

Tutoriel Logique Floue et Arduino

Table des matières

0. Avertissement.....	4
1. Introduction.....	5
1.1. Limitation.....	5
1.2. Rappel ensemble flou.....	5
1.2.1. différence entre logique nette et logique floue.....	5
1.2.2. Opérateurs ET flou.....	5
1.2.3. Opérateurs OU flou.....	5
1.2.4. Opérateurs NON flou.....	6
1.3. Fuzzification.....	6
1.4. Inférence et défuzzification.....	6
1.4.1. Méthode RACINE SOMME CARRE.....	6
1.5. Principe de la logique floue.....	7
Fig 2 : Principe de la logique floue.....	7
1.5.1. Avantages.....	8
1.5.2. Inconvénients.....	8
2. Fonctions d'appartenance.....	9
2.1. Forme des fonctions d'appartenance des entrées.....	9
2.1.1. courbeENegatif.....	10
2.1.2. courbeEZero.....	10
2.1.3. courbeEPositif.....	10
2.1.4. courbeDeltaENegatif.....	10
2.1.5. courbeDeltaEZero.....	10
2.1.6. courbeDeltaEPositif.....	11
2.1.7. courbeDeltaCarreENegatif.....	11
2.1.8. courbeDeltaCarreEZero.....	11
2.1.9. courbeDeltaCarreEPositif.....	11
2.2. Forme des fonctions d'appartenance de sortie.....	11
2.3. Similitude des fonctions d'appartenance entrée/sortie.....	12
3. Détermination des centres d'application des règles.....	13
3.1. Abscisse centreNeg.....	13
3.2. Abscisse centreZer.....	15
3.3. Abscisse centrePos.....	15
4. Régulateur flou à 1 entrée.....	17
4.1. Structure des règles et matrice des règles (P).....	17
4.2. Degré d'appartenance des entrées (fuzzification).....	18
4.3. Degré d'appartenance de la sortie.....	19
4.4. Défuzzification.....	20
4.5. Variation de la commande.....	21
4.5.1. influence de EOMIN et EOMAX.....	22
5. Régulateur flou à 2 entrées.....	23
5.1. Régulateur type PI.....	23
5.1.1. Structure des règles et matrice des règles (PI).....	23
5.1.2. Degré d'appartenance des entrées (fuzzification).....	24
5.1.3. Degré d'appartenance de la sortie.....	27
5.1.4. Défuzzification.....	29
5.1.5. Variation des commandes.....	32
5.2. Régulateur type PD.....	33
5.2.1. Structure des règles et matrice des règles (PD).....	33
5.2.2. Degré d'appartenance des entrées (fuzzification).....	33
5.2.3. Degré d'appartenance de la sortie.....	36
5.2.4. Défuzzification.....	38
5.2.5. Variation des commandes.....	40
6. Régulateur flou à 3 entrées.....	42
6.1. Structure des règles et matrice des règles (PID).....	42
6.2. Degré d'appartenance des entrées (fuzzification).....	43
6.3. Degré d'appartenance de la sortie.....	49
6.4. Défuzzification.....	51
6.5. Variation des commandes.....	52
7. Détermination des paramètres.....	53
8. Adaptation des entrées et des sorties.....	54
8.1. Entrées.....	54
8.2. Sorties.....	54
8.2.1. Chauffage uniquement.....	54
8.2.2. Chauffage et refroidissement (2 voies).....	54
8.2.3. Autres variantes.....	54
9. Contributions externes.....	55
10. Plate-forme d'essais.....	57
10.1. Principe.....	57
10.2. Schéma électrique.....	57
10.3. Capteur de température CTN.....	57
11. Programme.....	59
11.1. Organigramme.....	59

11.1.1. Module Initialisation.....	59
11.1.2. Module PWM.....	60
11.1.3. Module Mesures et Régulation.....	61
11.1.4. Module Affichage et enregistrement données.....	62
11.2. Variables, Constantes et Defines utilisées.....	63
11.3. Code.....	63
12. Résultats des mesures.....	64
12.1. Régulateur type P.....	64
12.2. Régulateur type PI.....	65
12.3. Régulateur type PD.....	66
12.4. Régulateur type PID.....	67
13. Exemple pratique pour l'appertisation.....	68
13.1. Historique.....	68
13.2. Principe.....	68
13.3. Schéma.....	69
13.4. Résultats.....	69
14. Autres Asservissements.....	69
15. Suite.....	69
16. Conclusion provisoire.....	70
17. Bibliographie :.....	70
17.1. Ouvrages.....	70
17.2. Web.....	70
17.3. Autres.....	70
Annexes :.....	70

0. Avertissement.

Page provisoire

Pour l'instant ce document, un peu brouillon, rassemble mes notes et expériences sur la mise en œuvre de la logique floue. Il fera l'objet de mise à jour en fonction de ma compréhension de la logique floue et du résultat de mes différents essais.

Mon souhait, à terme, est qu'il devienne un tutoriel pour ceux qui souhaiteraient utiliser cette technique dans le cadre de réalisation à base de carte Arduino.

Version :

0-0 :	début notes	15/09/2014
0-1 :	document origine	30/09/2014
0-2 :	compléments	01/10/2014
0-3 :	version intermédiaire, correction + compléments	06/10/2014
0-4 :	compléments	09/10/2014

NPO :

synthèse méthode	02/10/2014
annexes graphiques	09/10/2014

1. Introduction.

1.1. Limitation.

En voulant généraliser au maximum l'approche Logique Floue (LF) avec tous les éléments paramétrables, je me suis retrouvé devant des algorithmes de résolution incompatibles avec nos cartes Arduino. La capacité de traitement de nos chères cartes ne sont pas prévues à cet effet (vitesse de traitement, capacité RAM, etc.).

Pour rendre le traitement informatique acceptable, je me suis imposé les limitations suivantes :

- Toutes les fonctions d'appartenance sont centrées sur l'origine,
- Une symétrie parfaite entre les fonction d'appartenance d'entrée et de sortie.

Ces limitations simplifient considérablement les calculs surtout dans l'application des règles d'inférence.

1.2. Rappel ensemble flou.

Pour ceux qui souhaiteraient en savoir plus sur le concept de la LF, pourront toujours consulter la littérature de Lotfi Azdeh (professeur de l'université de Californie à Berkeley) concepteur de la LF, les nombreux articles disponibles sur le net ou les livres spécialisés sur le sujet.

1.2.1. différence entre logique nette et logique floue.

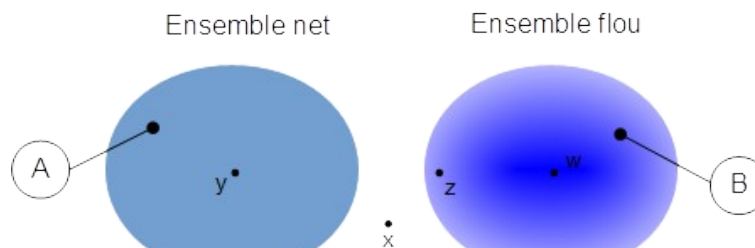


Fig 1 : Ensemble net et ensemble flou

L'ensemble A est ensemble net avec un contour net tandis que l'ensemble n'a pas de frontière nette.

Le point x n'appartient ni à A ni à B

Le point y appartient à A

Le point z appartient partiellement à B (le degré d'appartenance est compris entre 0 et 1)

Le point w appartient totalement à B

Les ensembles nets ne sont qu'un cas particulier des ensembles flous.

1.2.2. Opérateurs ET flou.

La définition des conjonctions floues est un vaste sujet, chaque « grand spécialiste » ayant sa propre définition. Finalement pas aussi clair que ça. :)

Pour ma part, nous avons recensé plus de 8 définitions différentes, elles sont toutes plus ou moins adaptées à des besoins spécifiques.

Pour nos besoins, nous avons retenu l'une des définitions les plus courantes, c'est-à-dire les opérateurs de Zadeh.

Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le MINIMUM des degrés d'appartenance de A et de B.

$$\mu(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(\mu(A), \mu(B))$$

1.2.3. Opérateurs OU flou.

Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le MAXIMUM des degrés d'appartenance de A et de B.

$$\mu(A \text{ OU } B) = \text{MAX}(\mu(A), \mu(B))$$

1.2.4. Opérateurs NON flou.

Le degré de vérité de la proposition « NON A » est la différence de 1 – le degré d'appartenance de A.

$$\mu(NON A) = 1 - \mu(A)$$

1.3. Fuzzification.

La fuzzification représente la transcription des variables réelles en variables linguistiques, c'est-à-dire en langage naturel (humain).

Par exemple, si erreur > 0 alors chauffer (consigne – erreur = +10).

1.4. Inférence et défuzzification.

Le résultat de l'inférence se traduit par une surface d'action déduite des règles d'inférence.

Comme pour les opérateurs de logique floue, les définitions pour l'agrégation des règles sont toutes aussi nombreuses, à savoir :

- moyenne des maxima,
- bissection de la surface,
- centre de gravité,
- racine carrée de la somme des carrés,
- etc...

La défuzzification d'une variable linguistique de sortie représente la transposition du monde flou vers le monde réel ou plus simplement le passage des valeurs floues vers des valeurs physiques.

C'est l'application du résultat de l'inférence.

1.4.1. Méthode RACINE SOMME CARRE.

Le principe de mise en œuvre de cette méthode est relativement simple. A partir des règles d'inférence on détermine les degrés d'appartenance des entrées. Les degrés d'appartenance des entrées vont nous permettre de déterminer le degré d'appartenance de la sortie et finalement permettre de déduire la sortie.

Exemple (cas non réel) :

Règles d'inférence

R1.	SI	erreur < 0	&	deltaErreur > 0	ALORS	Refroidir
R2.	SI	erreur = 0			ALORS	Pas de changement
R3.	SI	erreur > 0	&	deltaErreur < 0	ALORS	Chauffer
R4.	SI	erreur < 0	&	deltaErreur = 0	ALORS	Refroidir

Degré d'appartenance d'entrée (fuzzification)

Si erreur = +10 et deltaErreur = - 5

R1.	SI	erreur < 0	&	deltaErreur > 0	ALORS	Refroidir	à	0,000 & 0,000 = 0,000
R2.	SI	erreur = 0			ALORS	Pas de changement	à	0,800 = 0,800
R3.	SI	erreur > 0	&	deltaErreur < 0	ALORS	Chauffer	à	0,600 & 0,500 = 0,500
R4.	SI	erreur < 0	&	deltaErreur = 0	ALORS	Refroidir	à	0,000 & 0,000 = 0,000

avec : & = ET flou (voir 1.2.2)

degré d'appartenance de la sortie

Il y a lieu d'assembler toutes les règles qui agissent dans le même sens :

- R1 et R4 pour l'action Refroidir (action négative)
- R2 pour l'action Pas de changement (action zéro)
- R3 pour l'action Chauffer (action positive)

$$\begin{aligned} \text{appNeg} &= \sqrt[2]{R1^2 + R4^2} \\ \text{appZeo} &= \sqrt[2]{R2^2} \\ \text{appPos} &= \sqrt[2]{R3^2} \end{aligned}$$

Défuzzification

La sortie est définie par la formule suivante :

$$\text{sortie} = \frac{\text{centreNeg} * \text{appNegative} + \text{centreZer} * \text{appZero} + \text{centrePos} * \text{appPos}}{\text{appNegatif} + \text{appZero} + \text{appPositif}}$$

centreNeg, centreZer et centrePos sont les points d'application des appartenances de sortie. Le détail du calcul de ces points est repris dans le paragraphe 3.

1.5. Principe de la logique floue.

La commande floue permet de traiter des commandes de processus uniquement à partir des connaissances de comportement qui sont formulées par des spécialistes du procédé en langage naturel (forme linguistique).

On part d'entrées physiques pour les transformer en variables linguistiques (langage naturel). Cette opération s'appelle la fuzzification.

Finalement la fuzzification est la transformation d'une valeur numérique en degré d'appartenance flou par évaluation d'une fonction d'appartenance (ce n'est pas toujours clair). Par exemple : il fait beau peut appartenir à OUI pour 70 % et NON pour 30 %.

Les variables linguistiques sont soumises au moteur d'inférence qui se chargera d'appliquer les règles d'inférences. Ces règles, dictées par les experts, représentent les connaissances que l'on a du système ou du processus.

La dernière étape est la défuzzification qui consiste à transformer les variables linguistiques (flou) produites par les règles d'inférence via le moteur d'inférence en une sortie de commande physique (numérique).

Les règles d'inférence sont construites sous la forme :

- Si prémisse1 ET prémisse2 ALORS conclusion1
- Si prémisse3 ALORS conclusion2
- etc.

Attention : les conjonctions OU, ET et NON n'ont pas la même signification qu'en logique classique ou "logique nette".

Un petit schéma pour résumer la situation :

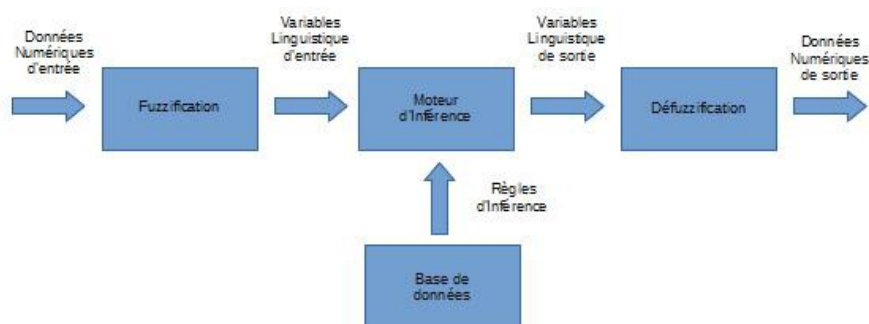


Fig 2 : Principe de la logique floue

Avertissement :

L'approche des problèmes par la logique floue est différente de celle d'une démarche scientifique.

Elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe.

Ne pas être trop cartésien pour aborder la logique floue.

1.5.1. Avantages.

- pas de modèles mathématiques,
- une théorie simple pour des systèmes complexes,
- système pouvant être fortement non linéaire,
- connaissances en 'automatique' réduites,
- une robustesse de commande vis à vis des incertitudes,
- une possibilité de commande auto-adaptative aux variations du procédé.

1.5.2. Inconvénients.

- une technique de réglage essentiellement empirique (j'aime la méthode des tâtonnements successifs ou des petits pas),
- la performance dépend de l'expertise,
- pas de certitude d'avoir les réglages optimaux,
- pas de théorie générale qui caractérise la stabilité et la robustesse.

2. Fonctions d'appartenance.

2.1. Forme des fonctions d'appartenance des entrées.

entrée :

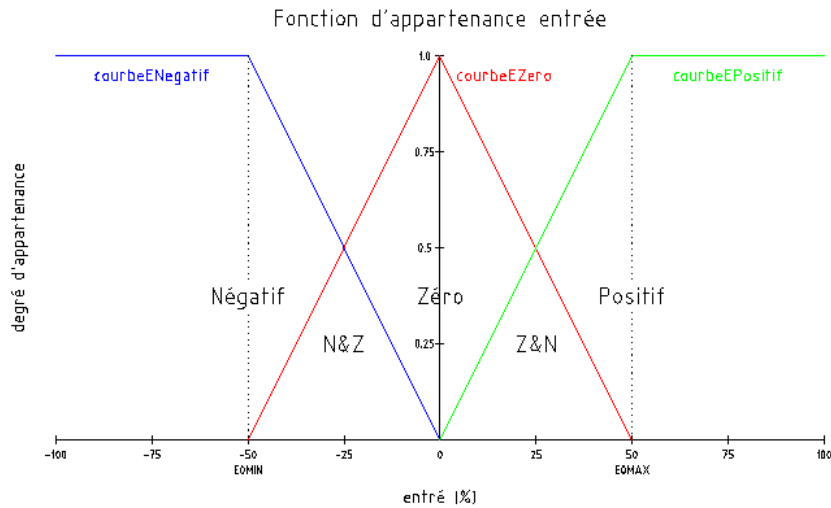


Fig 3 : Appartenance d'entrée

deltaEntrée :

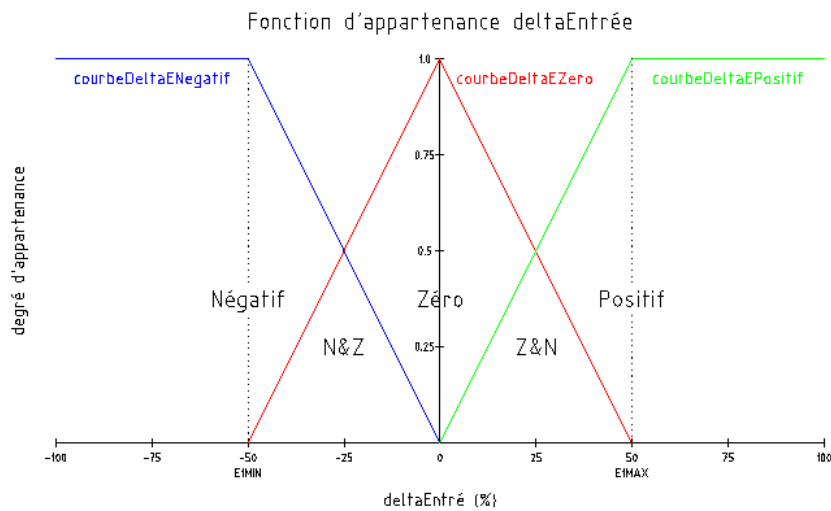


Fig 4 : Appartenance deltaEntrée

deltaCarreEntree :

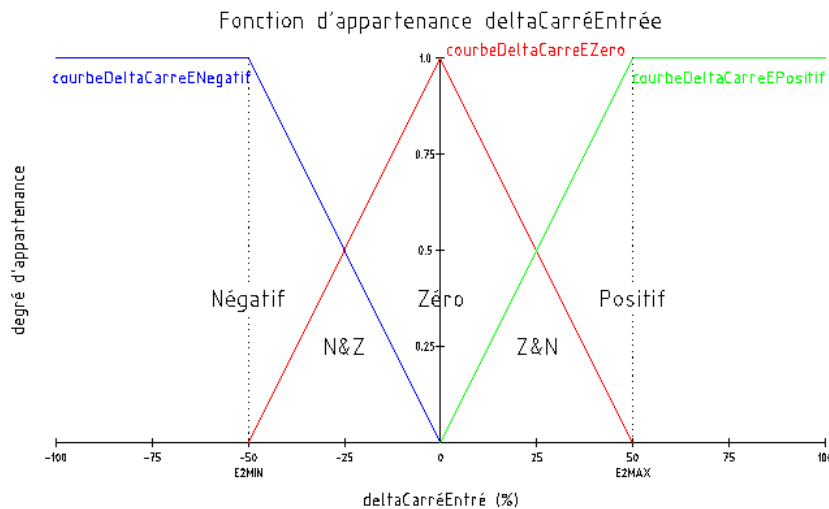


Fig 5 : Appartenance deltaCarreEntrée

Pour simplifier la mise en œuvre de notre application en logique floue, il y a lieu de se placer dans un cas simplifié avec des fonctions d'appartenance d'entrée comme représenté sur la figure ci-dessus.

