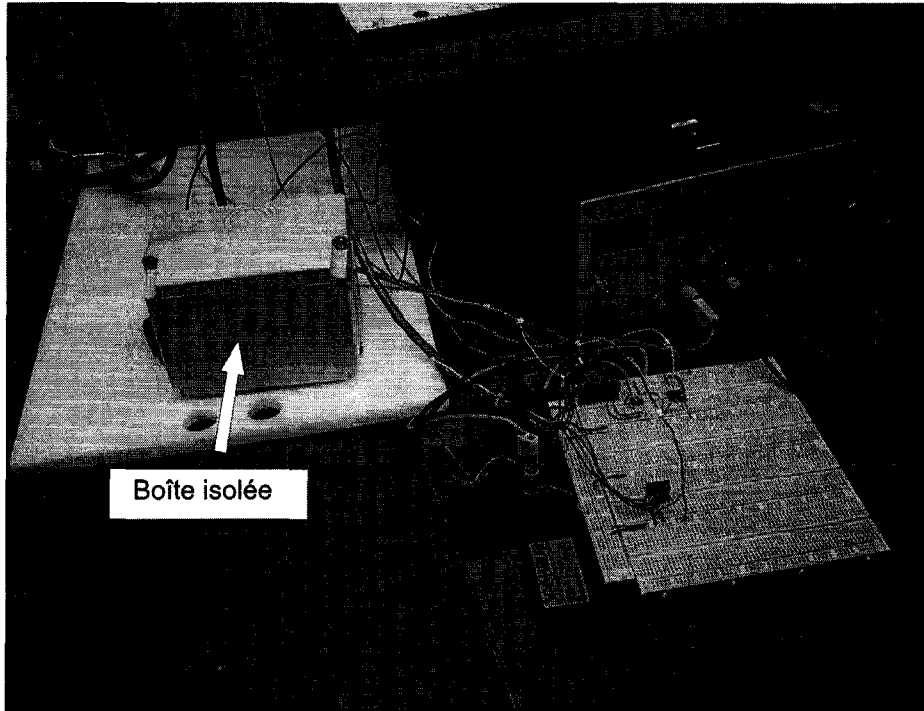


Image A5-2: L'isolation thermique pour le capteur laboratoire de pression  $P_c$

h.

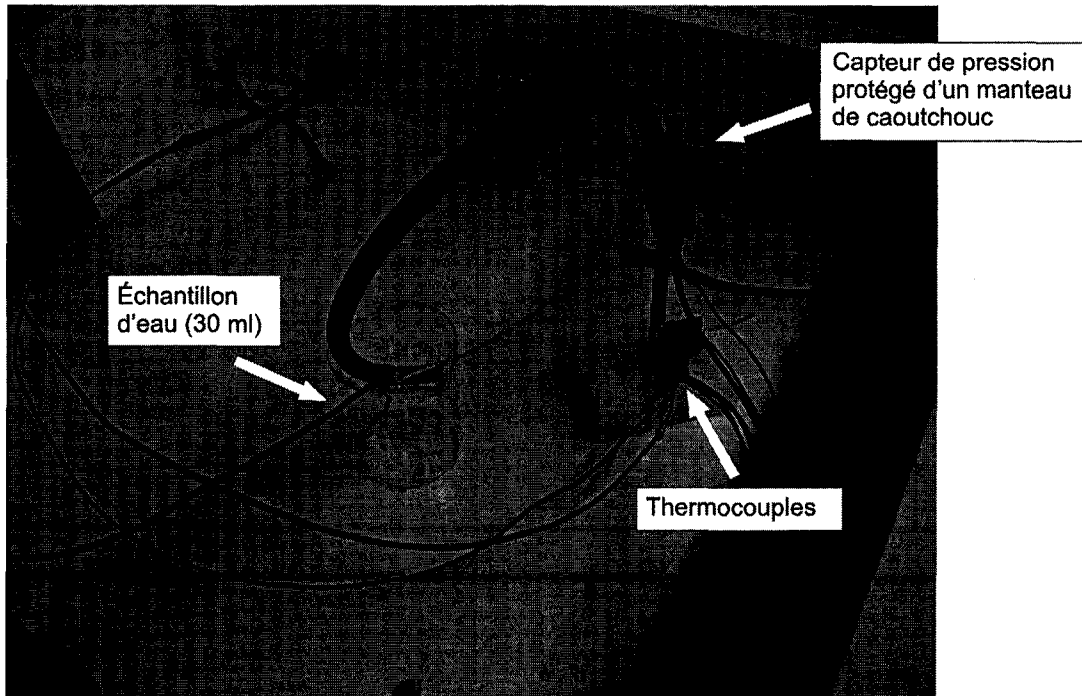


Image A5-3: L'installation du capteur de pression  $P_{eau}$ .

## **Annexe 6**

### ***Spécifications des capteurs de pression***

### ***MPX2100AP et de température AD22100KT***

# 100 kPa On-Chip Temperature Compensated & Calibrated Silicon Pressure Sensors

The MPX2100 and MPX2101 series device is a silicon piezoresistive pressure sensors providing a highly accurate and linear voltage output — directly proportional to the applied pressure. The sensor is a single, monolithic silicon diaphragm with the strain gauge and a thin-film resistor network integrated on-chip. The chip is laser trimmed for precise span and offset calibration and temperature compensation.

