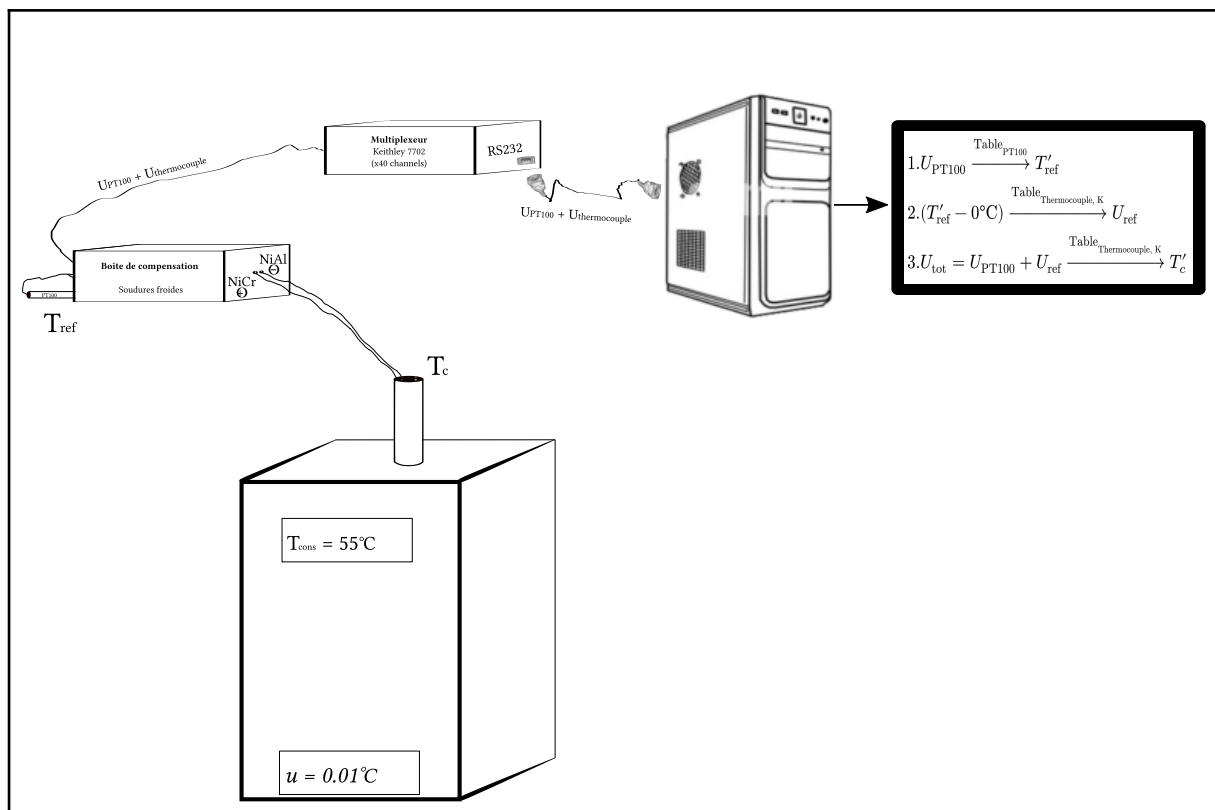


**Campagne d'étalonnage des thermocouples et des capteurs de
pression du banc expérimental “ébullition convective”
2024**



Dans ce document, les températures mesurées sont distinguées des températures réelles par un apostrophe (ex : Si T_1 est la grandeur à mesurer, T_1' en est la mesure).

Sommaire

1 Le banc d'essai	3
2 Les thermocouples	5
2.1 Liste du matériel	5
2.2 Protocole d'étalonnage	6
2.2.1 Méthodologie d'étalonnage	6
2.2.2 Application du protocole d'étalonnage au banc d'essai	7
2.2.2.a Formalisation mathématique de la mesure	7
2.3 Résultats	8
3 Les capteurs de pression	9
3.1 Liste du matériel	9
3.2 Protocole expérimental	9
3.3 Résultats	9
4 Autres matériels	9
4.1 Liste du matériel	9
Annexe	10
Annexe A : Fonctions de conversion pour thermocouple de type K ¹	10
Annexe B : Fonctions de conversion pour sonde PT100 ²	12