Les seuls paramètres ajustables sont E0MIN et E0MAX pour une régulation de type P.

Les seuls paramètres ajustables sont E0MIN, E0MAX, E1MIN et E1MAX pour une régulation de type PI.

Les seuls paramètres ajustables sont E0MIN, E0MAX, E2MIN et E2MAX pour une régulation de type PD.

Les seuls paramètres ajustables sont E0MIN, E0MAX, E1MIN, E1MAX, E2MIN et E2MAX pour une régulation de type PID.

Les effets sur les résultats de E0MIN, E0MAX, E1MIN, E1MAX, E2MIN et E2MAX seront abordés ultérieurement.

2.1.1. courbeENegatif.

<i>Si entrée ≤ E0MIN</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = 1</i>
<i>Si entrée > E0MIN ET entrée ≤ 0</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = entrée/E0MIN</i>
<i>Si entrée > 0</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = 0</i>

2.1.2. courbeEZero.

<i>Si entrée < E0MIN</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = 0</i>
<i>Si entrée ≥ E0MIN ET entrée < 0</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = -entrée/E0MIN+1</i>
<i>Si entrée ≥ 0 ET entrée ≤ E0MAX</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = -entrée/E0MAX+1</i>
<i>Si entrée > E0MAX</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = 0</i>

2.1.3. courbeEPositif.

<i>Si entrée < 0</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = 0</i>
<i>Si entrée ≥ 0 ET entrée ≤ E0MAX</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = entrée/E0MAX</i>
<i>Si entrée > E0MAX</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = 1</i>

2.1.4. courbeDeltaENegatif.

<i>Si deltaEntrée ≤ E1MIN</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = 1</i>
<i>Si deltaEntrée > E1MIN ET entrée ≤ 0</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = deltaEntrée/E1MIN</i>
<i>Si deltaEntrée > 0</i>	<i>ALORS degré d'appartenance = 0</i>

2.1.5. courbeDeltaEZero.

$SI \text{ deltaEntrée} < E1MIN$	ALORS degré d'appartenance = 0
$SI \text{ deltaEntrée} \geq E1MIN \text{ ET } \text{entrée} < 0$	ALORS degré d'appartenance = $-\text{deltaEntrée}/E1MIN+1$
$SI \text{ deltaEntrée} \geq 0 \text{ ET } \text{entrée} \leq E1MAX$	ALORS degré d'appartenance = $-\text{deltaEntrée}/E1MAX+1$
$SI \text{ deltaEntrée} > E1MAX$	ALORS degré d'appartenance = 0

2.1.6. courbeDeltaEPositif.

$SI \text{ deltaEntrée} < 0$	ALORS degré d'appartenance = 0
$SI \text{ deltaEntrée} \geq 0 \text{ ET } \text{entrée} \leq E1MAX$	ALORS degré d'appartenance = $\text{deltaEntrée}/E1MAX$
$SI \text{ deltaEntrée} > E1MAX$	ALORS degré d'appartenance = 1

2.1.7. courbeDeltaCarreENegatif.

$SI \text{ deltaCarreEntrée} \leq E2MIN$	ALORS degré d'appartenance = 1
$SI \text{ deltaCarreEntrée} > E2MIN \text{ ET } \text{entrée} \leq 0$	ALORS degré d'appartenance = $\text{deltaCarreEntrée}/E2MIN$
$SI \text{ deltaCarreEntrée} > 0$	ALORS degré d'appartenance = 0

2.1.8. courbeDeltaCarreEZero.

$SI \text{ deltaCarreEntrée} < E2MIN$	ALORS degré d'appartenance = 0
$SI \text{ deltaCarreEntrée} \geq E2MIN \text{ ET } \text{entrée} < 0$	ALORS degré d'appartenance = $-\text{deltaCarreEntrée}/E2MIN+1$
$SI \text{ deltaCarreEntrée} \geq 0 \text{ ET } \text{entrée} \leq E2MAX$	ALORS degré d'appartenance = $-\text{deltaCarreEntrée}/E2MAX+1$
$SI \text{ deltaCarreEntrée} > E2MAX$	ALORS degré d'appartenance = 0

2.1.9. courbeDeltaCarreEPositif.

$SI \text{ deltaCarreEntrée} < 0$	ALORS degré d'appartenance = 0
$SI \text{ deltaCarreEntrée} \geq 0 \text{ ET } \text{entrée} \leq E2MAX$	ALORS degré d'appartenance = $\text{deltaCarreEntrée}/E2MAX$
$SI \text{ deltaCarreEntrée} > E2MAX$	ALORS degré d'appartenance = 1

2.2. Forme des fonctions d'appartenance de sortie.

Pour éviter de longs calculs des plages de sortie pour un degré d'appartenance donné, on utilise des fonctions d'appartenance de sortie identiques à celle de l'entrée, d'un point de vue graphique c'est à dire en proportion (entrée et sortie en%).

Les courbes de sortie sont représentées sur la figure ci-dessous.

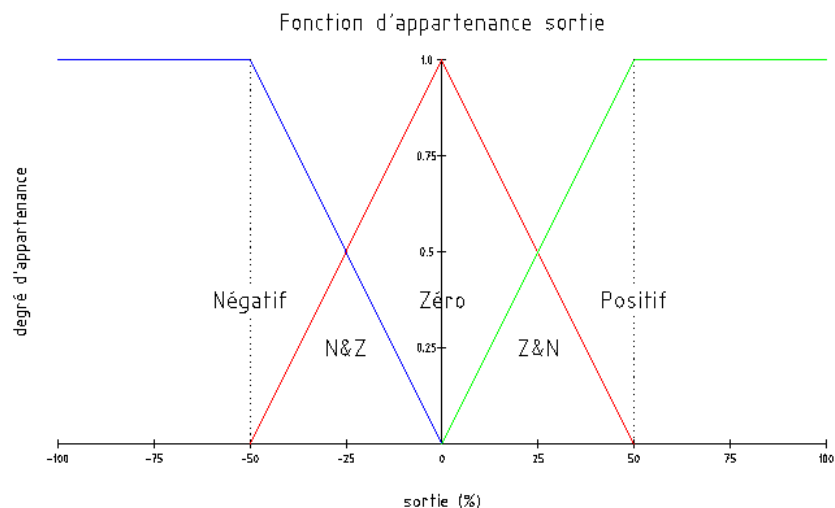


Fig 6 : Appartenance de sortie

2.3. Similitude des fonctions d'appartenance entrée/sortie.

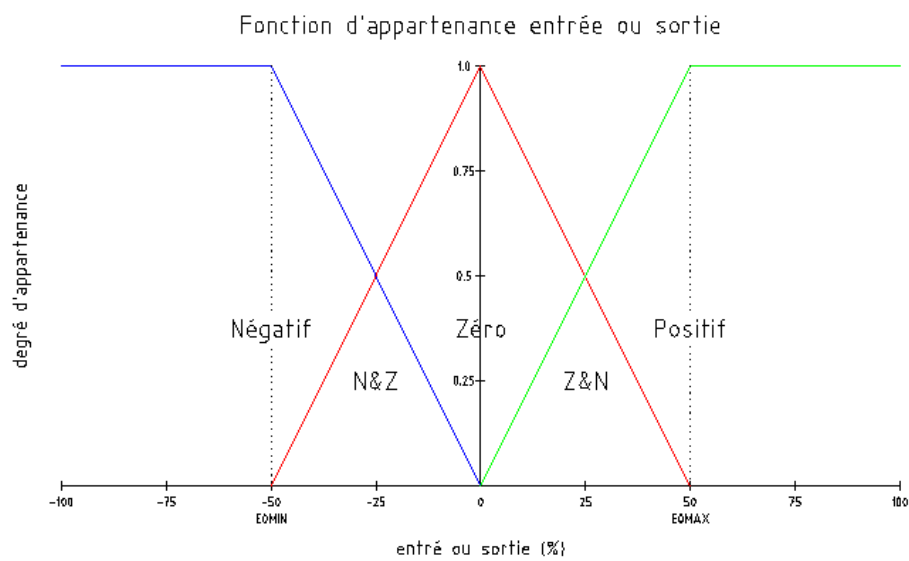


Fig 7 : Appartenance entrée et sortie

Sur la figure ci-dessus, on a la représentation des fonctions d'appartenance d'entrée et de sortie.

3. Détermination des centres d'application des règles.

Pour la suite des calculs, nous avons besoin de connaître l'abscisse du centre de gravité des courbes courbeENegatif, courbeEZero et courbeEPositif. Ces données seront utilisées pour définir l'action de l'appartenance de sortie sur la sortie réelle.

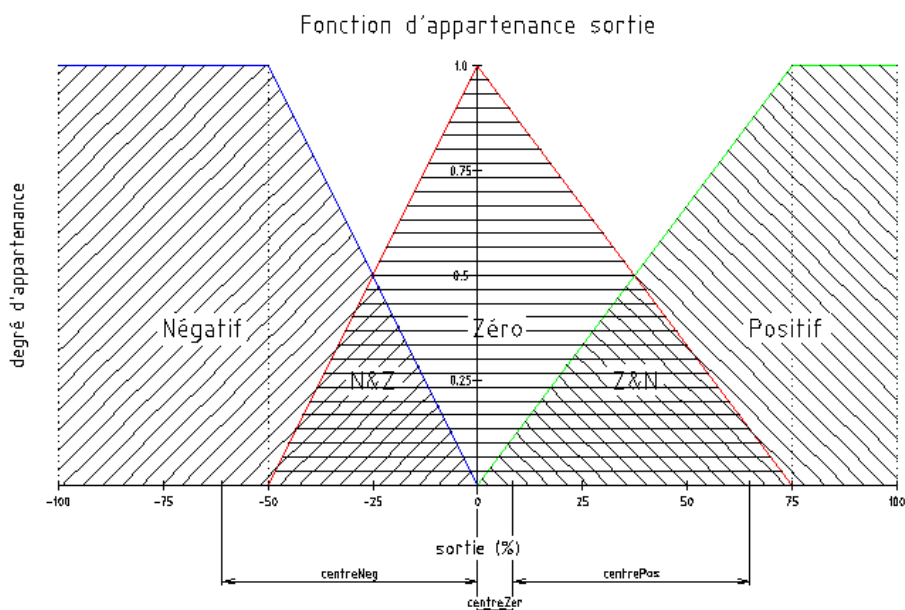


Fig 8 : Zones d'appartenance pour les centreX

3.1. Abscisse centreNeg.

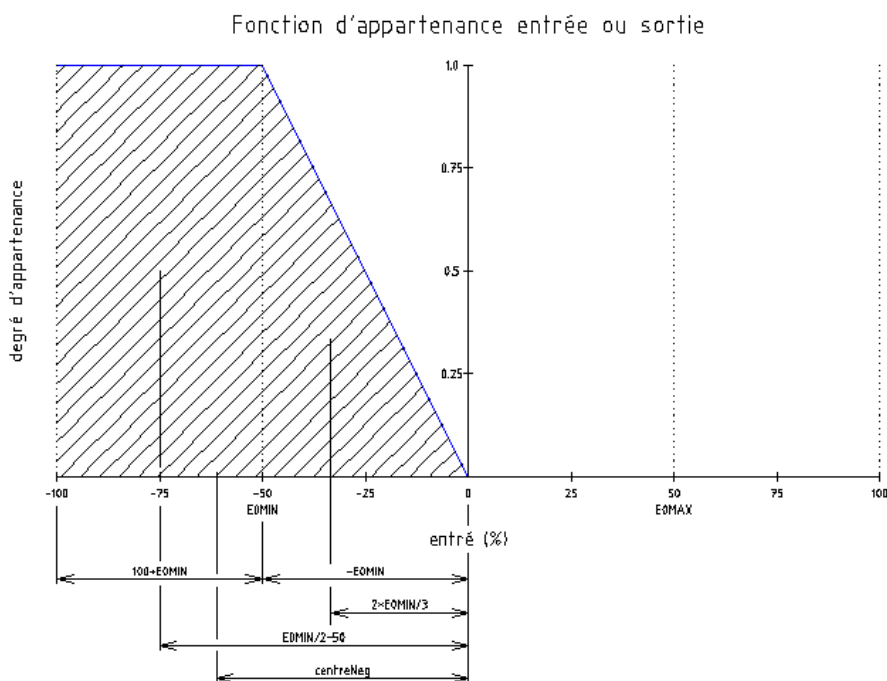


Fig 9 : centreNeg

Le centre gravité de la surface hachurée s'obtient en partant des centres de gravité des figures simples (rectangles, triangle, etc.) en passant par le moment statique.

$$abscisse_{CG} = \frac{\sum \text{Moment Statique}}{\sum \text{Surface}}$$

avec : $\text{Moment Statique} = \text{abscisse CG} * \text{Surface}$

Surface :

$$\text{Surface rectangle} = 100 + E0 \text{ MIN}$$

$$\text{Surface triangle} = \frac{-E0 \text{ MIN}}{2}$$

$$\text{Somme des surfaces} = 100 + \frac{E0 \text{ MIN}}{2}$$

Centre de gravité :

$$\text{CG rectangle} = \frac{E0 \text{ MIN}}{2} - 50$$

$$\text{CG triangle} = \frac{2 * E0 \text{ MIN}}{3}$$

Moment statique :

$$\text{MS rectangle} = \frac{E0 \text{ MIN}^2}{2} - 5000$$

$$\text{MS triangle} = \frac{-E0 \text{ MIN}^2}{3}$$

$$\text{Somme des MS} = \frac{E0 \text{ MIN}^2}{6} - 5000$$

Finalement, on en déduit le centreNega :

$$\text{centreNega} = \frac{E0 \text{ MIN}^2 - 30000}{600 + 3 * E0 \text{ MIN}}$$

Le fait de retrouver ces résultats peut être un excellent exercice pour nos petits neurones. Si vous avez une difficulté quelconque pour obtenir ces résultats, je peux vous fournir le détail de la démarche.

Remarque : Dans certains articles sur la méthode RSS, on retrouve des cas où les centres d'application sont -100 % pour centreNeg, +100 % pour centrePos et 0 % pour centreZer. Cette vision des choses semble acceptable lorsque les différentes courbes sont symétriques, de plus, cela permet d'avoir une sortie comprise entre -100 % et +100 %. La logique floue est très tolérante dans son fonctionnement. Par contre, dans le cas de courbes non symétriques, l'utilisation de ces extrêmes ne sont plus représentatives des formes géométriques réelles.

3.2. Abscisse centreZer.

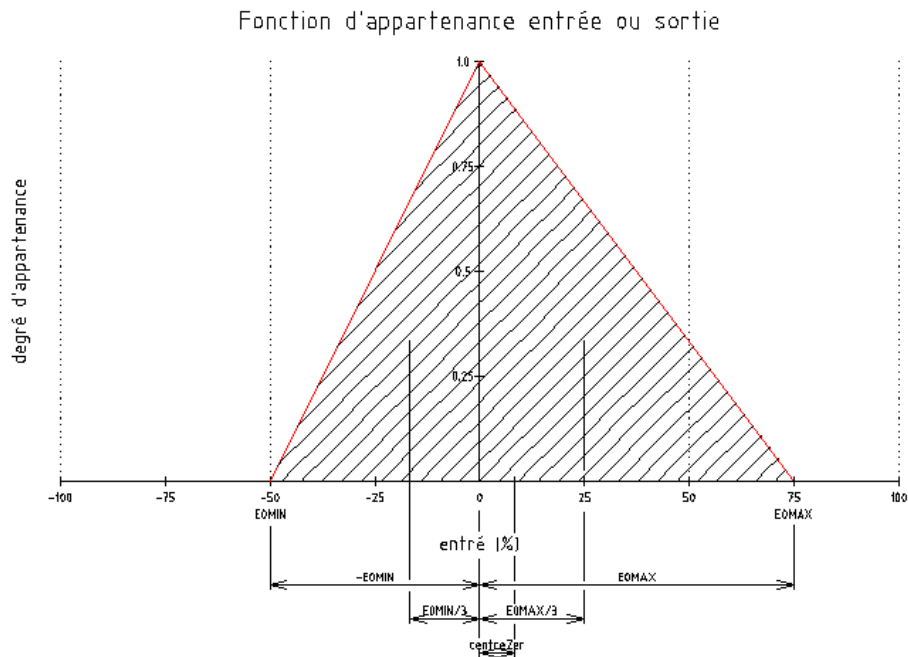


Fig 10 : centreZer

Selon le même principe de calcul, on obtient :

$$centreZer = \frac{E0MAX^2 - E0MIN^2}{3 * (E0MAX - E0MIN)}$$

Remarque : Pour 2 triangles symétriques centreZer = 0.