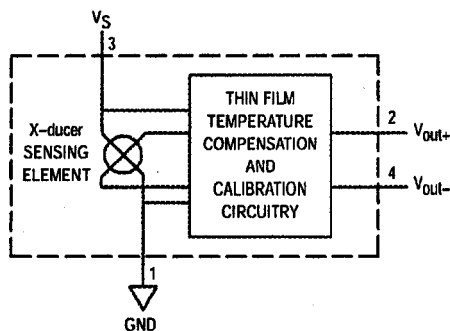
**Features**

- Temperature Compensated Over 0°C to +85°C
- Unique Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Easy to Use Chip Carrier Package Options
- Available in Absolute, Differential and Gauge Configurations
- Ratiometric to Supply Voltage
- ±0.25% Linearity (MPX2100D)

**Application Examples**

- Pump/Motor Controllers
- Robotics
- Level Indicators
- Medical Diagnostics
- Pressure Switching
- Barometers
- Altimeters

Figure 1 illustrates a block diagram of the internal circuitry on the stand-alone pressure sensor chip.



**Figure 1. Temperature Compensated Pressure Sensor Schematic**

**VOLTAGE OUTPUT versus APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE**

The differential voltage output of the X-ducer is directly proportional to the differential pressure applied.

The absolute sensor has a built-in reference vacuum. The output voltage will decrease as vacuum, relative to ambient, is drawn on the pressure (P1) side.

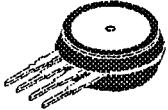
The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure (P1) side relative to the vacuum (P2) side. Similarly, output voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum (P2) side relative to the pressure (P1) side.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

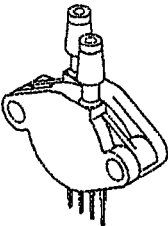
REV 7

**MPX2100  
MPX2101  
SERIES**  
Motorola Preferred Device

0 to 100 kPa (0 to 14.5 psi)  
40 mV FULL SCALE SPAN  
(TYPICAL)



**BASIC CHIP  
CARRIER ELEMENT  
CASE 344-15, STYLE 1**



**DIFFERENTIAL  
PORT OPTION  
CASE 344C-01, STYLE 1**

NOTE: Pin 1 is the notched pin.

| PIN NUMBER |       |   |       |
|------------|-------|---|-------|
| 1          | Gnd   | 3 | VS    |
| 2          | +Vout | 4 | -Vout |

## MPX2100 MPX2101 SERIES

### MAXIMUM RATINGS

| Rating                                  | Symbol             | Value       | Unit |
|---|--------------------|-------------|------|
| Overpressure <sup>(8)</sup> (P1 > P2)   | P <sub>max</sub>   | 200         | kPa  |
| Burst Pressure <sup>(8)</sup> (P1 > P2) | P <sub>burst</sub> | 1000        | kPa  |
| Storage Temperature                     | T <sub>stg</sub>   | -40 to +125 | °C   |
| Operating Temperature                   | T <sub>A</sub>     | -40 to +125 | °C   |

### OPERATING CHARACTERISTICS (V<sub>S</sub> = 10 Vdc, T<sub>A</sub> = 25°C unless otherwise noted, P1 > P2)

| Characteristic  | Symbol   | Min              | Typ                           | Max              | Unit                      |                   |
|---|--|------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------|-------------------|
| Pressure Range <sup>(1)</sup>                           | POP  | 0                | —                             | 100              | kPa                       |                   |
| Supply Voltage <sup>(2)</sup>                           | V <sub>S</sub>   | —                | 10                            | 16               | Vdc                       |                   |
| Supply Current  | I <sub>o</sub>   | —                | 6.0                           | —                | mAdc                      |                   |
| Full Scale Span <sup>(3)</sup>                          | MPX2100A, MPX2100D, MPX2101D Series<br>MPX2101A Series                   | V <sub>FSS</sub> | 38.5<br>37.5                  | 40<br>40         | 41.5<br>42.5              | mV                |
| Offset <sup>(4)</sup>                                   | MPX2100D, MPX2101D Series<br>MPX2100A Series<br>MPX2101A Series          | V <sub>off</sub> | -1.0<br>-2.0<br>-3.0          | —<br>—<br>—      | 1.0<br>2.0<br>3.0         | mV                |
| Sensitivity   |  | ΔV/ΔP            | —                             | 0.4              | —                         | mV/kPa            |
| Linearity <sup>(5)</sup>                                | MPX2100D Series<br>MPX2100A Series<br>MPX2101D Series<br>MPX2101A Series | —                | -0.25<br>-1.0<br>-0.5<br>-2.0 | —<br>—<br>—<br>— | 0.25<br>1.0<br>0.5<br>2.0 | %V <sub>FSS</sub> |
| Pressure Hysteresis <sup>(5)</sup> (0 to 100 kPa)       | —  | —                | ±0.1                          | —                | —                         | %V <sub>FSS</sub> |
| Temperature Hysteresis <sup>(5)</sup> (-40°C to +125°C) | —  | —                | ±0.5                          | —                | —                         | %V <sub>FSS</sub> |
| Temperature Effect on Full Scale Span <sup>(5)</sup>    | TCV <sub>FSS</sub>   | -1.0             | —                             | 1.0              | —                         | %V <sub>FSS</sub> |
| Temperature Effect on Offset <sup>(5)</sup>             | TCV <sub>off</sub>   | -1.0             | —                             | 1.0              | —                         | mV                |
| Input Impedance   | Z <sub>in</sub>  | 1000             | —                             | 2500             | —                         | Ω                 |
| Output Impedance  | Z <sub>out</sub>   | 1400             | —                             | 3000             | —                         | Ω                 |
| Response Time <sup>(6)</sup> (10% to 90%)               | t <sub>R</sub>   | —                | 1.0                           | —                | —                         | ms                |
| Warm-Up   | —  | —                | 20                            | —                | —                         | ms                |
| Offset Stability <sup>(9)</sup>                         | —  | —                | ±0.5                          | —                | —                         | %V <sub>FSS</sub> |