¹Source : NIST.gov

²Source : Keithley 27XX User Manual

1 Le banc d'essai

Le schéma de principe du banc d'essai est donné en Figure 1. La section de test est quant à elle détaillée en Figure 2. Elle comprend : Le pré-chauffeur³, l'évaporateur, le tube de visualisation, ainsi que les appareils de mesures (thermocouples, transmetteurs de pression, caméra à image rapide). Les indices utilisés pour identifier ces derniers servent de référence tout au long du document. Tout autre document technique rédigé dans le cadre de ma thèse y fera référence. On distingue :

- A_i : Auxiliary (Thermocouples)
- T_i : Test section (Thermocouples)
- TP_i : Test section (Pressure sensors)
- O_i : Others

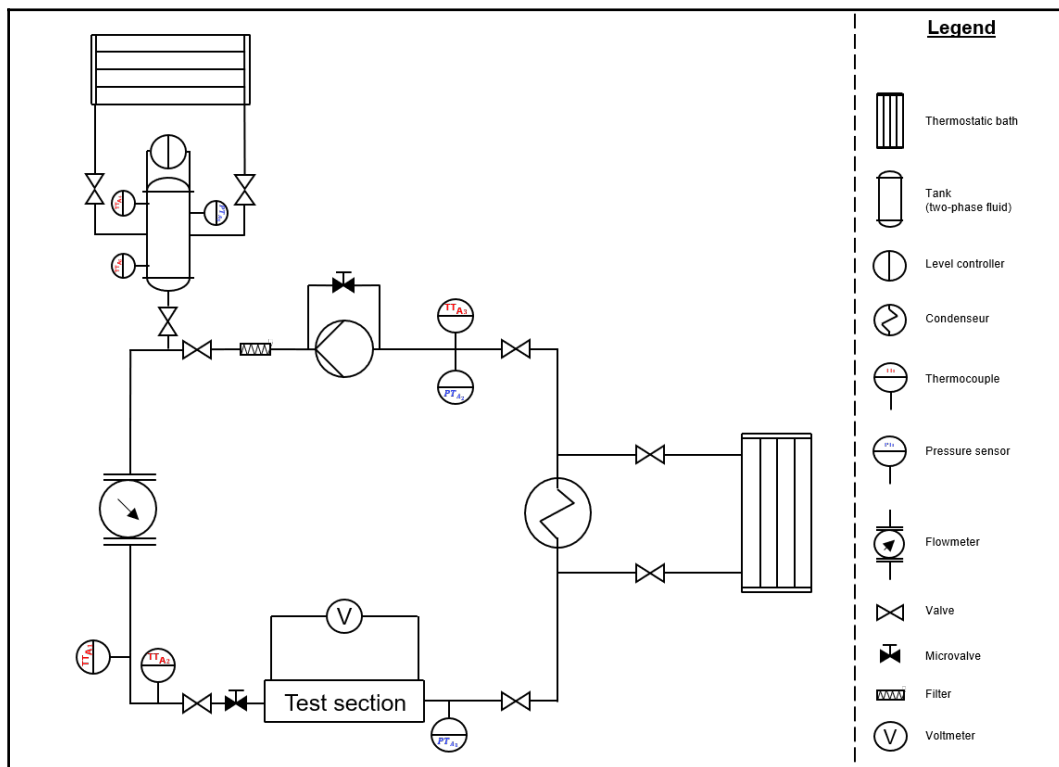


Figure 1: Schéma de principe du banc d'essai
"Ebullition Convective"

³Dénommé preheater dans ce document

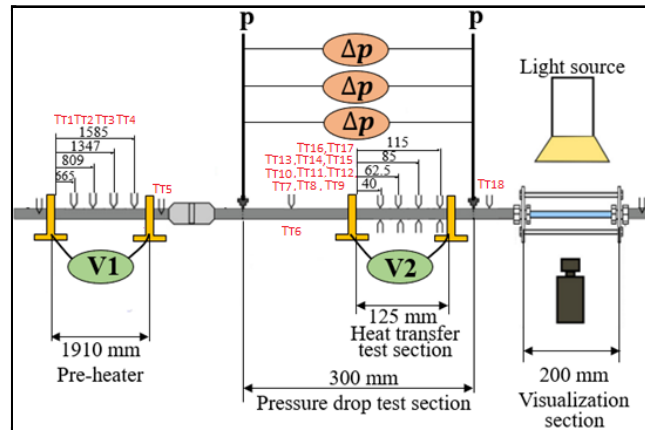


Figure 2: Schéma de principe de la section d'essai
(Auteur : Daniel Marchetto, modifié)