3.3. Abscisse centrePos.

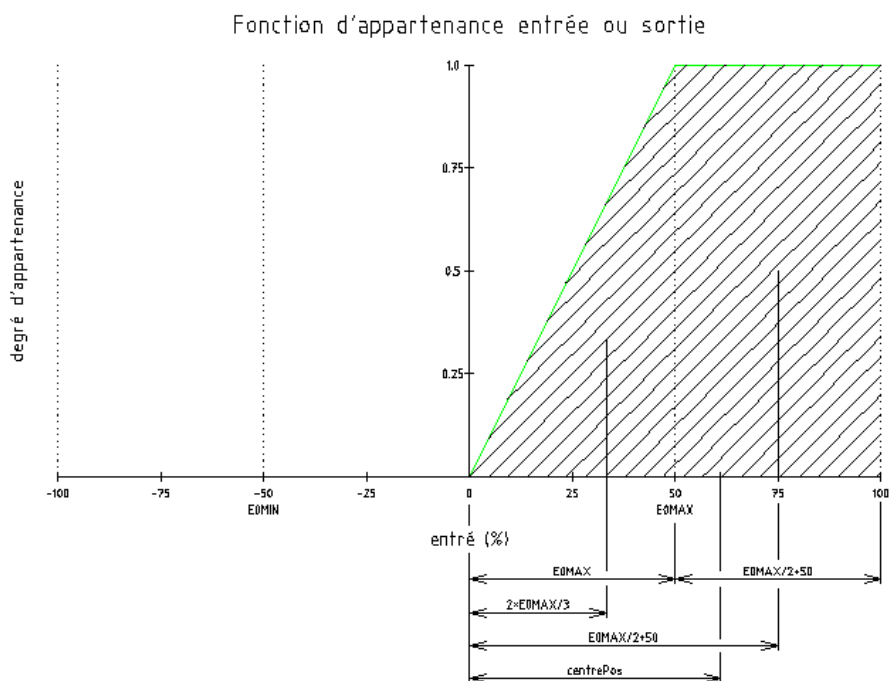


Fig 11 : centrePos

Selon le même principe de calcul, on obtient :

$$centrePos = \frac{30000 - E0MAX^2}{600 - 3 * E0MAX}$$

Les abscisses centreNeg, centreZer et centrePos sont fonctions de la géométrie des fonctions d'appartenance et seront donc des constantes dans nos futurs programmes.

4. Régulateur flou à 1 entrée.

Comme fil rouge, nous nous appuierons sur un dispositif de chauffage commandé par une sortie PWM. Le but est de maintenir le dispositif à une température donnée (consigne). Pour une régulation de température, nous partons de la formule :

$$\text{sortie}(t) = k_p (\text{erreur}(t))$$

$$\text{avec : } \text{erreur} = (\text{consigne} - \text{mesure})$$
$$k_p = \text{coefficient proportionnalité}$$

Notre variable d'entrée sera l'erreur(t) et la variable de sortie sera sortie(t). Cela nous donne donc 3 règles d'inférence.

4.1. Structure des règles et matrice des règles (P).

Les règles linguistiques décrivent le système de commande et elles se composent d'un bloc de prémisses et d'un bloc de conclusion.

Si prémisses1 ALORS condition1
Si prémisses2 ET prémisses2 ALORS condition2
Si etc.

Dans le cas de notre régulateur flou à une entrée nous aurons les règles suivantes :

- R1. Si erreur < 0 ALORS Refroidir (R)
- R2. Si erreur = 0 ALORS Pas de changement (PC)
- R3. Si erreur > 0 ALORS Chauffer (C)

avec : erreur = consigne - mesure

Commentaire sur les règles.

Pour R1 : si l'erreur est négative, c'est-à-dire la mesure est supérieure à la consigne donc il faut refroidir.
Pour R2 : si l'erreur est nulle, c'est-à-dire la mesure est égale à la consigne donc il ne faut rien faire.
Pour R3 : si l'erreur est positive, c'est-à-dire la mesure est inférieure à la consigne donc il faut chauffer.

erreur		
N	Z	P
1. R	2. PC	3. C

Tableau 1 : Matrice règles P

avec :

- N = Négatif
- Z = Zéro
- P = Positif
- R = Refroidir
- PC = Pas de changement
- C = Chauffer

4.2. Degré d'appartenance des entrées (fuzzification).

Pour notre fil rouge, nous avons fixé E0MIN à -100 % et E0MAX à +100 %.

Pour une erreur positive de +30 %.

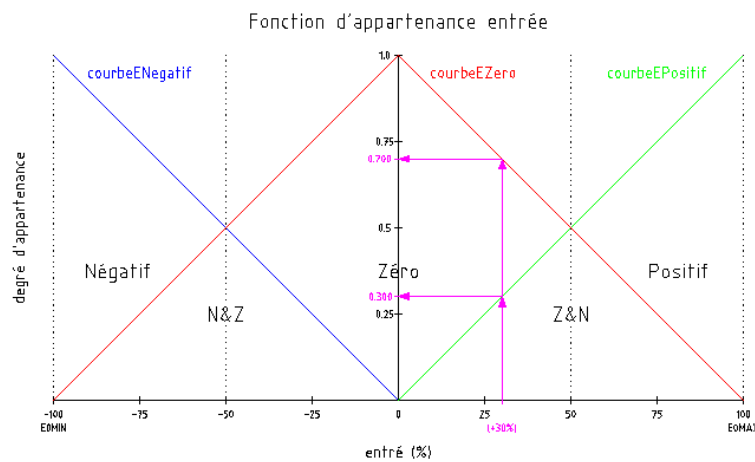


Fig 12 : entrée + 30 %

Remarque : Pour la suite entrée (%) = erreur (%).

Le degré d'appartenance de l'erreur est :

erreur = +30 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)

On applique cette entrée aux différentes règles, à savoir :

- | | |
|---|---------|
| R1. SI erreur < 0 ALORS Refroidir | à 0,000 |
| R2. SI erreur = 0 ALORS Pas de changement | à 0,700 |
| R3. SI erreur > 0 ALORS Chauffer | à 0,300 |

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

Pour une erreur négative de -15 %.

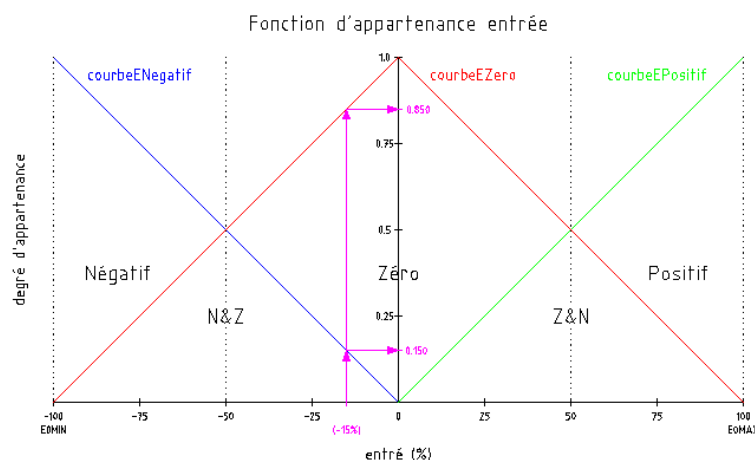


Fig 13 : Entrée -15 %

Le degré d'appartenance de l'erreur est :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique cette entrée aux différentes règles, à savoir :

- | | | |
|-------------------------|-------------------|---------|
| R1. SI erreur < 0 ALORS | Refroidir | à 0,150 |
| R2. SI erreur = 0 ALORS | Pas de changement | à 0,850 |
| R3. SI erreur > 0 ALORS | Chauffer | à 0,000 |

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

4.3. Degré d'appartenance de la sortie.

Pour une erreur positive de +30 %.

$$\text{« appNégatif »} = \sqrt[2]{R1^2} = R1$$

$$\text{« appNégatif »} = 0,000$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R2^2} = R2$$

$$\text{« appZero »} = 0,700$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R3^2} = R3$$

$$\text{« appPositif »} = 0,300$$

Remarque : La formule est simplifiée du fait de l'utilisation d'une seule entrée dans le cas d'entrées multiples d'autres règles composent le calcul (voir la suite).

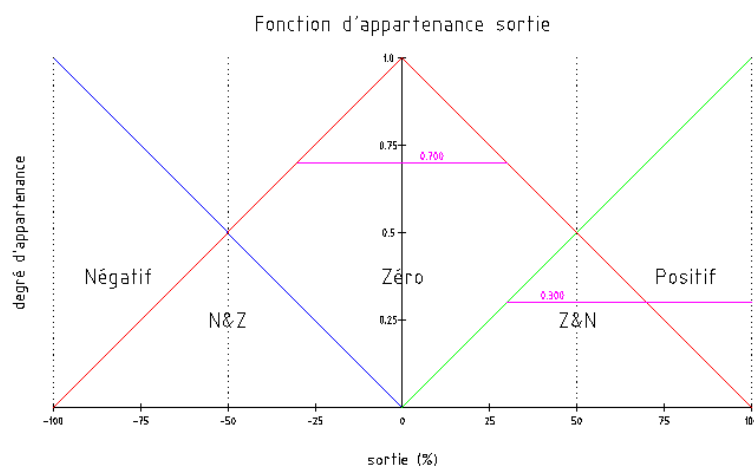


Fig 14 : Appartenance de sortie (entrée +30%)

Pour une erreur négative de -15 %.

$$\text{« appNégatif »} = \sqrt[2]{R1^2} = R1$$

« appNegatif » = 0,150

« appZero » = $\sqrt[2]{R2^2} = R2$

« appZero » = 0,850

« appPositif » = $\sqrt[2]{R3^2} = R3$

« appPositif » = 0,000

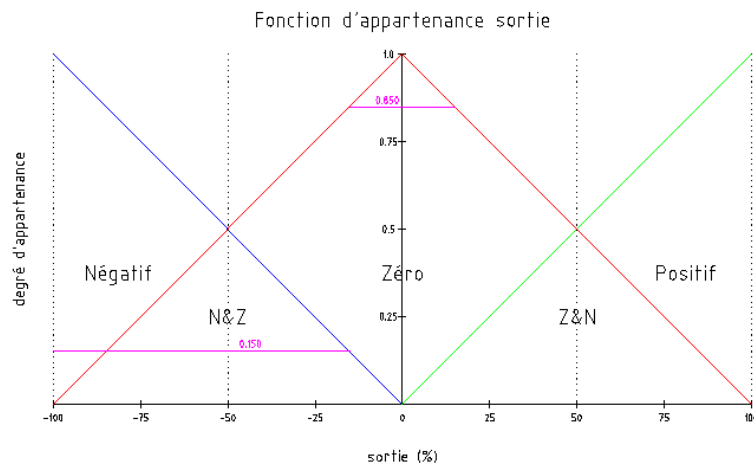


Fig 15 : Appartenance de sortie (entrée -15%)

4.4. Défuzzification.

$$sortie = \frac{centreNeg * appNegatif + centreZer * appZero + centrePos * appPos}{appNegatif + appZero + appPositif}$$

Pour une erreur positive de +30 %.

$$sortie = \frac{-66,667 * 0 + 0 * 0,700 + 66,667 * 0,300}{0,000 + 0,700 + 0,300} = +20 \% \text{ signe + pour chauffer}$$

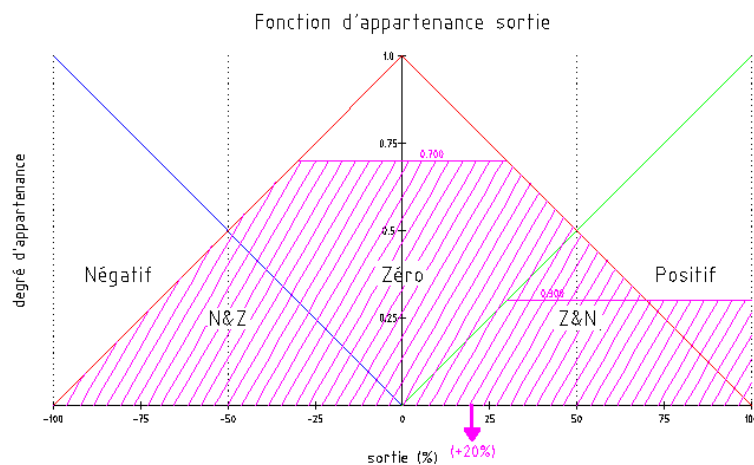


Fig 16 : Sortie (entrée +30%)

Pour une erreur négative de -15 %.

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,150 + 0 * 0,850 + 66,667 * 0,000}{0,150 + 0,850 + 0,000} = -10 \% \text{ signe - pour refroidir}$$

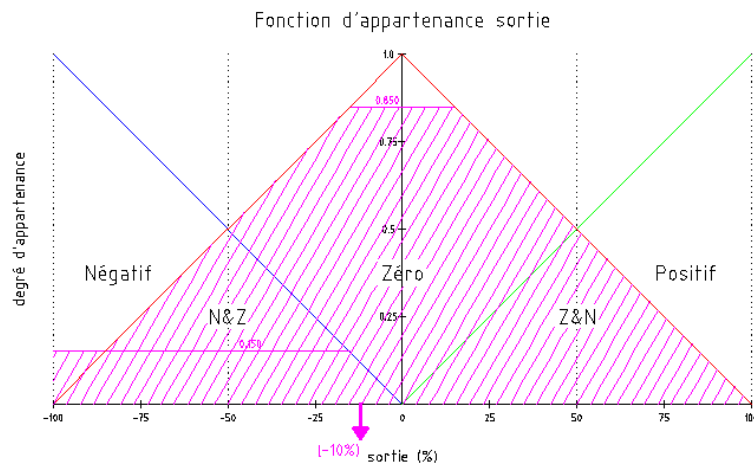


Fig 17 : Sortie (entrée -15%)

Remarque : Dans la mesure où l'on dispose uniquement d'un dispositif de chauffage, il suffit de créer une règle supplémentaire (SI sortie < 0 ALORS sortie = 0). Une sortie négative peut être une commande de ventilateur à vitesse variable.

4.5. Variation de la commande.

Dans le cas d'un dispositif à une entrée, il est facile de simuler les différents cas de fonctionnement. Le spectre de commande est une simple courbe. Pour les dispositifs à entrées multiples les choses sont moins évidentes et leurs représentations graphiques sont moins faciles à faire. Pour 2 entrées on a un spectre de réponses qui est une surface et pour 3 entrées on a un volume.

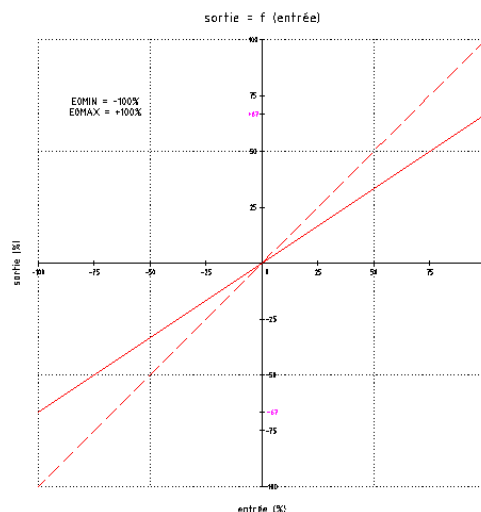


Fig 18 : Variation sortie en fonction de l'entrée

On constate sur la figure ci-dessus que la courbe sortie = f(entrée) (trait continu) varie entre -67 % et +67 % et que l'on exploite pas complètement les possibilités de commande (-100 % à +100%). Cette limitation provient de la méthode de défuzzification. Par contre, il est possible de créer par homothétie une courbe

(trait discontinu) qui peut rétablir cette exploitation de la plage de commande.

Remarque : Dans la mesure où l'on dispose uniquement d'un dispositif de chauffage, il suffit de créer une règle supplémentaire (SI sortie < 0 ALORS sortie = 0). Une sortie négative peut être une commande de ventilateur à vitesse variable.

4.5.1. influence de E0MIN et E0MAX.

L'action de ces paramètres peut se décliner sous deux formes :

- E0MIN et E0MAX sont symétriques,
- E0MIN et E0MAX sont asymétriques.

E0MIN = -75 % et E0MAX = +75 %.