### MECHANICAL CHARACTERISTICS

| Characteristic                           | Symbol | Min | Typ | Max | Unit  |
|--|--------|-----|-----|-----|-------|
| Weight (Basic Element Case 344-15)       | —      | —   | 2.0 | —   | Grams |
| Common Mode Line Pressure <sup>(7)</sup> | —      | —   | —   | 690 | kPa   |

#### NOTES:

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device above the specified excitation range may induce additional error due to device self-heating.
- Full Scale Span (V<sub>FSS</sub>) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Offset (V<sub>off</sub>) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
  - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure, using end point method, over the specified pressure range.
  - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
  - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
  - TcSpan: Output deviation at full rated pressure over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
  - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Common mode pressures beyond specified may result in leakage at the case-to-lead interface.
- Exposure beyond these limits may cause permanent damage or degradation to the device.
- Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

**LINEARITY**

Linearity refers to how well a transducer's output follows the equation:  $V_{out} = V_{off} + \text{sensitivity} \times P$  over the operating pressure range. There are two basic methods for calculating nonlinearity: (1) end point straight line fit (see Figure 2) or (2) a least squares best line fit. While a least squares fit gives the "best case" linearity error (lower numerical value), the calculations required are burdensome.

Conversely, an end point fit will give the "worst case" error (often more desirable in error budget calculations) and the calculations are more straightforward for the user. Motorola's specified pressure sensor linearities are based on the end point straight line method measured at the midrange pressure.

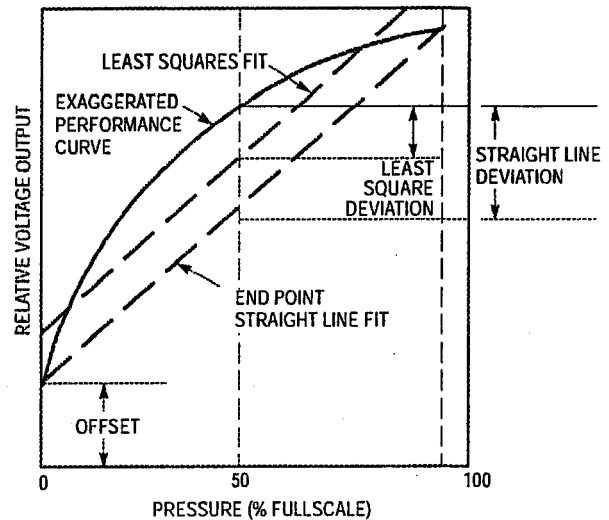


Figure 2. Linearity Specification Comparison

**ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION and CALIBRATION**

Figure 3 shows the output characteristics of the MPX2100 series at 25°C. The output is directly proportional to the differential pressure and is essentially a straight line.

The effects of temperature on Full Scale Span and Offset are very small and are shown under Operating Characteristics.

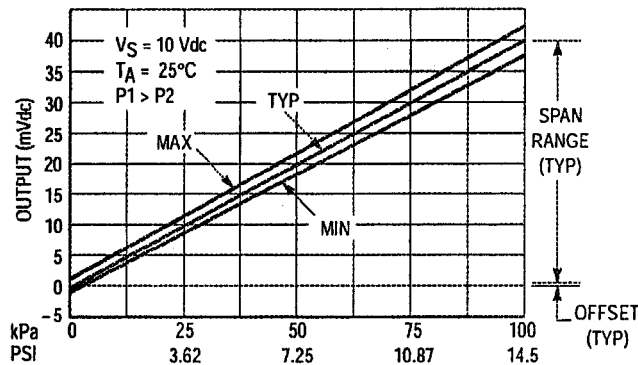


Figure 3. Output versus Pressure Differential

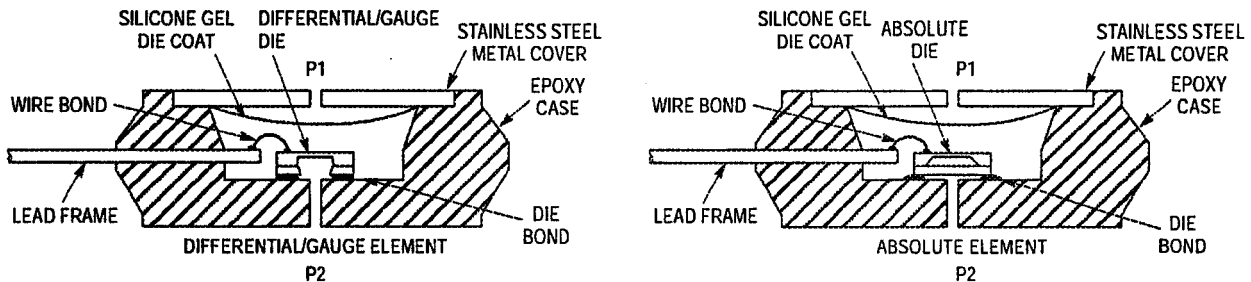


Figure 4. Cross-Sectional Diagrams (Not to Scale)

Figure 4 illustrates the absolute sensing configuration (right) and the differential or gauge configuration in the basic chip carrier (Case 344-15). A silicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the silicon diaphragm.

The MPX2100 series pressure sensor operating characteristics and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media other than dry air may have adverse effects on sensor performance and long term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

## MPX2100 MPX2101 SERIES

### PRESSURE (P1)/VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE

Motorola designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing the silicone gel which isolates the die. The differential or gauge sensor is designed to operate with positive differential pressure

applied,  $P1 > P2$ . The absolute sensor is designed for vacuum applied to P1 side.