Ce document a plusieurs objectifs :

1. Identifier clairement l'instrumentation du banc,
2. Définir une méthodologie pour étalonner les capteurs :
 - Par soucis de répétabilité,
 - Par soucis de traçabilité des évolutions du banc.
3. Afin de sauvegarder les résultats obtenus.

2 Les thermocouples

2.1 Liste du matériel

Tableau 1: Inventaire des thermocouples (type K)

Indice	Canal ⁴	Référence	Localisation	Immergé	Calibré
A1	202	K405 (Prosensor®)	Preheater inlet	☒	☒
A2	234	Homemade (Omega®)	Preheater inlet	☐	☒
T1	219	Homemade (Omega®)	Preheater surface 1	☐	☐
T2	208	Homemade (Omega®)	Preheater surface 2	☐	☐
T3	220	Homemade (Omega®)	Preheater surface 3	☐	☐
T4	218	Homemade (Omega®)	Preheater surface 4	☐	☐
T5	212	K405 (Prosensor®)	Preheater outlet	☒	☐
T6	216, 237, 238	Homemade (Omega®)	Evaporator inlet	☐	☒
T7	225	K405 (Prosensor®)	Evaporator inlet	☒	☒
T8	212	Homemade (Omega®)	Tube wall 1 top	☐	☒
T9	239	Homemade (Omega®)	Tube wall 1 middle	☐	☒
T10	223	Homemade (Omega®)	Tube wall 1 bottom	☐	☒
T11	209	Homemade (Omega®)	Tube wall 2 top	☐	☒
T12	224	Homemade (Omega®)	Tube wall 2 middle	☐	☒
T13	233	Homemade (Omega®)	Tube wall 2 bottom	☐	☒
T14	203	Homemade (Omega®)	Tube wall 3 top	☐	☒
T15	228	Homemade (Omega®)	Tube wall 3 middle	☐	☒
T16	235	Homemade (Omega®)	Tube wall 3 bottom	☐	☒
T17	217	Homemade (Omega®)	CHF ⁵ top	☐	☒
T18	222	Homemade (Omega®)	CHF bottom	☐	☒
T19.1	207, 226, 232	Homemade (Omega®)	Evaporator outlet	☐	☒
T19.2	230	K405 (Prosensor®)	Evaporator outlet	☒	☒
A3	240	Homemade (Omega®)	Pump inlet	☐	☐
A4	206	Homemade (Omega®)	Tank up	☐	☐
A5	205	Homemade (Omega®)	Tank Down	☐	☐
O1	204	Homemade (Omega®)	Ambient	☐	☒
O2.1	201	PT100	Cold junction	☐	☐
O2.2	211	PT100	Cold junction	☐	☐
O2.3	221	PT100	Cold junction	☐	☐
O2.3	231	PT100	Cold junction	☐	☐

Les capteurs surlignés en bleu sont situés dans la section test du banc

Les indices du type $X_{i,j}$ font référence à un des capteurs j qui réalisent une mesure au même point matériel i.

⁴Fait références aux canaux du Keithley

⁵Critical Heat Flux

2.2 Protocole d'étalonnage

Le protocole d'étalonnage proposé répond aux normes et documents techniques en vigueur telles que :

- l'ISO 17025,
- Le guide technique COFRAC d'accréditation en température (LAB GTA08).

Cette liste est non exhaustive.

L'objectif de l'étalonnage est de proposer pour chaque thermocouple une loi de correction permettant de réduire au maximum l'incertitude sur la mesure. Cette incertitude peut être déterminée :

- A partir des incertitudes aléatoires (type A),
- A partir des incertitudes induites par l'instrumentation, la nature de la mesure et la propagation d'incertitude (type B),
- A partir de la méthode de Monte Carlo.