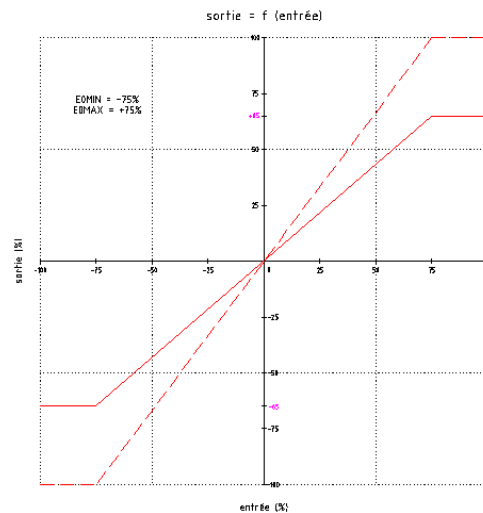


Fig 19 : Variation sortie en fonction de l'entrée (E0MIN=-75 % et E0MAX=+75%)

La diminution symétrique de E0MIN et E0MAX entraîne la formation de palier de commande maximale avec une augmentation de la pente de la courbe entre -75 % et +75 % (trait continu). Si l'on se reporte à l'équation de départ du régulateur de type P cela se traduit par une augmentation de coefficient k_p . La dynamique de commande est également réduite + ou - 65 % au lieu de + ou - 67 %. Il est également possible de corriger cette courbe pour exploiter la gamme de sortie + ou - 100 % (trait discontinu).

E0MIN = -50 % et E0MAX = +100 %.

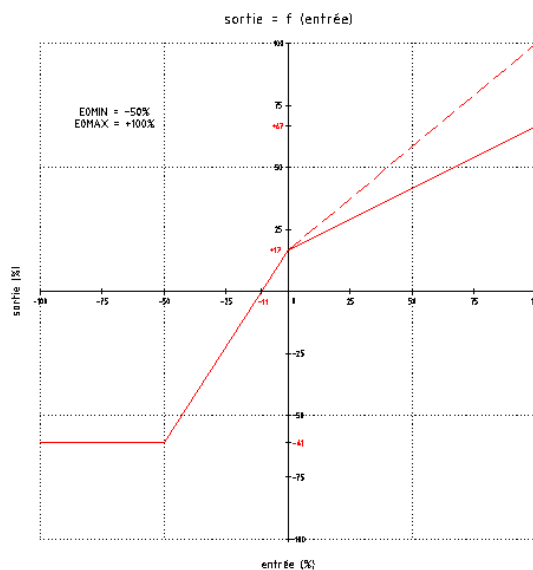


Fig 20 : Variation sortie en fonction de l'entrée (E0MIN=-75 % et E0MAX=+75%)

5. Régulateur flou à 2 entrées.

Nous nous appuierons sur un dispositif de chauffage commandé par une sortie PWM. Le but est de maintenir le dispositif à une température donnée (consigne).

Pour une régulation de température, nous partons de la formule (régulateur PI) :

$$\text{sortie}(t) = k_p * \text{erreur}(t) + k_i * \int \text{erreur}(t)$$

avec : $\text{erreur} = (\text{consigne} - \text{mesure})$
 $k_p = \text{coefficient proportionnalité}$
 $k_i = \text{coefficient intégral}$
 $\int \text{erreur}(t) = \Delta e$

Nos variables d'entrée seront l'erreur(t) et la variation_de_l'erreur(t) (Δe), et la variable de sortie sera sortie(t). Cela nous donne donc 9 règles d'inférence.

Ou bien, dans le cas d'un régulateur PD :

$$\text{sortie}(t) = k_p * \text{erreur}(t) + k_d * \left(\frac{d(\text{erreur}(t))}{d(t)} \right)$$

avec : $\text{erreur} = (\text{consigne} - \text{mesure})$
 $k_p = \text{coefficient proportionnalité}$
 $k_d = \text{coefficient dérivé}$
 $\frac{d(\text{erreur}(t))}{d(t)} = \Delta^2 e$

Nos variables d'entrée seront l'erreur(t) et la variation_de_la_variation_de_l'erreur(t) ($\Delta^2 e$), et la variable de sortie sera sortie(t). Cela nous donne donc 9 règles d'inférence.

5.1. Régulateur type PI.

5.1.1. Structure des règles et matrice des règles (PI).

Dans le cas de notre régulateur flou à deux entrées nous aurons les règles suivantes :

R1.	SI erreur < 0	ET	deltaErreur < 0	ALORS	Pas de changement (PC)
R2.	SI erreur = 0	ET	deltaErreur < 0	ALORS	Chauffer (C)
R3.	SI erreur > 0	ET	deltaErreur < 0	ALORS	Chauffer (C)
R4.	SI erreur < 0	ET	deltaErreur = 0	ALORS	Refroidir (R)
R5.	SI erreur = 0	ET	deltaErreur = 0	ALORS	Pas de changement (PC)
R6.	SI erreur > 0	ET	deltaErreur = 0	ALORS	Chauffer (C)
R7.	SI erreur < 0	ET	deltaErreur > 0	ALORS	Refroidir (R)
R8.	SI erreur = 0	ET	deltaErreur > 0	ALORS	Refroidir (R)
R9.	SI erreur > 0	ET	deltaErreur > 0	ALORS	Pas de changement (PC)

avec : $\text{erreur} = \text{consigne} - \text{mesure}$
 $\text{deltaErreur} = e(t) - e(t-1)$

Commentaire sur les règles.

Pour R1 : si l'erreur est négative et deltaErreur est négatif, c'est-à-dire la mesure est supérieure à la consigne et a tendance à se réduire donc il faut ne rien faire.

Pour R2 : si l'erreur est nulle et deltaErreur est négatif, c'est-à-dire la mesure est égale à la consigne et a tendance à augmenter donc il faut chauffer.

Pour R3 : si l'erreur est positive et deltaErreur est négatif, c'est-à-dire la mesure est inférieure à la consigne et a tendance à augmenter donc il faut chauffer.

Pour les R4 à R6 : On est dans le cas du régulateur de type P.

Pour R7 : si l'erreur est négative et deltaErreur est positif, c'est-à-dire la mesure est supérieure à la consigne et a tendance à augmenter donc il faut refroidir.

Pour R8 : si l'erreur est nulle et deltaErreur est positif, c'est-à-dire la mesure est égale à la consigne et a tendance à augmenter donc il faut refroidir.

Pour R9 : si l'erreur est positif et deltaErreur est positif, c'est-à-dire la mesure est inférieure à la consigne et a tendance à se réduire donc il faut ne rien faire.

		erreur		
		N	Z	P
deltaErreur	N	1. PC	2. C	3. C
	Z	4. R	5. PC	6. C
	P	7. R	8. R	9. PC

Tableau 2 : Matrice règles PI

avec :

N = Négatif
 Z = Zéro
 P = Positif
 R = Refroidir
 PC = Pas de changement
 C = Chauffer

5.1.2. Degré d'appartenance des entrées (fuzzification).

Pour notre fil rouge, nous avons fixé E0MIN à -100 %, E0MAX à +100 %, E1MIN à -100 % et E1MAX à +100 %.

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaErreur positif de +10 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 12.

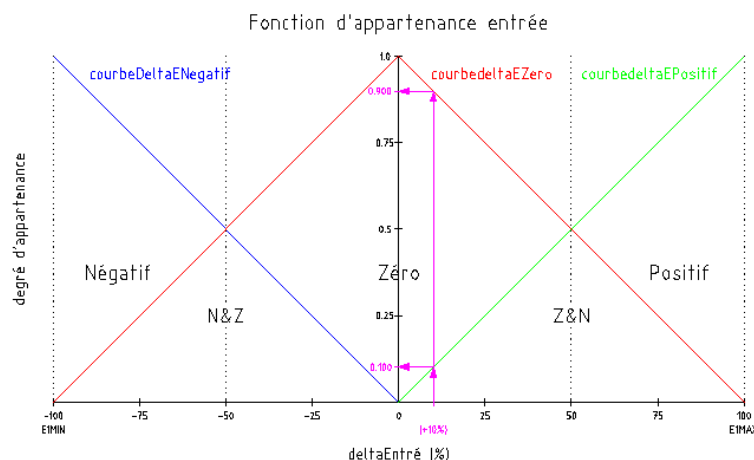


Fig 21 : deltaE +10 %

Les degrés d'appartenance de l'erreur et de deltaErreur sont :

erreur = +30 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)
deltaErreur = +10 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,900, « positif » = 0,100 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. SI erreur < 0 ET deltaErreur < 0 ALORS	Pas de changement (PC)	à	0,000 & 0,000	=	0,000
R2. SI erreur = 0 ET deltaErreur < 0 ALORS	Chauffer (C)	à	0,700 & 0,000	=	0,000
R3. SI erreur > 0 ET deltaErreur < 0 ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,000	=	0,000
R4. SI erreur < 0 ET deltaErreur = 0 ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900	=	0,000
R5. SI erreur = 0 ET deltaErreur = 0 ALORS	Pas de changement (PC)	à	0,700 & 0,900	=	0,700
R6. SI erreur > 0 ET deltaErreur = 0 ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,900	=	0,300
R7. SI erreur < 0 ET deltaErreur > 0 ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,100	=	0,000
R8. SI erreur = 0 ET deltaErreur > 0 ALORS	Refroidir (R)	à	0,700 & 0,100	=	0,100
R9. SI erreur > 0 ET deltaErreur > 0 ALORS	Pas de changement (PC)	à	0,300 & 0,100	=	0,100

avec : & = ET flou

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaErreur négatif de -5 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 12.

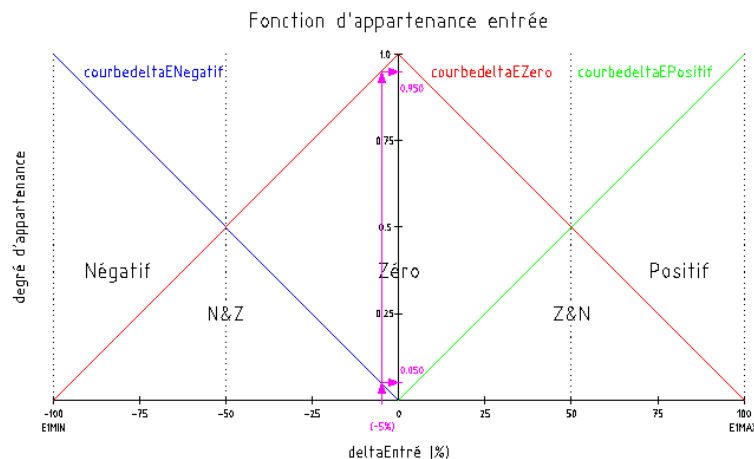


Fig 22 : deltaE -5 %

Les degrés d'appartenance de l'erreur et de deltaErreur sont :

erreur = +30 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)
deltaErreur = -5 : « négatif » = 0,050, « zero » = 0,950, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. SI erreur < 0 ET deltaErreur < 0 ALORS	Pas de changement (PC)	à	0,000 & 0,050	=	0,000
R2. SI erreur = 0 ET deltaErreur < 0 ALORS	Chauffer (C)	à	0,700 & 0,050	=	0,050
R3. SI erreur > 0 ET deltaErreur < 0 ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,050	=	0,050
R4. SI erreur < 0 ET deltaErreur = 0 ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,950	=	0,000
R5. SI erreur = 0 ET deltaErreur = 0 ALORS	Pas de changement (PC)	à	0,700 & 0,950	=	0,700
R6. SI erreur > 0 ET deltaErreur = 0 ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,950	=	0,300

R7. Si erreur < 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,000 & 0,000	= 0,000
R8. Si erreur = 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,700 & 0,000	= 0,000
R9. Si erreur > 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,300 & 0,000	= 0,000

avec : & = ET flou

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaErreur positif de +10 %..

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 13.

Pour la représentation graphique de deltaE : voir courbe Fig 21.

Les degrés d'appartenance de l'erreur et de deltaErreur sont :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

deltaErreur = +10 : « négatif » = 0,050, « zero » = 0,900, « positif » = 0,100 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. Si erreur < 0 ET deltaErreur < 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,150 & 0,000	= 0,000
R2. Si erreur = 0 ET deltaErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,850 & 0,000	= 0,000
R3. Si erreur > 0 ET deltaErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,000	= 0,000
R4. Si erreur < 0 ET deltaErreur = 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,150 & 0,900	= 0,150
R5. Si erreur = 0 ET deltaErreur = 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,850 & 0,900	= 0,850
R6. Si erreur > 0 ET deltaErreur = 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,900	= 0,000
R7. Si erreur < 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,150 & 0,100	= 0,100
R8. Si erreur = 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,850 & 0,100	= 0,100
R9. Si erreur > 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,000 & 0,100	= 0,000

avec : & = ET flou

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaErreur négatif de -5 %..

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 13.

Pour la représentation graphique de deltaE : voir courbe Fig 22.

Les degrés d'appartenance de l'erreur et de deltaErreur sont :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

deltaErreur = -5 : « négatif » = 0,050, « zero » = 0,950, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. Si erreur < 0 ET deltaErreur < 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,150 & 0,050	= 0,050
R2. Si erreur = 0 ET deltaErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,850 & 0,050	= 0,050
R3. Si erreur > 0 ET deltaErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,050	= 0,000
R4. Si erreur < 0 ET deltaErreur = 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,150 & 0,950	= 0,150
R5. Si erreur = 0 ET deltaErreur = 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,850 & 0,950	= 0,850
R6. Si erreur > 0 ET deltaErreur = 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,950	= 0,000
R7. Si erreur < 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,150 & 0,000	= 0,000
R8. Si erreur = 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,850 & 0,000	= 0,000
R9. Si erreur > 0 ET deltaErreur > 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,000 & 0,000	= 0,000

avec : & = ET flou

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

5.1.3. Degré d'appartenance de la sortie.

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaErreur positif de +10 %.

$$\text{« appNegatif »} = \sqrt[2]{R4^2 + R7^2 + R8^2}$$

$$\text{« appNegatif »} = 0,100$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R1^2 + R5^2 + R9^2}$$

$$\text{« appZero »} = 0,707$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R2^2 + R3^2 + R6^2}$$

$$\text{« appPositif »} = 0,300$$

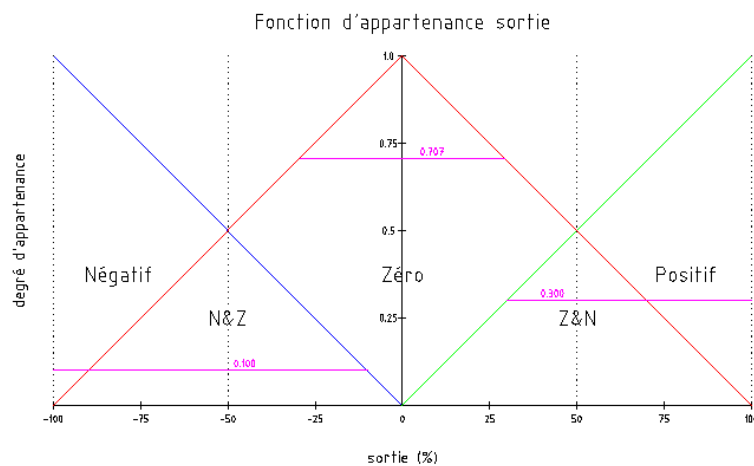


Fig 23 : Appartenance sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=+10%)

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaErreur négatif de -5 %.

$$\text{« appNegatif »} = \sqrt[2]{R4^2 + R7^2 + R8^2}$$

$$\text{« appNegatif »} = 0,000$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R1^2 + R5^2 + R9^2}$$

$$\text{« appZero »} = 0,700$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R2^2 + R3^2 + R6^2}$$

$$\text{« appPositif »} = 0,308$$

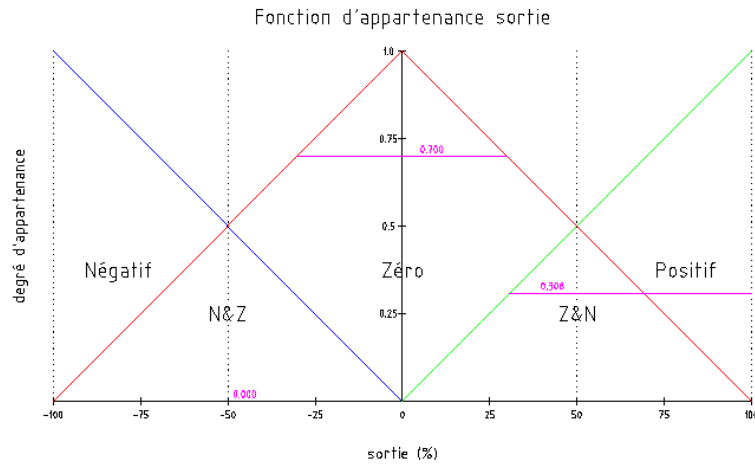


Fig 24 : Appartenance sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=-5%)

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaErreur positif de +10 %..