The Pressure (P1) side may be identified by using the table below:

| Part Number |            |           |           | Case Type | Pressure (P1) Side Identifier |
|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|
| MPX2100A    | MPX2100D   | MPX2101A  |           | 344-15C   | Stainless Steel Cap           |
| MPX2100DP   |            | MPX2101DP |           | 344C-01   | Side with Part Marking        |
| MPX2100AP   | MPX2100GP  | MPX2101AP | MPX2101GP | 344B-01   | Side with Port Attached       |
| MPX2100AS   |            |           |           | 344E-01   | Side with Port Attached       |
| MPX2100ASX  | MPX2100GSX |           |           | 344F-01   | Side with Port Attached       |

### ORDERING INFORMATION

MPX2100 series pressure sensors are available in absolute, differential and gauge configurations. Devices are available in the basic element package or with pressure port fittings which provide printed circuit board mounting ease and barbed hose pressure connections.

| Device Type     | Options                    | Case Type    | MPX Series                                       |  |
|-----------------|----------------------------|--------------|--|--|
|                 |                            |              | Order Number                                     | Device Marking                                   |
| Basic Element   | Absolute, Differential     | Case 344-15  | MPX2100A   | MPX2100A   |
|                 |                            |              | MPX2100D<br>MPX2101A                             | MPX2100D<br>MPX2101A                             |
| Ported Elements | Differential               | Case 344C-01 | MPX2100DP<br>MPX2101DP                           | MPX2100DP<br>MPX2101DP                           |
|                 | Absolute, Gauge            | Case 344B-01 | MPX2100AP<br>MPX2100GP<br>MPX2101AP<br>MPX2101GP | MPX2100AP<br>MPX2100GP<br>MPX2101AP<br>MPX2101GP |
|                 | Absolute, Gauge Stove Pipe | Case 344E-01 | MPX2100AS<br>MPX2100GS                           | MPX2100A<br>MPX2100D                             |
|                 | Gauge Vacuum Stove Pipe    | Case 344A-01 | MPX2100GVS                                       | MPX2100D   |
|                 | Absolute, Gauge Axial      | Case 344F-01 | MPX2100ASX<br>MPX2100GSX                         | MPX2100A<br>MPX2100D                             |



# Voltage Output Temperature Sensor with Signal Conditioning

## AD22100\*

### FEATURES

- 200°C Temperature Span
- Accuracy Better than  $\pm 2\%$  of Full Scale
- Linearity Better than  $\pm 1\%$  of Full Scale
- Temperature Coefficient of 22.5 mV/°C
- Output Proportional to Temperature  $\times V_+$
- Single Supply Operation
- Reverse Voltage Protection
- Minimal Self Heating
- High Level, Low Impedance Output

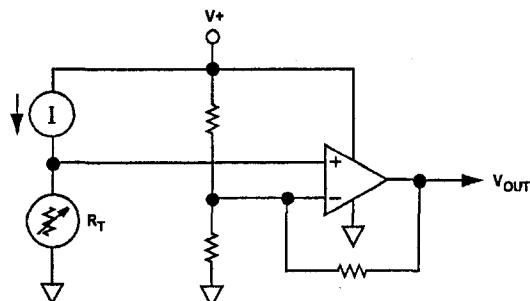
### APPLICATIONS

- HVAC Systems
- System Temperature Compensation
- Board Level Temperature Sensing
- Electronic Thermostats

### MARKETS

- Industrial Process Control
- Instrumentation
- Automotive

### SIMPLIFIED BLOCK DIAGRAM



### GENERAL DESCRIPTION

The AD22100 is a monolithic temperature sensor with on-chip signal conditioning. It can be operated over the temperature range  $-50^\circ\text{C}$  to  $+150^\circ\text{C}$ , making it ideal for use in numerous HVAC, instrumentation and automotive applications.

The signal conditioning eliminates the need for any trimming, buffering or linearization circuitry, greatly simplifying the system design and reducing the overall system cost.

The output voltage is proportional to the temperature times the supply voltage (ratiometric). The output swings from 0.25 V at  $-50^\circ\text{C}$  to +4.75 V at  $+150^\circ\text{C}$  using a single +5.0 V supply.

Due to its ratiometric nature, the AD22100 offers a cost effective solution when interfacing to an analog-to-digital converter. This is accomplished by using the ADC's +5 V power supply as a reference to both the ADC and the AD22100 (See Figure 1), eliminating the need for and cost of a precision reference.

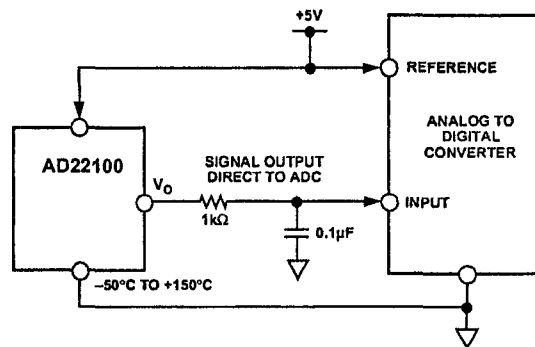


Figure 1. Application Circuit

\*Protected by U.S. Patent Nos. 5030849 and 5243319.