La Figure 3 propose une schématisation de la chaîne d'acquisition du banc.

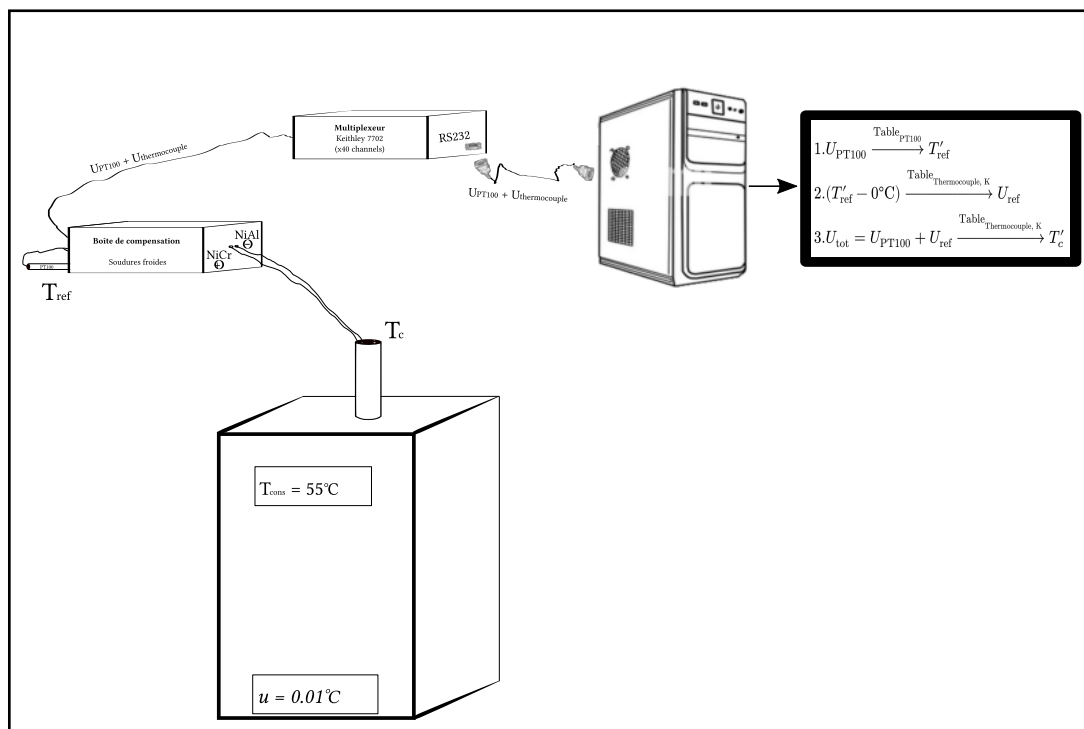


Figure 3: Schéma de la chaîne d'étalonnage

La mesure de la température T_c à l'aide d'un thermocouple est indirecte. Le fonctionnement de ce type de thermomètre n'est pas détaillé, le lecteur pourra se référer à [Citer un article d'explication du fonctionnement des thermocouples](#) la littérature. Elle provient de la mesure de deux tensions U_{PT100} et U_{ref} puis d'un traitement mathématique en 3 étapes via [deux tables de polynômes](#)⁶. Ces opérations sont brièvement décrites dans l'encart de la figure. On détaille la méthodologie ci-après.

2.2.1 Méthodologie d'étalonnage

Soient Y la mesurande, y son estimation et $u(y)$ l'écart-type de la mesure. Les étapes de l'étalonnage des thermocouples sont listées ci-dessous :

0. Au choix une méthode de calcul d'incertitude :

⁶Vérifier si c'est pas trois vu que polynôme non inversible, le citer

1. Calcul de l'incertitude de type A :

$$u(\bar{y}) = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{s(y)}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Cette incertitude peut être étendue pour obtenir un intervalle d'incertitude (à 95% par exemple). Notamment, la loi Student peut être utilisée (Se référer à la méthode GUM). Elle est utilisée lorsque les mesures sont directes et nombreuses (Environ $n > 30^7$).