$$\text{« appNegatif »} = \sqrt[2]{R4^2 + R7^2 + R8^2}$$

$$\text{« appNegatif »} = 0,206$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R1^2 + R5^2 + R9^2}$$

$$\text{« appZero »} = 0,850$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R2^2 + R3^2 + R6^2}$$

$$\text{« appPositif »} = 0,000$$

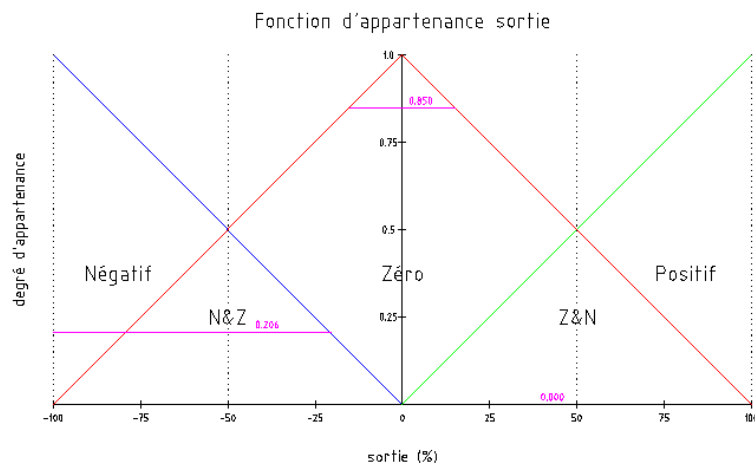


Fig 25 : Appartenance sortie (erreur=-5 %-deltaErreur=+10%)

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaErreur négatif de -5 %..

$$\text{« appNegatif »} = \sqrt[2]{R4^2 + R7^2 + R8^2}$$

$$\text{« appNegatif »} = 0,150$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R1^2 + R5^2 + R9^2}$$

$$\text{« appZero »} = 0,851$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R2^2 + R3^2 + R6^2}$$

$$\text{« appPositif »} = 0,050$$

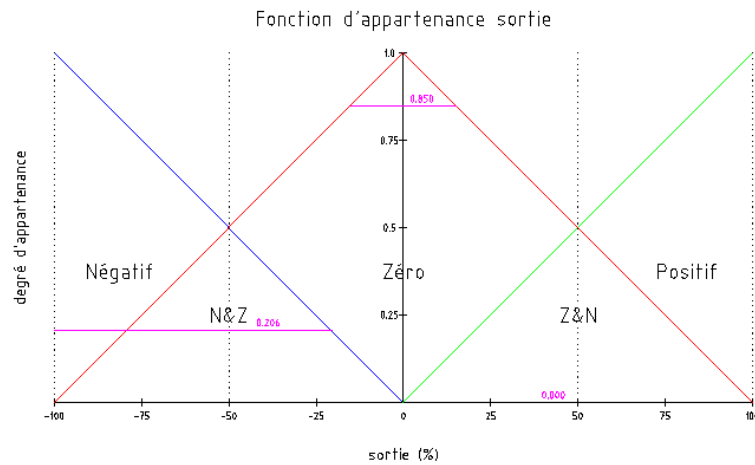


Fig 26 : Appartenance sortie (entrée=-15 %-deltaEntrée=-5%)

5.1.4. Défuzzification.

$$\text{sortie} = \frac{\text{centreNeg} * \text{appNegatif} + \text{centreZer} * \text{appZero} + \text{centrePos} * \text{appPos}}{\text{appNegatif} + \text{appZero} + \text{appPositif}}$$

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaErreur positif de +10 %.

$$\text{sortie} = \frac{-66,667 * 0,100 + 0 * 0,707 + 66,667 * 0,300}{0,100 + 0,707 + 0,300} = +6,6\% \quad \text{signe + pour chauffer}$$

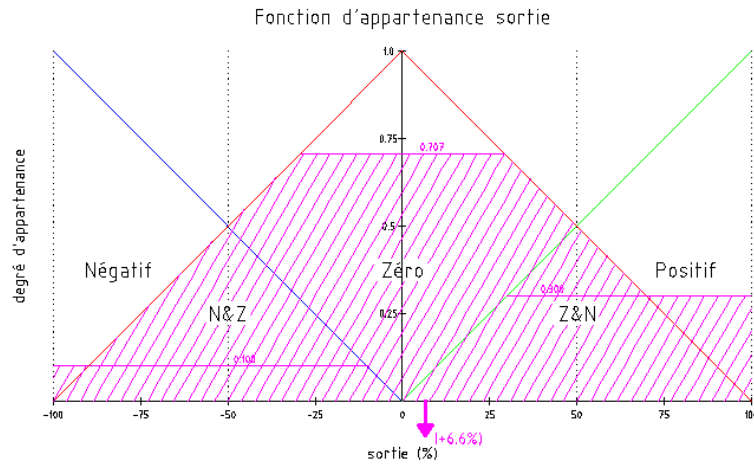


Fig 27 : Sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=+10%)

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaErreur négatif de -5 %.

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,000 + 0 * 0,700 + 66,667 * 0,308}{0,000 + 0,700 + 0,308} = +20,4\% \text{ signe + pour chauffer}$$

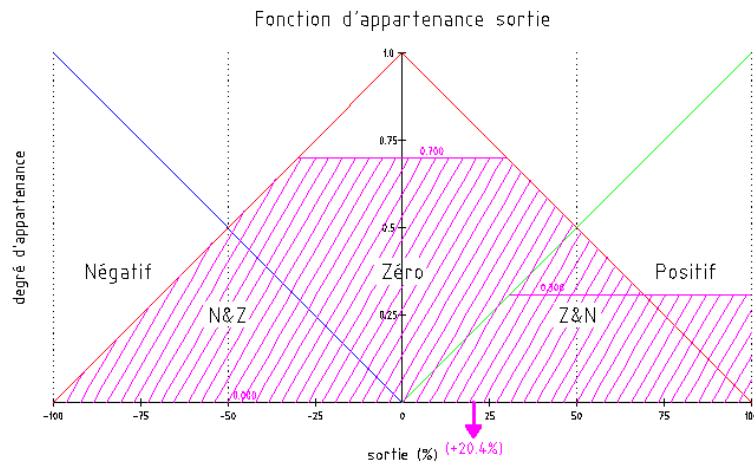


Fig 28 : Sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=-5%)

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaErreur positif de +10 %..

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,206 + 0 * 0,850 + 66,667 * 0,000}{0,206 + 0,850 + 0,000} = -13\% \text{ signe - pour refroidir}$$

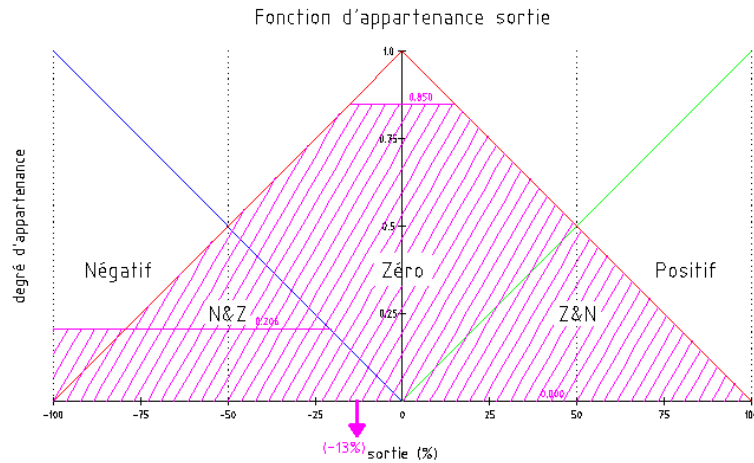


Fig 29 : Sortie (entrée=-15 %-deltaEntrée=+10%)

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaErreur négatif de -5 %..

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,150 + 0 * 0,851 + 66,667 * 0,050}{0,150 + 0,851 + 0,050} = -6,3\% \text{ signe - pour refroidir}$$

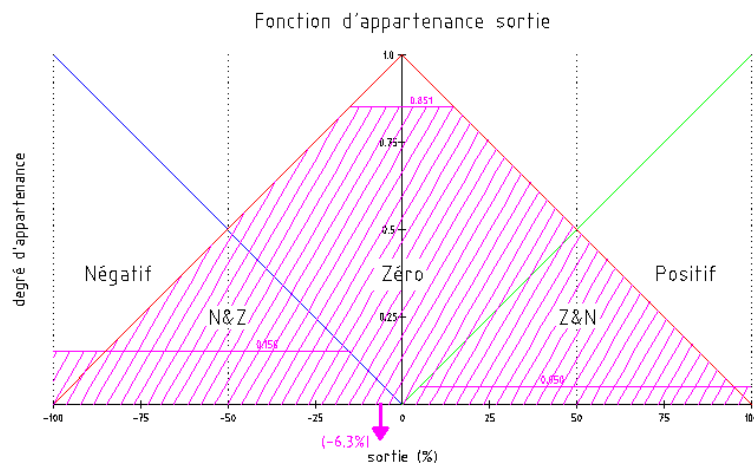


Fig 30 : Sortie (entrée=-15 %-deltaEntrée=-5%)

Remarque : Dans la mesure où l'on dispose uniquement d'un dispositif de chauffage, il suffit de créer une règle supplémentaire (SI sortie < 0 ALORS sortie = 0). Une sortie négative peut être une commande de ventilateur à vitesse variable.

5.1.5. Variation des commandes.

Les graphiques ci-dessus représentent le spectre de sortie du régulateur PI en fonction des entrées erreur et deltaErreur.

La figure 31a correspond au cas général de l'étude (chauffage et refroidissement. La figure 31b représente le spectre de sortie pour notre fil conducteur (mode chauffage et refroidissement par absence de chauffage).

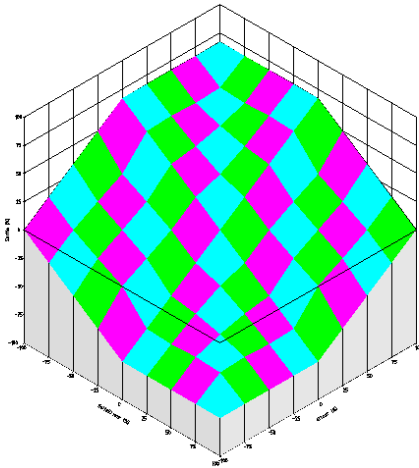


Fig 31a : Variation sortie ($S_{min} \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PI

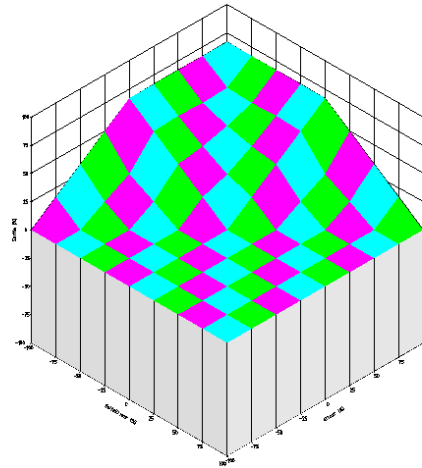


Fig 31b : Variation sortie ($0 \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PI

5.2. Régulateur type PD.

5.2.1. Structure des règles et matrice des règles (PD).

Dans le cas de notre régulateur flou à deux entrées nous aurons les règles suivantes :

- R1. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)
- R2. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)
- R3. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)
- R4. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Refroidir (R)
- R5. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Pas de changement (PC)
- R6. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Chauffer (C)
- R7. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)
- R8. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)
- R9. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)

avec : erreur = consigne – mesure
deltaCarreErreur = deltaErreur(t) – deltaErreur(t-1)

		erreur		
		N	Z	P
deltaCarreErreur	N	1. C	2. C	3. C
	Z	4. R	5. PC	6. C
	P	7. R	8. R	9. R

Tableau 3 : Matrice règles PD

avec :

- N = Négatif
- Z = Zéro
- P = Positif
- R = Refroidir
- PC = Pas de changement
- C = Chauffer

5.2.2. Degré d'appartenance des entrées (fuzzification).

Pour notre fil rouge, nous avons fixé E0MIN à -100 %, E0MAX à +100 %, E2MIN à -100 % et E2MAX à +100 %.

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaCarreErreur positif de +75 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 12.

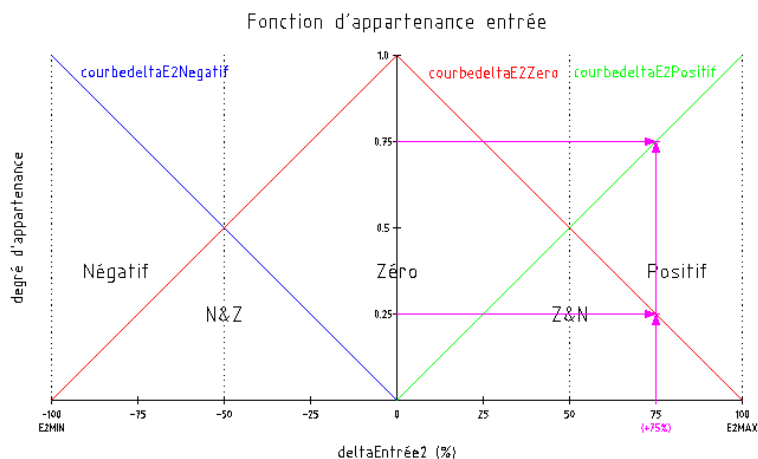


Fig 32 : deltaCarreE +75 %

Les degrés d'appartenance de l'erreur et de deltaCarreErreur sont :

erreur = +30 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)
deltaCarreErreur = +75 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,250, « positif » = 0,750 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,000 = 0,000
R2. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,700 & 0,000 = 0,000
R3. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,300 & 0,000 = 0,000
R4. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,000 & 0,250 = 0,000
R5. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,700 & 0,250 = 0,250
R6. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,300 & 0,250 = 0,250
R7. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,000 & 0,750 = 0,000
R8. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,700 & 0,750 = 0,700
R9. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,300 & 0,750 = 0,300

avec : & = ET flou

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaCarreErreur négatif de -50 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 12.

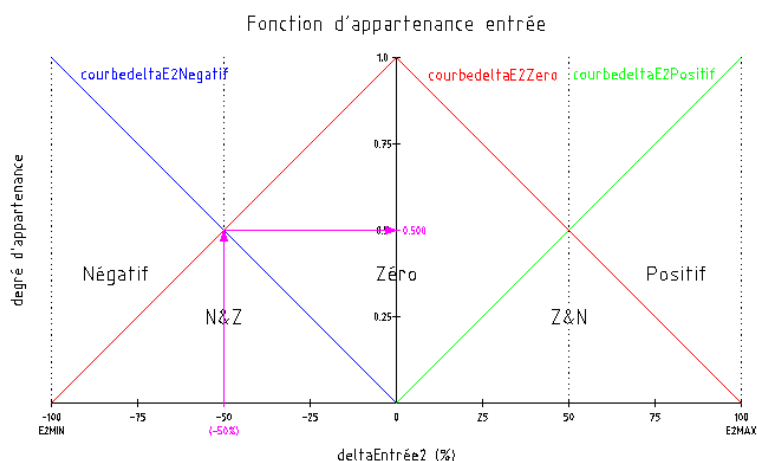


Fig 33 : deltaCarreErreur -50 %

Les degrés d'appartenance de l'erreur et de deltaCarreErreur sont :

erreur = +30 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)
deltaCarreErreur = -50 : « négatif » = 0,500, « zero » = 0,500, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,500 = 0,000
R2. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,700 & 0,500 = 0,500
R3. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,300 & 0,500 = 0,300
R4. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,000 & 0,500 = 0,000
R5. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,700 & 0,500 = 0,500
R6. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,300 & 0,500 = 0,300
R7. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,000 & 0,000 = 0,000
R8. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,700 & 0,000 = 0,000
R9. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,300 & 0,000 = 0,000

avec : & = ET flou

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaCarreErreur positif de +75 %..

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 13.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 31.

Les degrés d'appartenance de l'erreur et de deltaCarreErreur sont :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)
deltaCarreErreur = +75 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,250, « positif » = 0,750 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,150 & 0,000 = 0,000
R2. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,850 & 0,000 = 0,000
R3. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,000 = 0,000
R4. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,150 & 0,250 = 0,150
R5. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,850 & 0,250 = 0,250
R6. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,250 = 0,000
R7. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,150 & 0,750 = 0,150
R8. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,850 & 0,750 = 0,750
R9. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,000 & 0,750 = 0,000

avec : & = ET flou

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaCarreErreur négatif de -50 %..

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 13.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 32.

Les degrés d'appartenance de l'erreur et de deltaCarreErreur sont :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)
deltaCarreErreur = -50 : « négatif » = 0,500, « zero » = 0,500, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,150 & 0,500 = 0,150
R2. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,850 & 0,500 = 0,500
R3. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur < 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,500 = 0,000
R4. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,150 & 0,500 = 0,150
R5. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Pas de changement (PC)	à 0,850 & 0,500 = 0,500
R6. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur = 0 ALORS Chauffer (C)	à 0,000 & 0,500 = 0,000
R7. SI erreur < 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,150 & 0,000 = 0,000
R8. SI erreur = 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,850 & 0,000 = 0,000
R9. SI erreur > 0 ET deltaCarreErreur > 0 ALORS Refroidir (R)	à 0,000 & 0,000 = 0,000

avec : & = ET flou

A partir de ces données, on détermine le degré d'appartenance de la sortie par la méthode RSS (racine carrée de la somme des carrés).