### REV. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

© Analog Devices, Inc., 1994

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 617/329-4700 Fax: 617/326-8703

# AD22100—SPECIFICATIONS ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_+ = +4\text{ V}$ to $+6\text{ V}$ unless otherwise noted)

| Parameter   | AD22100K   |      |      | AD22100A      |      |      | AD22100S      |      |      | Units             |
|---|--|------|------|---------------|------|------|---------------|------|------|-------------------|
|   | Min  | Typ  | Max  | Min           | Typ  | Max  | Min           | Typ  | Max  |                   |
| TRANSFER FUNCTION                                 | $V_{\text{OUT}} = (V_+/5\text{ V}) \times [1.375\text{ V} + (22.5\text{ mV}/^\circ\text{C}) \times T_A]$ |      |      |               |      |      |               |      |      | V                 |
| TEMPERATURE COEFFICIENT                           | $(V_+/5\text{ V}) \times 22.5$   |      |      |               |      |      |               |      |      | mV/°C             |
| TOTAL ERROR                                       |  |      |      |               |      |      |               |      |      |                   |
| Initial Error                                     |  |      |      |               |      |      |               |      |      |                   |
| $T_A = +25^\circ\text{C}$                         | ±0.5   | ±2.0 |      | ±1.0          | ±2.0 |      | ±1.0          | ±2.0 |      | °C                |
| Error over Temperature                            |  |      |      |               |      |      |               |      |      |                   |
| $T_A = T_{\text{MIN}}$                            | ±0.75  | ±2.0 |      | ±2.0          | ±3.7 |      | ±3.0          | ±4.0 |      | °C                |
| $T_A = T_{\text{MAX}}$                            | ±0.75  | ±2.0 |      | ±2.0          | ±3.0 |      | ±3.0          | ±4.0 |      | °C                |
| Nonlinearity                                      |  |      |      |               |      |      |               |      |      |                   |
| $T_A = T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$        | 0.5  |      |      | 0.5           |      |      | 1.0           |      |      | % FS <sup>1</sup> |
| OUTPUT CHARACTERISTICS                            |  |      |      |               |      |      |               |      |      |                   |
| Nominal Output Voltage                            |  |      |      |               |      |      |               |      |      |                   |
| $V_+ = 5.0\text{ V}$ , $T_A = 0^\circ\text{C}$    | 1.375  |      |      |               |      |      |               |      |      | V                 |
| $V_+ = 5.0\text{ V}$ , $T_A = +100^\circ\text{C}$ | 3.625  |      |      |               |      |      |               |      |      | V                 |
| $V_+ = 5.0\text{ V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$  |  |      |      | 0.475         |      |      |               |      |      | V                 |
| $V_+ = 5.0\text{ V}$ , $T_A = +85^\circ\text{C}$  |  |      |      | 3.288         |      |      |               |      |      | V                 |
| $V_+ = 5.0\text{ V}$ , $T_A = -50^\circ\text{C}$  |  |      |      |               |      |      | 0.250         |      |      | V                 |
| $V_+ = 5.0\text{ V}$ , $T_A = +150^\circ\text{C}$ |  |      |      |               |      |      | 4.750         |      |      | V                 |
| POWER SUPPLY                                      |  |      |      |               |      |      |               |      |      |                   |
| Operating Voltage                                 | +4.0   | +5.0 | +6.0 | +4.0          | +5.0 | +6.0 | +4.0          | +5.0 | +6.0 | V                 |
| Quiescent Current                                 | 500 650  |      |      | 500 650       |      |      | 500 650       |      |      | μA                |
| TEMPERATURE RANGE                                 |  |      |      |               |      |      |               |      |      |                   |
| Guaranteed Temperature Range                      | 0  | +100 |      | -40           | +85  |      | -50           | +150 |      | °C                |
| Operating Temperature Range                       | -50  | +150 |      | -50           | +150 |      | -50           | +150 |      | °C                |
| PACKAGE   | TO-92<br>SOIC  |      |      | TO-92<br>SOIC |      |      | TO-92<br>SOIC |      |      |                   |

Specifications subject to change without notice.

## CHIP SPECIFICATIONS ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_+ = +5.0\text{ V}$ unless otherwise noted)

| Parameter                    | Min   | Typ  | Max  | Units |       |
|------------------------------|---|------|------|-------|-------|
| TRANSFER FUNCTION            | $V_{\text{OUT}} = (V_+/5\text{ V}) \times [1.375 + 22.5\text{ mV}/^\circ\text{C} \times T_A]$ |      |      |       | V     |
| TEMPERATURE COEFFICIENT      | $(V_+/5\text{ V}) \times 22.5$  |      |      |       | mV/°C |
| OUTPUT CHARACTERISTICS       |   |      |      |       |       |
| Error                        |   |      |      |       |       |
| $T_A = +25^\circ\text{C}$    |   | ±0.5 | ±2.0 |       | °C    |
| Nominal Output Voltage       |   |      |      |       |       |
| $T_A = +25^\circ\text{C}$    | 1.938   |      |      |       | V     |
| POWER SUPPLY                 |   |      |      |       |       |
| Operating Voltage            | +4.0  | +5.0 | +6.0 |       | V     |
| Quiescent Current            | 500 650   |      |      |       | μA    |
| TEMPERATURE RANGE            |   |      |      |       |       |
| Guaranteed Temperature Range | 25  |      |      |       | °C    |
| Operating Temperature Range  | -50   |      |      | +150  | °C    |

### NOTES

<sup>1</sup>FS (Full Scale) is defined as that of the operating temperature range,  $-50^\circ\text{C}$  to  $+150^\circ\text{C}$ . The listed max specification limit applies to the guaranteed temperature range. For example, the AD22100K has a nonlinearity of  $(0.5\%) \times (200^\circ\text{C}) = 1^\circ\text{C}$  over the guaranteed temperature range of  $0^\circ\text{C}$  to  $+100^\circ\text{C}$ .

Specifications subject to change without notice.