2. Calcul de l'incertitude de type B :

Dans le cas où la mesure ne peut être réalisée de nombreuses fois et/ou qu'elle est indirecte, l'incertitude de type B est déterminée :

2.1. Formalisation mathématique de la mesure $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ avec $x_{i \in [1;n]}$ une mesure directe. On se ramène donc à un problème fonction des mesurandes "fondamentales" de la mesure.

2.1.1. Détermination de la distribution des incertitudes (normale, uniforme/rectangulaire, étalée).

2.1.2. Recensement des incertitudes des appareils de mesure et des tables polynomiales utilisées.

2.1.3. Propagation de l'incertitude :

$$u(y)^2 = \sum_{i=1}^n \left(u(x_i)^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \right) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(u(x_i, x_j) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \right) \quad (2)$$

3. Calcul de l'incertitude par la méthode de Monte-Carlo (solution de référence)

3.1. Reprendre les étapes 2.1.1 et 2.1.2

3.2. **Potasser le gros de la doc de UDMT**

2.2.2 Application du protocole d'étalonnage au banc d'essai

La détermination d'incertitude par Monte-Carlo a été choisi pour l'étalonnage des thermocouples. Ce choix s'explique par la nature indirecte de la mesure malgré le nombre élevé de mesures.

2.2.2.a Formalisation mathématique de la mesure

Soit TC' la mesure de la température chaude TC.

En se référant à la Figure 3, exprimons TC en fonction des mesures directes réalisées sur le banc (en gras dans l'image) :

$$U_{\text{tot}} = U_{\text{correction}} + U_{\text{thermocouple}} \\ \Rightarrow U_{\text{tot}} = P_{K,E}(T_0' - T_{\text{ref}}) + U_{\text{thermocouple}}$$

Avec :

- $P_{K,E}$ le polynôme de conversion Fem - Température des thermocouples type K (Voire l'équation 3 en annexe A),
- T_0' la mesure de la température de référence de la boîte de jonction,
- T_{ref} la température de référence du multimètre (Keithley 27XX).

⁷Citer les travaux de JLBK

La température de la soudure froide, T_0' , est lue à partir de la sonde PT100 de la boîte de jonction. Elle est également une mesure indirecte, la mesure intermédiaire étant la résistance électrique de la sonde (fonction de la température, voir équation 5 de Callendar-Van Dusen).

Egalement, des tables existent

On estime la température en évaluant la tension “totale” obtenue par le polynôme de équation 4.

$$T_c' = P_{K,T}(P_{K,E}(T_0 - T_{\text{ref}}) + U_{\text{thermocouple}})$$

2.3 Résultats

3 Les capteurs de pression

3.1 Liste du matériel

Tableau 2: Liste des transmetteurs de pression

Indice	Canal	Référence	Localisation	Type	Plage de fonctionnement	Calibré
TP1	118	Keller PA23	Evaporator inlet	P_{abs}	0-30 bars	<input type="checkbox"/>
TP2	102	Keller PD-23	Evaporator	ΔP	0-5 bars	<input type="checkbox"/>
TP3	112	Emmerson Rosemount 3051	Evaporator	ΔP	0-2 bars	<input type="checkbox"/>
TP4	114	Emmerson Rosemount 3051	Evaporator	ΔP	0-50 mbars	<input type="checkbox"/>
TP5	113	Keller PA23	Evaporator outlet	P_{abs}	0-35 bars	<input type="checkbox"/>
AP1	120	Keller PA23	Pump inlet	P_{abs}	0-35 bars	<input type="checkbox"/>
AP2	115	Keller PA23	Tank	P_{abs}	0-35 bars	<input type="checkbox"/>

Les transmetteurs de pression Keller admettent une limite maximale de température de 100°C, limitant l'utilisation du banc au-delà de cette valeur.