5.2.3. Degré d'appartenance de la sortie.

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaCarreErreur positif de +75 %.

$$\text{« appNégatif »} = \sqrt[2]{R_4^2 + R_7^2 + R_8^2 + R_9^2}$$

$$\text{« appNégatif »} = 0,762$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R_5^2} = R_5$$

$$\text{« appZero »} = 0,250$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + R_6^2}$$

$$\text{« appPositif »} = 0,250$$

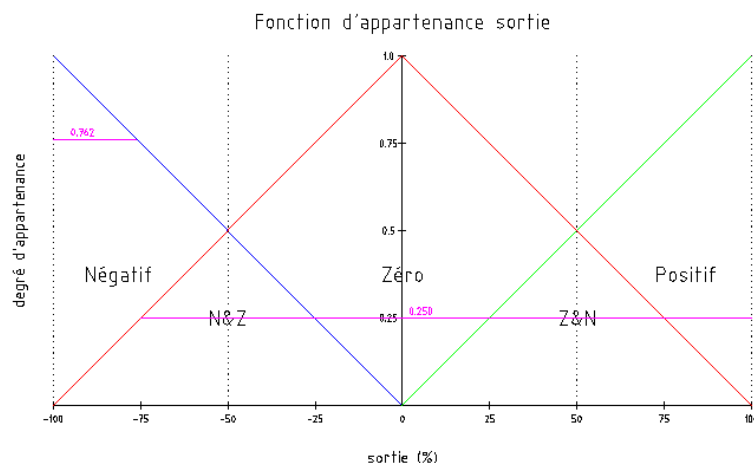


Fig 34 : Appartenance sortie (entrée=+30 %-deltaCarreE=+75%)

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaCarreErreur négatif de -50 %.

$$\text{« appNégatif »} = \sqrt[2]{R_4^2 + R_7^2 + R_8^2 + R_9^2}$$

« appNegatif » = 0,000

« appZero » = $\sqrt[2]{R5^2} = R5$

« appZero » = 0,500

« appPositif » = $\sqrt[2]{R1^2 + R2^2 + R3^2 + R6^2}$

« appPositif » = 0,656

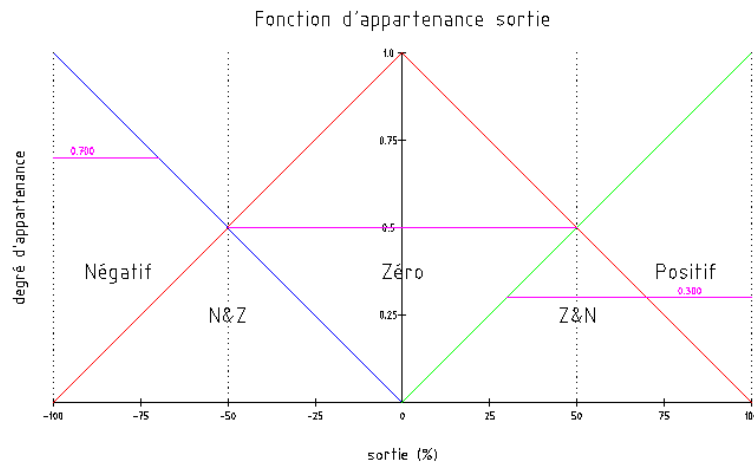


Fig 35 : Appartenance sortie (entrée=+30 %-deltaCarreE=-50%)

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaCarreErreur négatif de +75 %..

« appNegatif » = $\sqrt[2]{R4^2 + R7^2 + R8^2 + R9^2}$

« appNegatif » = 0,779

« appZero » = $\sqrt[2]{R5^2} = R5$

« appZero » = 0,250

« appPositif » = $\sqrt[2]{R1^2 + R2^2 + R3^2 + R6^2}$

« appPositif » = 0,000

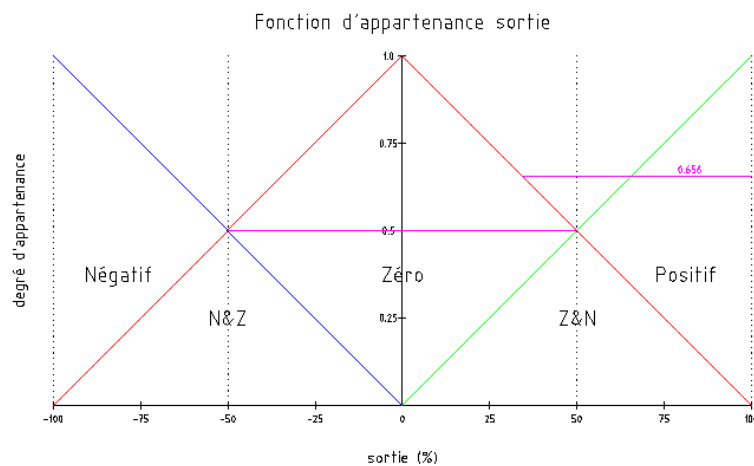


Fig 36 : Appartenance sortie (entrée=-15 %-deltaCarreE=+75%)

Pour une erreur négative de -15 % et un deltaCarreErreur négatif de -50 %..

$$\text{« appNegatif »} = \sqrt[2]{R_4^2 + R_7^2 + R_8^2 + R_9^2}$$

$$\text{« appNegatif »} = 0,150$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R_5^2} = R_5$$

$$\text{« appZero »} = 0,500$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + R_6^2}$$

$$\text{« appPositif »} = 0,522$$

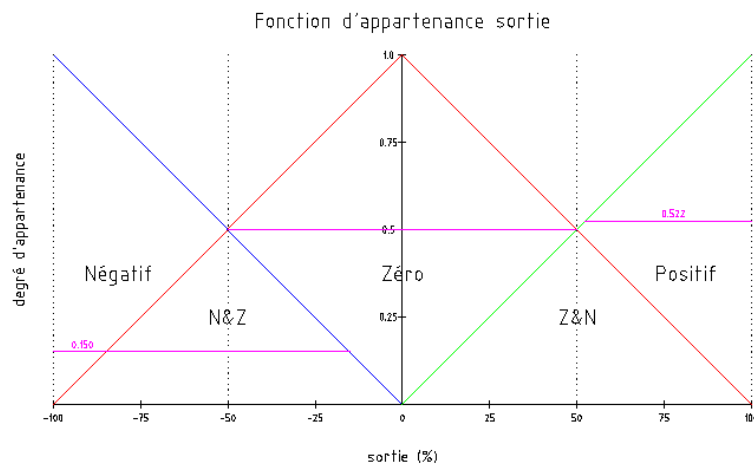


Fig 37 : Appartenance sortie (entrée=-15 %-deltaCarreE=-50%)

5.2.4. Défuzzification.

$$\text{sortie} = \frac{\text{centreNeg} * \text{appNegatif} + \text{centreZer} * \text{appZero} + \text{centrePos} * \text{appPos}}{\text{appNegatif} + \text{appZero} + \text{appPositif}}$$

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaCarreErreur positif de +75 %.

$$\text{sortie} = \frac{-66,667 * 0,762 + 0 * 0,250 + 66,667 * 0,250}{0,762 + 0,250 + 0,250} = -27\% \quad \text{signe - pour refroidir}$$

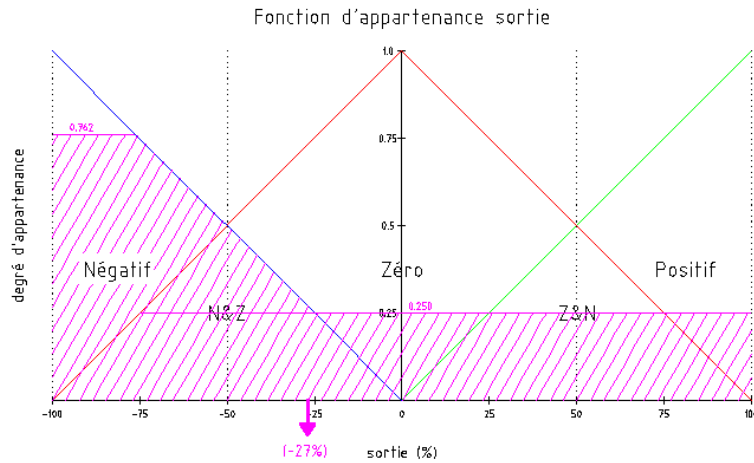


Fig 38 : Sortie (entrée=+30 %-deltaCarreE=+75%)

Pour une erreur positive de +30 % et un deltaCarreErreur positif de -50 %.

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,000 + 0 * 0,500 + 66,667 * 0,656}{0,000 + 0,500 + 0,656} = +37,8\% \text{ signe + pour refroidir}$$

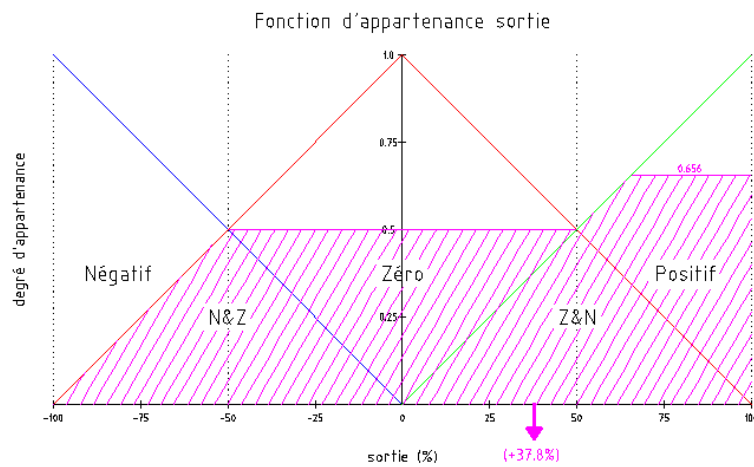


Fig 39 : Sortie (entrée=+30 %-deltaCarreE=-50%)

Pour une erreur positive de -15 % et un deltaCarreErreur positif de +75 %.

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,779 + 0 * 0,250 + 66,667 * 0,000}{0,779 + 0,250 + 0,000} = -51,9\% \text{ signe - pour refroidir}$$

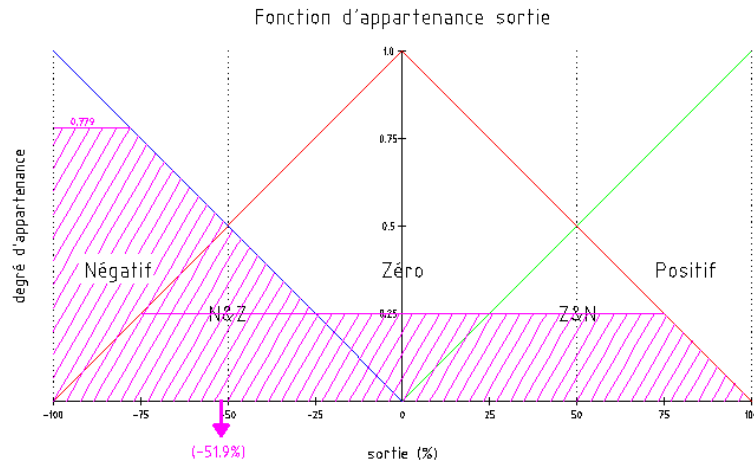


Fig 40 : Sortie (entrée=-15 %-deltaCarreE=+75%)

Pour une erreur positive de -15 % et un deltaCarreErreur positif de -50 %.

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,150 + 0 * 0,500 + 66,667 * 0,522}{0,150 + 0,500 + 0,522} = +21,2\% \text{ signe + pour chauffer}$$

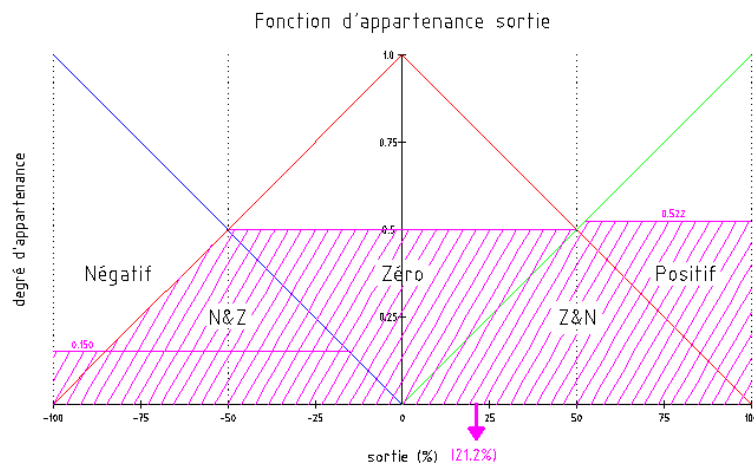


Fig 41 : Sortie (entrée=-15 %-deltaCarreE=-50%)

5.2.5. Variation des commandes.

Les graphiques ci-dessus représentent le spectre de sortie du régulateur PD en fonction des entrées erreur et deltaCarréErreur.

La figure 41a correspond au cas général de l'étude (chauffage et refroidissement. La figure 41b représente le spectre de sortie pour notre fil conducteur (mode chauffage et refroidissement par absence de chauffage).

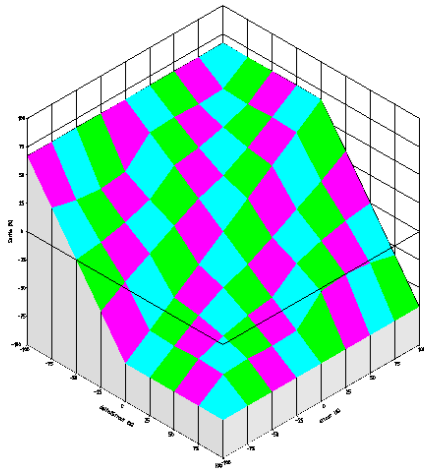


Fig 42a : Sortie ($S_{min} \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PD

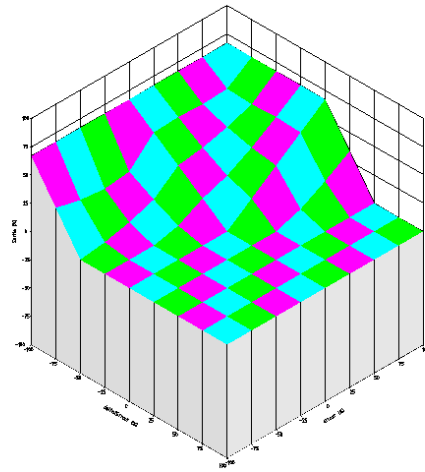


Fig 42b : Sortie ($0 \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PD

6. Régulateur flou à 3 entrées.

Nous nous appuierons sur un dispositif de chauffage commandé par une sortie PWM. Le but est de maintenir le dispositif à une température donnée (consigne).

Pour une régulation de température, nous partons de la formule (régulateur PID) :

$$\text{sortie}(t) = k_p * \text{erreur}(t) + k_i * \int \text{erreur}(t) + k_d * \left(\frac{d(\text{erreur}(t))}{d(t)} \right)$$

avec : $\text{erreur} = (\text{consigne} - \text{mesure})$

$k_p = \text{coefficient proportionnalité}$

$k_i = \text{coefficient intégral}$

$k_d = \text{coefficient dérivé}$

$\int \text{erreur}(t) = \Delta e$

$\frac{d(\text{erreur}(t))}{d(t)} = \Delta^2 e$

Nos variables d'entrée seront l'erreur(t), la variation_de_l'erreur(t) (Δe) et la variation_de_la_variation_de_l'erreur(t) ($\Delta^2 e$), et la variable de sortie sera sortie(t). Cela nous donne donc 27 règles d'inférence.

6.1. Structure des règles et matrice des règles (PID).

Dans le cas de notre régulateur flou à trois entrées nous aurons les règles suivantes :

R1.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Pas de changement (PC)
R2.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Chauffer (C)
R3.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Chauffer (C)
R4.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Chauffer (C)
R5.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Chauffer (C)
R6.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Chauffer (C)
R7.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Refroidir (R)
R8.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Refroidir (R)
R9.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur < 0	ALORS	Pas de changement (PC)
R10.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Pas de changement (PC)
R11.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Chauffer (C)
R12.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Chauffer (C)
R13.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Refroidir (R)
R14.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Pas de changement (PC)
R15.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Chauffer (C)
R16.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Refroidir (R)
R17.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Refroidir (R)
R18.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur = 0	ALORS	Pas de changement (PC)
R19.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Pas de changement (PC)
R20.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Chauffer (C)
R21.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur < 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Chauffer (C)
R22.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Refroidir (R)
R23.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Refroidir (R)
R24.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur = 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Refroidir (R)
R25.	SI	erreur < 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Refroidir (R)
R26.	SI	erreur = 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Refroidir (R)
R27.	SI	erreur > 0	ET	deltaErreur > 0	ET	deltaCarreErreur > 0	ALORS	Pas de changement (PC)

avec : erreur = consigne - mesure

deltaErreur = e(t) - e(t-1)

deltaCarreErreur = deltaErreur(t) - deltaErreur(t-1)

			erreur		
			N	Z	P
N	deltaErreur	N	1. PC	2. C	3. C
		Z	4. C	5. C	6. C
		P	7. R	8. R	9. PC
Z		N	10. PC	11. C	12. C
		Z	13. R	14. PC	15. C
		P	16. R	17. R	18. PC
P		N	19. PC	20. C	21. C
		Z	22. R	23. R	24. R
		P	25. R	26. R	27. PC

Tableau 4 : Matrice règles PID

avec :

- N = Négatif
- Z = Zéro
- P = Positif
- R = Refroidir
- PC = Pas de changement
- C = Chauffer

6.2. Degré d'appartenance des entrées (fuzzification).

Pour notre fil rouge, nous avons fixé E0MIN à -100 %, E0MAX à +100 %, E1MIN à -100 %, E1MAX à +100 %, E2MIN à -100 % et E2MAX à +100 %.