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>1</sup>

|  |                 |
|--|-----------------|
| Supply Voltage .....                       | +10 V           |
| Reversed Continuous Supply Voltage .....   | -10 V           |
| Operating Temperature .....                | -50°C to +150°C |
| Storage Temperature .....                  | -65°C to +160°C |
| Output Short Circuit to V+ or Ground ..... | Indefinite      |
| Lead Temperature (Soldering, 10 sec) ..... | +300°C          |

<sup>1</sup>Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; the functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

### PIN DESCRIPTION

| Mnemonic       | Function                             |
|----------------|--------------------------------------|
| V+             | Power Supply Input                   |
| V <sub>O</sub> | Device Output                        |
| GND            | Ground Pin must be connected to 0 V. |
| NC             | No Connect                           |

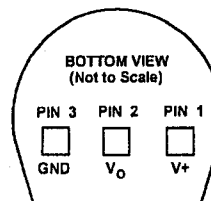
### ORDERING GUIDE

| Model/Grade   | Guaranteed Temperature Range | Package Description* | Package Option |
|---------------|------------------------------|----------------------|----------------|
| AD22100 KT    | 0°C to 100°C                 | TO-92                | TO-92          |
| AD22100 KR    | 0°C to 100°C                 | SOIC                 | SO-8           |
| AD22100 AT    | -40°C to +85°C               | TO-92                | TO-92          |
| AD22100 AR    | -40°C to +85°C               | SOIC                 | SO-8           |
| AD22100 ST    | -50°C to +150°C              | TO-92                | TO-92          |
| AD22100 SR    | -50°C to +150°C              | SOIC                 | SO-8           |
| AD22100KChips | +25°C                        | N/A                  | N/A            |

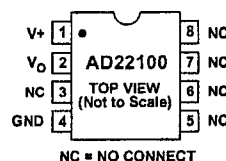
\*Minimum purchase quantities of 100 pieces for all chip orders.

### PIN CONFIGURATIONS

TO-92



### SOIC



### CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the AD22100 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



## Typical Performance Curves

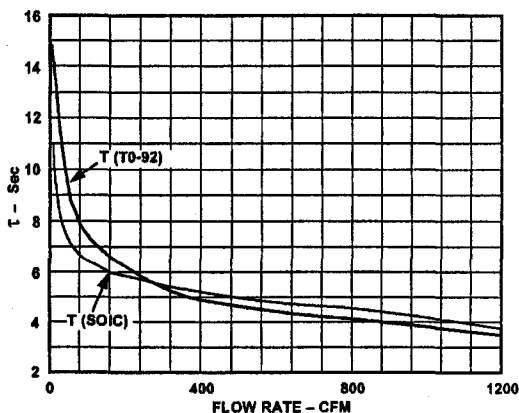


Figure 2. Thermal Response vs. Flow Rate

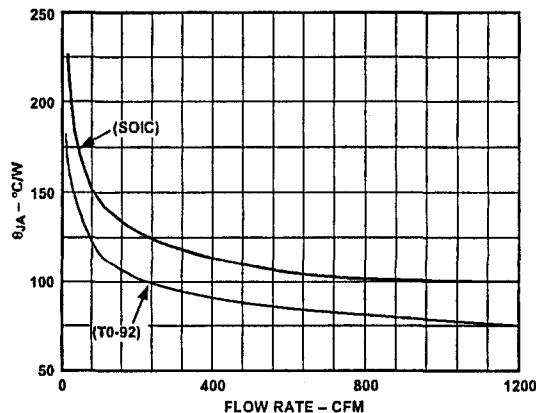


Figure 3. Thermal Resistance vs. Flow Rate

# AD22100

## THEORY OF OPERATION

The AD22100 is a ratiometric temperature sensor IC whose output voltage is proportional to power supply voltage. The heart of the sensor is a proprietary temperature-dependent resistor, similar to an RTD, which is built into the IC. Figure 4 shows a simplified block diagram of the AD22100.

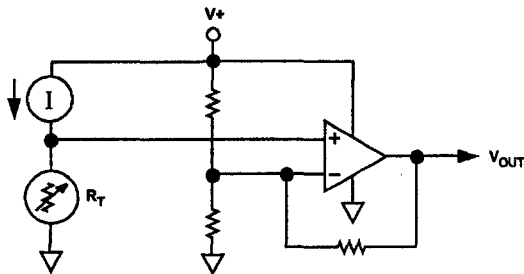


Figure 4. Simplified Block Diagram

The temperature-dependent resistor, labeled  $R_T$ , exhibits a change in resistance that is nearly linearly proportional to temperature. This resistor is excited with a current source that is proportional to power supply voltage. The resulting voltage across  $R_T$  is therefore both supply voltage proportional and linearly varying with temperature. The remainder of the AD22100 consists of an op amp signal conditioning block that takes the voltage across  $R_T$  and applies the proper gain and offset to achieve the following output voltage function:

$$V_{OUT} = (V+/5 V) \times [1.375 V + (22.5 mV/^{\circ}C) \times T_A]$$

## ABSOLUTE ACCURACY AND NONLINEARITY SPECIFICATIONS

Figure 5 graphically depicts the guaranteed limits of accuracy for the AD22100 and shows the performance of a typical part. As the output is very linear, the major sources of error are offset, i.e., error at room temperature, and span error, i.e., deviation from the theoretical 22.5 mV/ $^{\circ}C$ . Demanding applications can achieve improved performance by calibrating these offset and gain errors so that only the residual nonlinearity remains as a significant source of error.