3.2 Protocole expérimental

3.3 Résultats

4 Autres matériels

4.1 Liste du matériel

Tableau 3: Liste du matériel auxillaire

Indice	Canal	Référence	Localisation	Type	Plage de fonctionnement	Calibré
TOX2	117	N/A	Preheater	U correction	N/A	<input checked="" type="checkbox"/>
OX1	109	N/A	Preheater	U correction	N/A	<input checked="" type="checkbox"/>
OX2	105	Micromotion 1700 Emerson	Auxillaire	Coriolis Mass flow meter	0 - 108 kg/h	<input checked="" type="checkbox"/>

Annexe

Annexe A : Fonctions de conversion pour thermocouple de type K⁸

Equation Température [°C] → Fem [mV] :

$$\begin{aligned} T \in [-270; 0]^\circ\text{C} : P_{K,E}(T) &= \sum_{i=0}^n (c_i \cdot T^i) \\ T \in [0; 1372]^\circ\text{C} : P_{K,E}(T) &= \sum_{i=0}^n (c_i \cdot T^i) + a_0 \cdot \exp(a_1 \cdot (T - a_2)^2) \end{aligned} \quad (3)$$

Tableau 4: Tableau des coefficients du polynôme T → Fem

Coefficients	[-270 ; 0] °C	[0 ; 1372] °C
c_0	0.000000000000E-0	-0.176004136860E-1
c_1	0.394501280250E-01	0.389212049750E-01
c_2	0.236223735980E-04	0.185587700320E-04
c_3	-0.328589067840E-06	-0.994575928740E-07
c_4	-0.499048287770E-08	0.318409457190E-09
c_5	-0.675090591730E-10	-0.560728448890E-12
c_6	-0.574103274280E-12	0.560750590590E-15
c_7	-0.310888728940E-14	-0.320207200030E-18
c_8	-0.104516093650E-16	0.971511471520E-22
c_9	-0.198892668780E-19	-0.121047212750E-25
c_{10}	-0.163226974860E-22	
a_0		0.118597600000E+00
a_1		-0.118343200000E-03
a_2		-0.118343200000E-03

⁸Source : NIST.gov

Equation Fem [mV] \rightarrow Température [°C]:

$$P_{K,T}(E) = \sum_{i=0}^n (d_i \cdot E^i) \quad (4)$$

Tableau 5: Tableau des coefficients du polynôme inversé Fem \rightarrow T

Coefficients	[-5.891 ; 0] mV [-200 ; 0] °C	[0 ; 20.644] mV [0 ; 500] °C	[20.644 ; 54.886] mV [500 ; 1372] °C
d_0	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.318058E+02
d_1	2.5173462E+01	2.508355E+01	4.830222E+01
d_2	-1.1662878E+00	7.860106E-02	-1.646031E+00
d_3	-1.0833638E+00	-2.503131E-01	5.464731E-02
d_4	-8.9773540E-01	8.315270E-02	-9.650715E-04
d_5	-3.7342377E-01	-1.228034E-02	8.802193E-06
d_6	-8.6632643E-02	9.804036E-04	-3.110810E-08
d_7	-1.0450598E-02	-4.413030E-05	
d_8	-5.1920577E-04	1.057734E-06	
d_9		-1.052755E-08	
Erreur [°C]	[-0.02 ; 0.04]	[-0.05 ; 0.04]	[-0.05 ; 0.06]

Annexe B : Fonctions de conversion pour sonde PT100⁹

Callendar-Van Dusen équations Température [°C] → Résistance [Ohm] :

$$\begin{aligned} T \in [-200; 0] \text{ °C} : R(T) &= R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 \cdot (T - 100)) \\ T \in [0; 630] \text{ °C} : R(T) &= R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \end{aligned} \quad (5)$$

Avec $A, B, C \in \mathbb{R}$ définies comme suit:

- $A = \alpha \cdot \left(1 + \left(\frac{\delta}{100}\right)\right)$
- $B = -\alpha \cdot \delta \cdot (1e - 4)$
- $C = -\alpha \cdot \beta \cdot (1e - 8)$

Tableau 6: Tableau des coefficients du polynôme $T \rightarrow R$

Type	Standard	Référence	α [°C]	β [°C ⁻²]	δ [°C ⁻⁴]	Ω à 0°C [Ohm]
PT100	ITS-90	Keithley 27XX user manual ¹⁰	0.003850	0.10863	1.49990	100
		Valeurs du LabView ¹¹	0.003850	0.111	1.507	100
Erreur [°C]			0.06			

⁹Source : Keithley 27XX User Manual

¹⁰Source : NIST

¹¹D'origine inconnue, elles étaient enregistrées tel quel dans la dernière version en la possession de l'auteur