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 12.

Pour la représentation graphique de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 21.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 31.

Les degrés d'appartenance de l'erreur, de la variation d'erreur et de la variation de variation de l'erreur sont :

erreur = +30 : « negatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)

deltaErreur = +10 : « negatif » = 0,000, « zero » = 0,900, « positif » = 0,100 (voir courbe ci-dessus)

deltaCarreErreur = +75 : « negatif » = 0,000, « zero » = 0,250, « positif » = 0,750 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

- R1. SI $e < 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,000 \& 0,000 \& 0,000 = 0,000$
- R2. SI $e = 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,700 \& 0,000 \& 0,000 = 0,000$
- R3. SI $e > 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,300 \& 0,000 \& 0,000 = 0,000$
- R4. SI $e < 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,000 \& 0,900 \& 0,000 = 0,000$
- R5. SI $e = 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,700 \& 0,900 \& 0,000 = 0,000$

R6.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,900 & 0,000 =	0,000
R7.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,100 & 0,000 =	0,000
R8.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,700 & 0,100 & 0,000 =	0,000
R9.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,300 & 0,100 & 0,000 =	0,000
R10.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,250 =	0,000
R11.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,700 & 0,000 & 0,250 =	0,000
R12.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,000 & 0,250 =	0,000
R13.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900 & 0,250 =	0,000
R14.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,700 & 0,900 & 0,250 =	0,250
R15.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,900 & 0,250 =	0,250
R16.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,100 & 0,250 =	0,000
R17.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,700 & 0,100 & 0,250 =	0,100
R18.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,300 & 0,100 & 0,250 =	0,100
R19.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,750 =	0,000
R20.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,700 & 0,000 & 0,750 =	0,000
R21.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,000 & 0,750 =	0,000
R22.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900 & 0,750 =	0,000
R23.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,700 & 0,900 & 0,750 =	0,700
R24.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,300 & 0,900 & 0,750 =	0,300
R25.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,100 & 0,750 =	0,000
R26.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,700 & 0,100 & 0,750 =	0,100
R27.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,300 & 0,100 & 0,750 =	0,100

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 12.

Pour la représentation graphique de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 21.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 32.

Les degrés d'appartenance de l'erreur, de la variation d'erreur et de la variation de variation de l'erreur sont :

erreur = +30 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)

deltaErreur = +10 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,900, « positif » = 0,100 (voir courbe ci-dessus)

deltaCarreErreur = -50 : « négatif » = 0,500, « zero » = 0,500, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R2.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,700 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R3.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R4.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,900 & 0,500 =	0,000
R5.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,700 & 0,900 & 0,500 =	0,500
R6.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,900 & 0,500 =	0,300
R7.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,100 & 0,500 =	0,000
R8.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,700 & 0,100 & 0,500 =	0,100
R9.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,300 & 0,100 & 0,500 =	0,100
R10.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R11.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,700 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R12.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R13.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900 & 0,500 =	0,000
R14.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,700 & 0,900 & 0,500 =	0,500
R15.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,900 & 0,500 =	0,300
R16.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,100 & 0,500 =	0,000
R17.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,700 & 0,100 & 0,500 =	0,100
R18.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,300 & 0,100 & 0,500 =	0,100
R19.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R20.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,700 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R21.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,300 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R22.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900 & 0,000 =	0,000
R23.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900 & 0,000 =	0,000
R24.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900 & 0,000 =	0,000

R25. SI $e < 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,000 \& 0,100 \& 0,000 = 0,000$
R26. SI $e = 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,000 \& 0,100 \& 0,000 = 0,000$
R27. SI $e > 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,000 \& 0,100 \& 0,000 = 0,000$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 12.

Pour la représentation graphique de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 22.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 31.

Les degrés d'appartenance de l'erreur, de la variation d'erreur et de la variation de variation de l'erreur sont :

erreur = +30 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)

deltaErreur = -5 : « négatif » = 0,050, « zero » = 0,950, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

deltaCarreErreur = +75 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,250, « positif » = 0,750 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. SI $e < 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,000 \& 0,050 \& 0,000 = 0,000$
R2. SI $e = 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,700 \& 0,050 \& 0,000 = 0,000$
R3. SI $e > 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,300 \& 0,050 \& 0,000 = 0,000$
R4. SI $e < 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,000 \& 0,950 \& 0,000 = 0,000$
R5. SI $e = 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,700 \& 0,950 \& 0,000 = 0,000$
R6. SI $e > 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,300 \& 0,950 \& 0,000 = 0,000$
R7. SI $e < 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,000 \& 0,000 \& 0,000 = 0,000$
R8. SI $e = 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,700 \& 0,000 \& 0,000 = 0,000$
R9. SI $e > 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,300 \& 0,000 \& 0,000 = 0,000$
R10. SI $e < 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,000 \& 0,050 \& 0,250 = 0,000$
R11. SI $e = 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,700 \& 0,050 \& 0,250 = 0,050$
R12. SI $e > 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,300 \& 0,050 \& 0,250 = 0,050$
R13. SI $e < 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,000 \& 0,950 \& 0,250 = 0,000$
R14. SI $e = 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,700 \& 0,950 \& 0,250 = 0,250$
R15. SI $e > 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,300 \& 0,950 \& 0,250 = 0,250$
R16. SI $e < 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,000 \& 0,000 \& 0,250 = 0,000$
R17. SI $e = 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,700 \& 0,000 \& 0,250 = 0,000$
R18. SI $e > 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e = 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,300 \& 0,000 \& 0,250 = 0,000$
R19. SI $e < 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,000 \& 0,050 \& 0,750 = 0,000$
R20. SI $e = 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,700 \& 0,050 \& 0,750 = 0,050$
R21. SI $e > 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Chauffer (C) à $0,300 \& 0,050 \& 0,750 = 0,050$
R22. SI $e < 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,000 \& 0,950 \& 0,750 = 0,000$
R23. SI $e = 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,700 \& 0,950 \& 0,750 = 0,700$
R24. SI $e > 0$ ET $\Delta e = 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,300 \& 0,950 \& 0,750 = 0,300$
R25. SI $e < 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,000 \& 0,000 \& 0,750 = 0,000$
R26. SI $e = 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Refroidir (R) à $0,700 \& 0,000 \& 0,750 = 0,000$
R27. SI $e > 0$ ET $\Delta e > 0$ ET $\Delta^2 e > 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,300 \& 0,000 \& 0,750 = 0,000$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 12.

Pour la représentation graphique de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 22.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 32.

Les degrés d'appartenance de l'erreur, de la variation d'erreur et de la variation de variation de l'erreur sont :

erreur = +30 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,700, « positif » = 0,300 (voir courbe ci-dessus)

deltaErreur = -5 : « négatif » = 0,050, « zero » = 0,950, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

deltaCarreErreur = -50 : « négatif » = 0,500, « zero » = 0,500, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1. SI $e < 0$ ET $\Delta e < 0$ ET $\Delta^2 e < 0$ ALORS Pas de cht (PC) à $0,000 \& 0,050 \& 0,500 = 0,000$

R2.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,700 \& 0,050 \& 0,500 =$	0,050
R3.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,300 \& 0,050 \& 0,500 =$	0,050
R4.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,000 \& 0,950 \& 0,500 =$	0,000
R5.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,700 \& 0,950 \& 0,500 =$	0,500
R6.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,300 \& 0,950 \& 0,500 =$	0,300
R7.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,000 \& 0,000 \& 0,500 =$	0,000
R8.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,700 \& 0,000 \& 0,500 =$	0,000
R9.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,300 \& 0,000 \& 0,500 =$	0,000
R10.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,000 \& 0,050 \& 0,500 =$	0,000
R11.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,700 \& 0,050 \& 0,500 =$	0,050
R12.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,300 \& 0,050 \& 0,500 =$	0,050
R13.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,000 \& 0,950 \& 0,500 =$	0,000
R14.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,700 \& 0,950 \& 0,500 =$	0,500
R15.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,300 \& 0,950 \& 0,500 =$	0,300
R16.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,000 \& 0,000 \& 0,500 =$	0,000
R17.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,700 \& 0,000 \& 0,500 =$	0,000
R18.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,300 \& 0,000 \& 0,500 =$	0,000
R19.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,000 \& 0,050 \& 0,000 =$	0,000
R20.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,700 \& 0,050 \& 0,000 =$	0,000
R21.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,300 \& 0,050 \& 0,000 =$	0,000
R22.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,000 \& 0,950 \& 0,000 =$	0,000
R23.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,700 \& 0,950 \& 0,000 =$	0,000
R24.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,300 \& 0,950 \& 0,000 =$	0,000
R25.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,000 \& 0,000 \& 0,000 =$	0,000
R66.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,700 \& 0,000 \& 0,000 =$	0,000
R27.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,300 \& 0,000 \& 0,000 =$	0,000

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 13.

Pour la représentation graphique de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 21.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 31.

Les degrés d'appartenance de l'erreur, de la variation d'erreur et de la variation de variation de l'erreur sont :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)
deltaErreur = +10 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,900, « positif » = 0,100 (voir courbe ci-dessus)
deltaCarreErreur = +75 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,250, « positif » = 0,750 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,150 \& 0,000 \& 0,000 =$	0,000
R2.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,850 \& 0,000 \& 0,000 =$	0,000
R3.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,000 \& 0,000 \& 0,000 =$	0,000
R4.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,150 \& 0,900 \& 0,000 =$	0,000
R5.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,850 \& 0,900 \& 0,000 =$	0,000
R6.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,000 \& 0,900 \& 0,000 =$	0,000
R7.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,150 \& 0,100 \& 0,000 =$	0,000
R8.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,850 \& 0,100 \& 0,000 =$	0,000
R9.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,000 \& 0,100 \& 0,000 =$	0,000
R10.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,150 \& 0,000 \& 0,250 =$	0,000
R11.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,850 \& 0,000 \& 0,250 =$	0,000
R12.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,000 \& 0,000 \& 0,250 =$	0,000
R13.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,150 \& 0,900 \& 0,250 =$	0,150
R14.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,850 \& 0,900 \& 0,250 =$	0,250
R15.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,000 \& 0,900 \& 0,250 =$	0,000
R16.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,150 \& 0,100 \& 0,250 =$	0,100
R17.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	$0,850 \& 0,100 \& 0,250 =$	0,100
R18.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,000 \& 0,100 \& 0,250 =$	0,000
R19.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	$0,150 \& 0,000 \& 0,750 =$	0,000
R20.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	$0,850 \& 0,000 \& 0,750 =$	0,000

R21.	SI $e > 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,000 & 0,750 =	0,000
R22.	SI $e < 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,900 & 0,750 =	0,150
R23.	SI $e = 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,900 & 0,750 =	0,750
R24.	SI $e > 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900 & 0,750 =	0,000
R25.	SI $e < 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,100 & 0,750 =	0,100
R26.	SI $e = 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,100 & 0,750 =	0,100
R27.	SI $e > 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,100 & 0,750 =	0,000

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 13.

Pour la représentation graphique de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 21.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 32.

Les degrés d'appartenance de l'erreur, de la variation d'erreur et de la variation de variation de l'erreur sont :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)
deltaErreur = +10 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,900, « positif » = 0,100 (voir courbe ci-dessus)
deltaCarreErreur = -50 : « négatif » = 0,500, « zero » = 0,500, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1.	SI $e < 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R2.	SI $e = 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R3.	SI $e > 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R4.	SI $e < 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,150 & 0,900 & 0,500 =	0,150
R5.	SI $e = 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,900 & 0,500 =	0,500
R6.	SI $e > 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,900 & 0,500 =	0,000
R7.	SI $e < 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,100 & 0,500 =	0,100
R8.	SI $e = 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,100 & 0,500 =	0,100
R9.	SI $e > 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,100 & 0,500 =	0,000
R10.	SI $e < 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R11.	SI $e = 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R12.	SI $e > 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R13.	SI $e < 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,900 & 0,500 =	0,150
R14.	SI $e = 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,850 & 0,900 & 0,500 =	0,500
R15.	SI $e > 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,900 & 0,500 =	0,000
R16.	SI $e < 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,100 & 0,500 =	0,100
R17.	SI $e = 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,100 & 0,500 =	0,100
R18.	SI $e > 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,100 & 0,500 =	0,000
R19.	SI $e < 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R20.	SI $e = 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R21.	SI $e > 0$	ET $\Delta e < 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R22.	SI $e < 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,900 & 0,000 =	0,000
R23.	SI $e = 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,900 & 0,000 =	0,000
R24.	SI $e > 0$	ET $\Delta e = 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,900 & 0,000 =	0,000
R25.	SI $e < 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,100 & 0,000 =	0,000
R26.	SI $e = 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,100 & 0,000 =	0,000
R27.	SI $e > 0$	ET $\Delta e > 0$	ET $\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,100 & 0,000 =	0,000

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 13.

Pour la représentation graphique de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 22.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 31.

Les degrés d'appartenance de l'erreur, de la variation d'erreur et de la variation de variation de l'erreur sont :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)
deltaErreur = -5 : « négatif » = 0,050, « zero » = 0,950, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)
deltaCarreErreur = +75 : « négatif » = 0,000, « zero » = 0,250, « positif » = 0,750 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,050 & 0,000 =	0,000
R2.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,050 & 0,000 =	0,000
R3.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,050 & 0,000 =	0,000
R4.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,150 & 0,950 & 0,000 =	0,000
R5.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,950 & 0,000 =	0,000
R6.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,950 & 0,000 =	0,000
R7.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R8.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R9.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R10.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,050 & 0,250 =	0,050
R11.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,050 & 0,250 =	0,050
R12.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,050 & 0,250 =	0,000
R13.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,950 & 0,250 =	0,150
R14.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,850 & 0,950 & 0,250 =	0,250
R15.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,950 & 0,250 =	0,000
R16.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,000 & 0,250 =	0,000
R17.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,000 & 0,250 =	0,000
R18.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,250 =	0,000
R19.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,050 & 0,750 =	0,050
R20.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,050 & 0,750 =	0,050
R21.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,050 & 0,750 =	0,000
R22.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,950 & 0,750 =	0,150
R23.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,950 & 0,750 =	0,750
R24.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,950 & 0,750 =	0,000
R25.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,000 & 0,750 =	0,000
R26.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,000 & 0,750 =	0,000
R27.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e > 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,750 =	0,000

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

Pour la représentation graphique de l'erreur : voir courbe Fig 13.

Pour la représentation graphique de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 22.

Pour la représentation graphique de la variation de la variation de l'erreur : voir courbe Fig 32.

Les degrés d'appartenance de l'erreur, de la variation d'erreur et de la variation de variation de l'erreur sont :

erreur = -15 : « négatif » = 0,150, « zero » = 0,850, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

deltaErreur = -5 : « négatif » = 0,050, « zero » = 0,950, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

deltaCarreErreur = -50 : « négatif » = 0,500, « zero » = 0,500, « positif » = 0,000 (voir courbe ci-dessus)

On applique ces entrées aux différentes règles, à savoir :

R1.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,050 & 0,500 =	0,050
R2.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,050 & 0,500 =	0,050
R3.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,050 & 0,500 =	0,000
R4.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,150 & 0,950 & 0,500 =	0,150
R5.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,950 & 0,500 =	0,500
R6.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,950 & 0,500 =	0,000
R7.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R8.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R9.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e < 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R10.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,050 & 0,500 =	0,050
R11.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,050 & 0,500 =	0,050
R12.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e < 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,050 & 0,500 =	0,000
R13.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,950 & 0,500 =	0,150
R14.	SI	$e = 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,850 & 0,950 & 0,500 =	0,500
R15.	SI	$e > 0$	ET	$\Delta e = 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,950 & 0,500 =	0,000
R16.	SI	$e < 0$	ET	$\Delta e > 0$	ET	$\Delta^2 e = 0$	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,000 & 0,500 =	0,000

R17.	SI	e = 0	ET	Δe > 0	ET	Δ ² e = 0	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R18.	SI	e > 0	ET	Δe > 0	ET	Δ ² e = 0	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,500 =	0,000
R19.	SI	e < 0	ET	Δe < 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,150 & 0,050 & 0,000 =	0,000
R20.	SI	e = 0	ET	Δe < 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Chauffer (C)	à	0,850 & 0,050 & 0,000 =	0,000
R21.	SI	e > 0	ET	Δe < 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Chauffer (C)	à	0,000 & 0,050 & 0,000 =	0,000
R22.	SI	e < 0	ET	Δe = 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,950 & 0,000 =	0,000
R23.	SI	e = 0	ET	Δe = 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,950 & 0,000 =	0,000
R24.	SI	e > 0	ET	Δe = 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Refroidir (R)	à	0,000 & 0,950 & 0,000 =	0,000
R25.	SI	e < 0	ET	Δe > 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Refroidir (R)	à	0,150 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R26.	SI	e = 0	ET	Δe > 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Refroidir (R)	à	0,850 & 0,000 & 0,000 =	0,000
R27.	SI	e > 0	ET	Δe > 0	ET	Δ ² e > 0	ALORS	Pas de cht (PC)	à	0,000 & 0,000 & 0,000 =	0,000

6.3. Degré d'appartenance de la sortie.

Nous vous faisons grace des différentes courbes résultantes, il y a assez d'exemple dans les chapitres précédents.