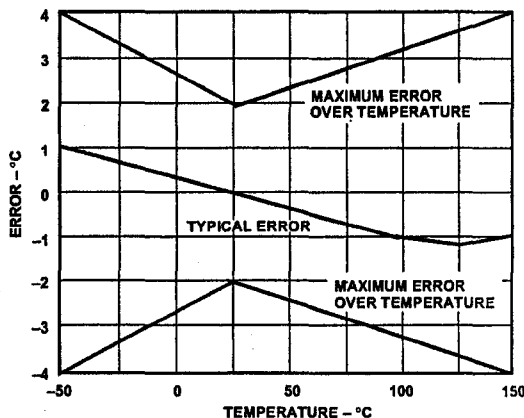


Figure 5. Typical AD22100 Performance

## OUTPUT STAGE CONSIDERATIONS

As previously stated, the AD22100 is a voltage output device. A basic understanding of the nature of its output stage is useful for proper application. Note that at the nominal supply voltage of 5.0 V, the output voltage extends from 0.25 V at  $-50^{\circ}C$  to +4.75 V at  $+150^{\circ}C$ . Furthermore, the AD22100 output pin is capable of withstanding an indefinite short circuit to either ground or the power supply. These characteristics are provided by the output stage structure shown in Figure 6.

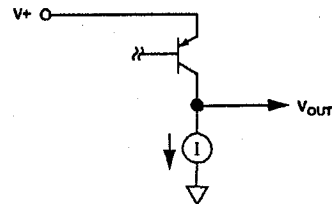


Figure 6. Output Stage Structure

The active portion of the output stage is a PNP transistor with its emitter connected to the  $V+$  supply and collector connected to the output node. This PNP transistor sources the required amount of output current. A limited pull-down capability is provided by a fixed current sink of about  $-80 \mu A$ . (Here, "fixed" means the current sink is fairly insensitive to either supply voltage or output loading conditions. The current sink capability is a function of temperature, increasing its pull-down capability at lower temperatures.)

Due to its limited current sinking ability, the AD22100 is incapable of driving loads to the  $V+$  power supply and is instead intended to drive grounded loads. A typical value for short circuit current limit is 7 mA, so devices can reliably source 1 mA or 2 mA. However, for best output voltage accuracy and minimal internal self-heating, output current should be kept below 1 mA. Loads connected to the  $V+$  power supply should be avoided as the current sinking capability of the AD22100 is fairly limited. These considerations are typically not a problem when driving a microcontroller analog to digital converter input pin (see MICROPROCESSOR A/D INTERFACE ISSUES).

## RATIOMETRICITY CONSIDERATIONS

The AD22100 will operate with slightly better accuracy than that listed in the data sheet specifications if the power supply is held constant. This is because the AD22100's output voltage varies with both temperature and supply voltage, with some errors. The ideal transfer function describing the output voltage is:

$$(V+/5 V) \times [1.375 V + (22.5 mV/^{\circ}C) \times T_A]$$

The ratiometricity error is defined as the percent change away from the ideal transfer function as the power supply voltage changes within the operating range of +4 V to +6 V. For the AD22100 this error is typically less than 1%. A movement from the ideal transfer function by 1% at  $+25^{\circ}C$ , with a supply voltage varying from 5.0 V to 5.50 V, results in a 1.94 mV change in output voltage or 0.08 $^{\circ}C$  error. This error term is greater at higher temperatures because the output (and error term) is directly proportional to temperature. At  $150^{\circ}C$ , the error in output voltage is 4.75 mV or 0.19 $^{\circ}C$ .

For example, with  $V_S = 5.0\text{ V}$ , and  $T_A = +25^\circ\text{C}$ , the nominal output of the AD22100 will be 1.9375 V. At  $V_S = 5.50\text{ V}$ , the nominal output will be 2.1313 V, an increase of 193.75 mV. A proportionality error of 1% is applied to the 193.75 mV, yielding an error term of 1.9375 mV. This error term translates to a variation in output voltage of 2.1293 V to 2.3332 V. A 1.94 mV error at the output is equivalent to about  $0.08^\circ\text{C}$  error in accuracy.

If we substitute  $150^\circ\text{C}$  for  $25^\circ\text{C}$  in the above example, then the error term translates to a variation in output voltage of 5.2203 V to 5.2298 V. A 4.75 mV error at the output is equivalent to about  $0.19^\circ\text{C}$  error in accuracy.

### MOUNTING CONSIDERATIONS

If the AD22100 is thermally attached and properly protected, it can be used in any measuring situation where the maximum range of temperatures encountered is between  $-50^\circ\text{C}$  and  $+150^\circ\text{C}$ . Because plastic IC packaging technology is employed, excessive mechanical stress must be avoided when fastening the device with a clamp or screw-on heat tab. Thermally conductive epoxy or glue is recommended for typical mounting conditions. In wet or corrosive environments, an electrically isolated metal or ceramic well should be used to shield the AD22100. Because the part has a voltage output (as opposed to current), it offers modest immunity to leakage errors, such as those caused by condensation at low temperatures.

### THERMAL ENVIRONMENT EFFECTS

The thermal environment in which the AD22100 is used determines two performance traits: the effect of self-heating on accuracy and the response time of the sensor to rapid changes in temperature. In the first case, a rise in the IC junction temperature above the ambient temperature is a function of two variables; the power consumption of the AD22100 and the thermal resistance between the chip and the ambient environment  $\theta_{JA}$ . Self-heating error in  $^\circ\text{C}$  can be derived by multiplying the power dissipation by  $\theta_{JA}$ . Because errors of this type can vary widely for surroundings with different heat sinking capacities, it is necessary to specify  $\theta_{JA}$  under several conditions. Table I shows how the magnitude of self-heating error varies relative to the environment. A typical part will dissipate about 2.2 mW at room temperature with a 5 V supply and negligible output loading. In still air, without a "heat sink," the table below indicates a  $\theta_{JA}$  of  $190^\circ\text{C}/\text{W}$ , yielding a temperature rise of  $0.4^\circ\text{C}$ . Thermal rise will be considerably less in either moving air or with direct physical connection to a solid (or liquid) body.

Table I. Thermal Resistance (TO-92)

| Medium            | $\theta_{JA}$ ( $^\circ\text{C}/\text{Watt}$ ) | $\tau$ (sec) * |
|-------------------|--|----------------|
| Aluminum Block    | 60   | 2              |
| Moving Air**      |  |                |
| Without Heat Sink | 75   | 3.5            |
| Still Air         |  |                |
| Without Heat Sink | 190  | 15             |

\*The time constant  $\tau$  is defined as the time to reach 63.2% of the final temperature change.

\*\*1200 CFM.

Response of the AD22100 output to abrupt changes in ambient temperature can be modeled by a single time constant  $\tau$  exponential function. Figure 7 shows typical response time plots for a few media of interest.

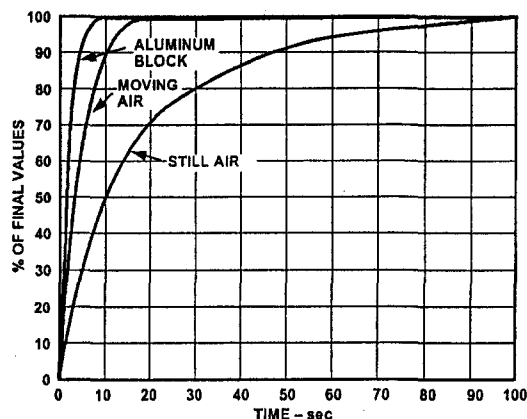


Figure 7. Response Time

The time constant  $\tau$  is dependent on  $\theta_{JA}$  and the thermal capacities of the chip and the package. Table I lists the effective  $\tau$  (time to reach 63.2% of the final value) for a few different media. Copper printed circuit board connections were neglected in the analysis; however, they will sink or conduct heat directly through the AD22100's solder plated copper leads. When faster response is required, a thermally conductive grease or glue between the AD22100 and the surface temperature being measured should be used.

### MICROPROCESSOR A/D INTERFACE ISSUES

The AD22100 is especially well suited to providing a low cost temperature measurement capability for microprocessor/microcontroller based systems. Many inexpensive 8-bit microprocessors now offer an onboard 8-bit ADC capability at a modest cost premium. Total "cost of ownership" then becomes a function of the voltage reference and analog signal conditioning necessary to mate the analog sensor with the microprocessor ADC. The AD22100 can provide an ideal low cost system by eliminating the need for a precision voltage reference and any additional active components. The ratiometric nature of the AD22100 allows the microprocessor to use the same power supply as its ADC reference. Variations of hundreds of millivolts in the supply voltage have little effect as both the AD22100 and the ADC use the supply as their reference. The nominal AD22100 signal range of 0.25 V to 4.75 V ( $-50^\circ\text{C}$  to  $+150^\circ\text{C}$ ) makes good use of the input range of a 0 V to 5 V ADC. A single resistor and capacitor are recommended to provide immunity to the high speed charge dump glitches seen at many microprocessor ADC inputs (see Figure 1).

An 8-bit ADC with a reference of 5 V will have a least significant bit (LSB) size of  $5\text{ V}/256 = 19.5\text{ mV}$ . This corresponds to a nominal resolution of about  $0.87^\circ\text{C}$ .

# AD22100

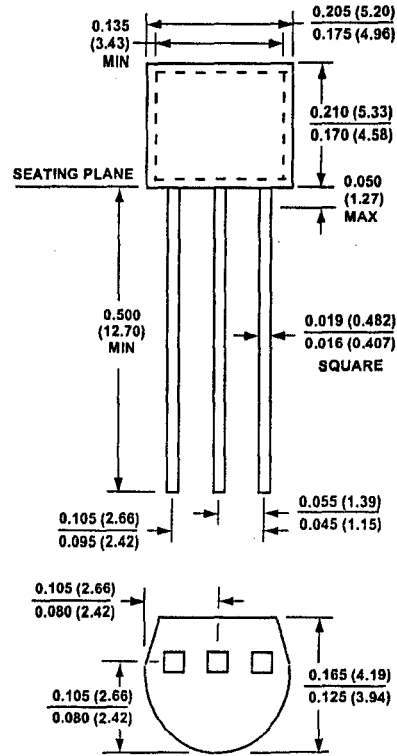
## USE WITH A PRECISION REFERENCE AS THE SUPPLY VOLTAGE

While the ratiometric nature of the AD22100 allows for system operation without a precision voltage reference, it can still be used in such systems. Overall system requirements involving other sensors or signal inputs may dictate the need for a fixed precision ADC reference. The AD22100 can be converted to absolute voltage operation by using a precision reference as the supply voltage. For example, a 5.00 V reference can be used to power the AD22100 directly. Supply current will typically be 500  $\mu$ A which is usually within the output capability of the reference. A large number of AD22100s may require an additional op amp buffer, as would scaling down a 10.00 V reference that might be found in "instrumentation" ADCs typically operating from  $\pm 15$  V supplies.

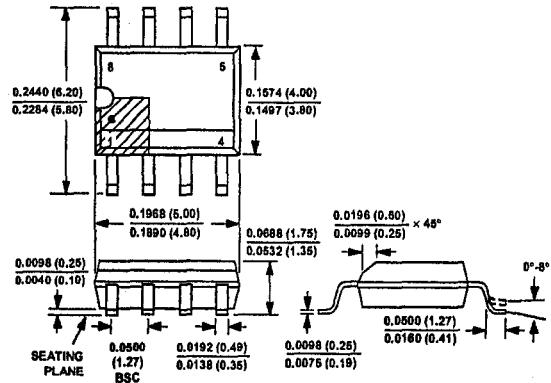
## OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

### TO-92



### SO-8 (SOIC)



C1898b-9-12/94

PRINTED IN U.S.A.