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

$$\text{« appNegatif »} = \sqrt[2]{R7^2 + R8^2 + R13^2 + R16^2 + R17^2 + R22^2 + R23^2 + R24^2 + R25^2 + R26^2}$$

$$\text{« appNegatif »} = 0,775$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R1^2 + R9^2 + R10^2 + R14^2 + R18^2 + R19^2 + R27^2}$$

$$\text{« appZero »} = 0,287$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R2^2 + R3^2 + R4^2 + R5^2 + R6^2 + R11^2 + R12^2 + R15^2 + R20^2 + R21^2}$$

$$\text{« appPositif »} = 0,250$$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

$$\text{« appNegatif »} = \sqrt[2]{R7^2 + R8^2 + R13^2 + R16^2 + R17^2 + R22^2 + R23^2 + R24^2 + R25^2 + R26^2}$$

$$\text{« appNegatif »} = 0,141$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R1^2 + R9^2 + R10^2 + R14^2 + R18^2 + R19^2 + R27^2}$$

$$\text{« appZero »} = 0,520$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R2^2 + R3^2 + R4^2 + R5^2 + R6^2 + R11^2 + R12^2 + R15^2 + R20^2 + R21^2}$$

$$\text{« appPositif »} = 0,656$$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

$$\text{« appNegatif »} = \sqrt[2]{R7^2 + R8^2 + R13^2 + R16^2 + R17^2 + R22^2 + R23^2 + R24^2 + R25^2 + R26^2}$$

$$\text{« appNegatif »} = 0,762$$

$$\text{« appZero »} = \sqrt[2]{R1^2 + R9^2 + R10^2 + R14^2 + R18^2 + R19^2 + R27^2}$$

$$\text{« appZero »} = 0,250$$

$$\text{« appPositif »} = \sqrt[2]{R2^2 + R3^2 + R4^2 + R5^2 + R6^2 + R11^2 + R12^2 + R15^2 + R20^2 + R21^2}$$

$$\llcorner \text{appPositif} \llcorner = 0,269$$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

$$\llcorner \text{appNegatif} \llcorner = \sqrt[2]{R 7^2 + R 8^2 + R 13^2 + R 16^2 + R 17^2 + R 22^2 + R 23^2 + R 24^2 + R 25^2 + R 26^2}$$

$$\llcorner \text{appNegatif} \llcorner = 0,000$$

$$\llcorner \text{appZero} \llcorner = \sqrt[2]{R 1^2 + R 9^2 + R 10^2 + R 14^2 + R 18^2 + R 19^2 + R 27^2}$$

$$\llcorner \text{appZero} \llcorner = 0,500$$

$$\llcorner \text{appPositif} \llcorner = \sqrt[2]{R 2^2 + R 3^2 + R 4^2 + R 5^2 + R 6^2 + R 11^2 + R 12^2 + R 15^2 + R 20^2 + R 21^2}$$

$$\llcorner \text{appPositif} \llcorner = 0,663$$

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

$$\llcorner \text{appNegatif} \llcorner = \sqrt[2]{R 7^2 + R 8^2 + R 13^2 + R 16^2 + R 17^2 + R 22^2 + R 23^2 + R 24^2 + R 25^2 + R 26^2}$$

$$\llcorner \text{appNegatif} \llcorner = 0,805$$

$$\llcorner \text{appZero} \llcorner = \sqrt[2]{R 1^2 + R 9^2 + R 10^2 + R 14^2 + R 18^2 + R 19^2 + R 27^2}$$

$$\llcorner \text{appZero} \llcorner = 0,250$$

$$\llcorner \text{appPositif} \llcorner = \sqrt[2]{R 2^2 + R 3^2 + R 4^2 + R 5^2 + R 6^2 + R 11^2 + R 12^2 + R 15^2 + R 20^2 + R 21^2}$$

$$\llcorner \text{appPositif} \llcorner = 0,000$$

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

$$\llcorner \text{appNegatif} \llcorner = \sqrt[2]{R 7^2 + R 8^2 + R 13^2 + R 16^2 + R 17^2 + R 22^2 + R 23^2 + R 24^2 + R 25^2 + R 26^2}$$

$$\llcorner \text{appNegatif} \llcorner = 0,250$$

$$\llcorner \text{appZero} \llcorner = \sqrt[2]{R 1^2 + R 9^2 + R 10^2 + R 14^2 + R 18^2 + R 19^2 + R 27^2}$$

$$\llcorner \text{appZero} \llcorner = 0,500$$

$$\llcorner \text{appPositif} \llcorner = \sqrt[2]{R 2^2 + R 3^2 + R 4^2 + R 5^2 + R 6^2 + R 11^2 + R 12^2 + R 15^2 + R 20^2 + R 21^2}$$

$$\llcorner \text{appPositif} \llcorner = 0,522$$

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

$$\llcorner \text{appNegatif} \llcorner = \sqrt[2]{R 7^2 + R 8^2 + R 13^2 + R 16^2 + R 17^2 + R 22^2 + R 23^2 + R 24^2 + R 25^2 + R 26^2}$$

$$\llcorner \text{appNegatif} \llcorner = 0,779$$

$$\llcorner \text{appZero} \llcorner = \sqrt[2]{R 1^2 + R 9^2 + R 10^2 + R 14^2 + R 18^2 + R 19^2 + R 27^2}$$

$$\llcorner \text{appZero} \llcorner = 0,260$$

$$\llcorner \text{appPositif} \llcorner = \sqrt[2]{R 2^2 + R 3^2 + R 4^2 + R 5^2 + R 6^2 + R 11^2 + R 12^2 + R 15^2 + R 20^2 + R 21^2}$$

$$\ll \text{appPositif} \gg = 0,071$$

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

$$\ll \text{appNegatif} \gg = \sqrt[2]{R7^2 + R8^2 + R13^2 + R16^2 + R17^2 + R22^2 + R23^2 + R24^2 + R25^2 + R26^2}$$

$$\ll \text{appNegatif} \gg = 0,150$$

$$\ll \text{appZero} \gg = \sqrt[2]{R1^2 + R9^2 + R10^2 + R14^2 + R18^2 + R19^2 + R27^2}$$

$$\ll \text{appZero} \gg = 0,505$$

$$\ll \text{appPositif} \gg = \sqrt[2]{R2^2 + R3^2 + R4^2 + R5^2 + R6^2 + R11^2 + R12^2 + R15^2 + R20^2 + R21^2}$$

$$\ll \text{appPositif} \gg = 0,527$$

6.4. Défuzzification.

Nous vous faisons grace des différentes courbes résultantes, il y a assez d'exemple dans les chapitres précédents.

$$\text{sortie} = \frac{\text{centreNeg} * \text{appNegatif} + \text{centreZer} * \text{appZero} + \text{centrePos} * \text{appPos}}{\text{appNegatif} + \text{appZero} + \text{appPositif}}$$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

$$\text{sortie} = \frac{-66,667 * 0,775 + 0 * 0,287 + 66,667 * 0,250}{0,775 + 0,287 + 0,250} = -26,7 \% \text{ signe - pour refroidir}$$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

$$\text{sortie} = \frac{-66,667 * 0,141 + 0 * 0,520 + 66,667 * 0,656}{0,141 + 0,520 + 0,656} = +26,1 \% \text{ signe + pour chauffer}$$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

$$\text{sortie} = \frac{-66,667 * 0,762 + 0 * 0,250 + 66,667 * 0,269}{0,762 + 0,250 + 0,269} = -25,7 \% \text{ signe - pour refroidir}$$

Pour une erreur de +30 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

$$\text{sortie} = \frac{-66,667 * 0,000 + 0 * 0,500 + 66,667 * 0,663}{0,000 + 0,500 + 0,663} = +24,2 \% \text{ signe + pour chauffer}$$

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

$$\text{sortie} = \frac{-66,667 * 0,805 + 0 * 0,250 + 66,667 * 0,000}{0,805 + 0,250 + 0,000} = -50,9 \% \text{ signe - pour refroidir}$$

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de +10 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

$$\text{sortie} = \frac{-66,667 * 0,250 + 0 * 0,500 + 66,667 * 0,522}{0,250 + 0,500 + 0,522} = +14,3 \% \text{ signe + pour chauffer}$$

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de +75 %.

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,779 + 0 * 0,260 + 66,667 * 0,071}{0,779 + 0,260 + 0,071} = -42,5 \% \text{ signe - pour refroidir}$$

Pour une erreur de -15 %, un deltaErreur de -5 % et un deltaCarreErreur de -50 %.

$$sortie = \frac{-66,667 * 0,150 + 0 * 0,505 + 66,667 * 0,527}{0,150 + 0,505 + 0,527} = +21,3 \% \text{ signe + pour chauffer}$$

6.5. Variation des commandes.

Les graphiques ci-dessous représentent la variation de la sortie en fonction des entrées erreur, deltaErreur et deltaCarreErreur. Les figures 43a et 43b représentent la variation en fonction de l'erreur et deltaErreur pour deltaCarreErreur = -50 % et les figures 44a et 44b pour deltaCarreErreur = +50 %.

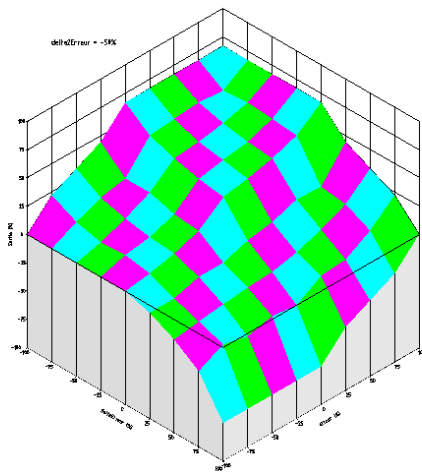


Fig 43a : Sortie ($S_{min} \leq sortie \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PID pour deltaCarreErreur = -50 %

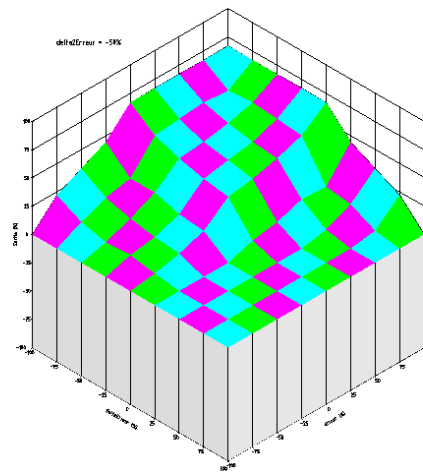


Fig 43b : Sortie ($0 \leq sortie \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PID pour deltaCarreErreur = -50 %

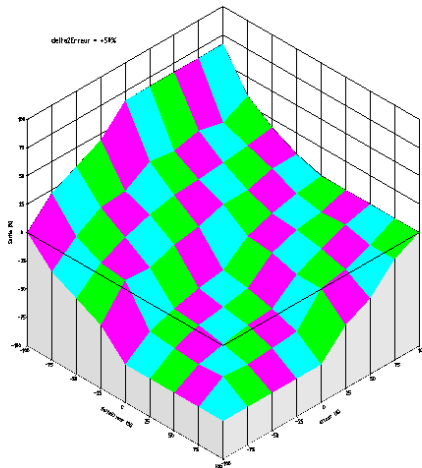


Fig 44a : Sortie ($S_{min} \leq sortie \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PID pour deltaCarreErreur = +50 %

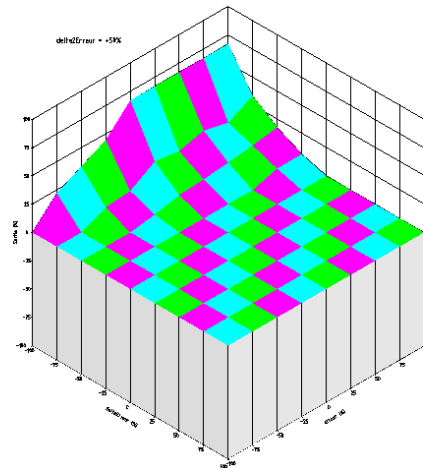


Fig 44b : Sortie ($0 \leq sortie \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PID pour deltaCarreErreur = +50 %

7. Détermination des paramètres.

La détermination des paramètres E0MIN, E0MAX, E1MIN, E1MAX, E2MIN et E2MAX est une affaire d'expert, de tâtonnements successifs ou d'expérience. L'expression de ces paramètres en pourcentage permet de s'affranchir des valeurs réelles mais uniquement pendant la période d'étude. A un moment ou un autre, il faudra bien les rattacher à la réalité physique. Encore une affaire d'expert.

Pour notre fil rouge, on prendra les valeurs suivantes :

$-100^{\circ}\text{C} \leq e \leq +100^{\circ}\text{C}$	pour	$-100\% \leq e \leq +100\%$
$-0,1^{\circ}\text{C/s} \leq \Delta e \leq +0,1^{\circ}\text{C/s}$	pour	$-100\% \leq \Delta e \leq +100\%$
$-0,025^{\circ}\text{C/s} \leq \Delta^2 e \leq +0,025^{\circ}\text{C/s}$	pour	$-100\% \leq \Delta^2 e \leq +100\%$

E0MIN = -100 %
E0MAX = +100 %
E1MIN = -100 %
E1MAX = +100 %
E2MIN = -100 %
E2MAX = +100 %

Choix arbitraire
la logique floue est indulgente avec les débutants :)

avec : e = erreur = consigne – mesure ($^{\circ}\text{C}$)
 Δe = variation de l'erreur ($^{\circ}\text{C/s}$)
 $\Delta^2 e$ = variation de la variation de l'erreur ($^{\circ}\text{C/s}$)

Je vous rassure, nous ne sommes pas devenu des experts pour les valeurs physiques des entrées, elles proviennent de la simple observation de la courbe ci-dessous.

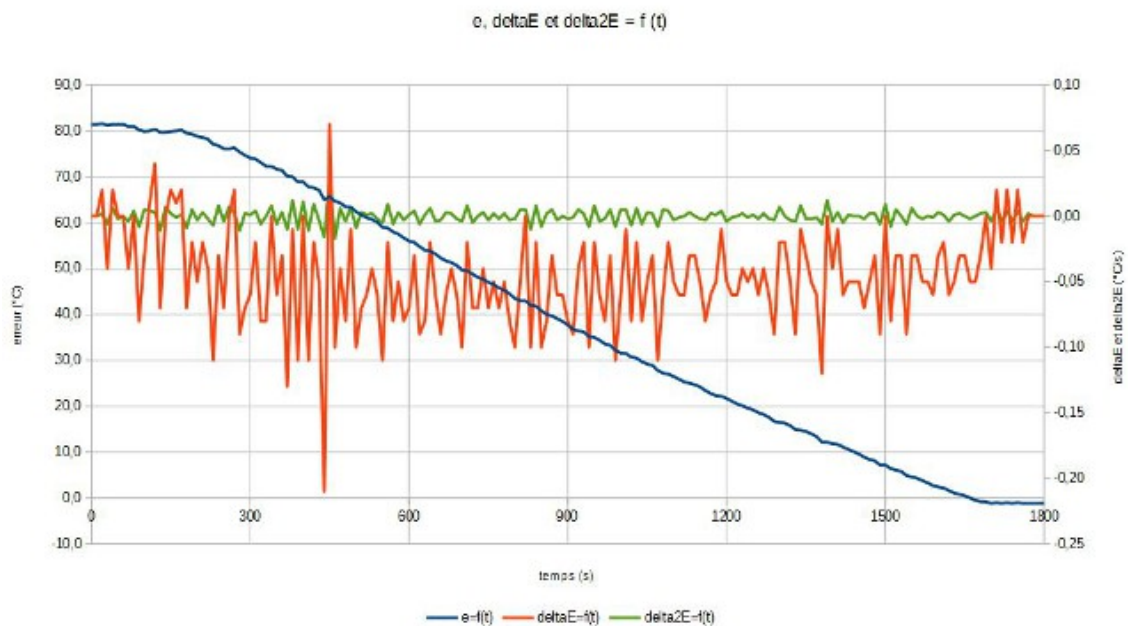


Fig 45 : $e, \Delta e$ et $\Delta^2 e$ en fonction du temps

La figure ci-dessus représente la transcription de la courbe de chauffe en boucle ouverte.

8. Adaptation des entrées et des sorties.

L'ensemble de l'approche logique floue et Arduino a été faite avec des entrées comprises entre -100 et +100 %, idem pour la sortie (-100 à +100%). Ces plages relatives permettent d'accepter n'importe quelles entrées ou sorties physiques.

8.1. Entrées.

Il y a lieu d'adapter les entrées réelles à la plage -100 % à +100 %. L'entrée réelle peut être exprimée en °C, ou tout autre unité de mesure correspondant au cas traité (Attention : compte tenu des simplifications fixées en hypothèse de départ les valeurs doivent être symétriques $\text{entréeMin} = \text{entréeMax}$ en valeur absolue).

Par exemple pour notre fil conducteur, nous avons fixé erreur (consigne – mesure) entre -255 et +255. L'erreur étant exprimée en point de conversion du convertisseur analogique digital.

Avec : Si erreur < -255 ALORS erreur = -255

Si erreur > 255 ALORS erreur = 255

$$\text{entréePhysique} * 100 / 255 \leq \text{erreur} \leq \text{entréePhysique} * 100 / 255$$

8.2. Sorties.

La sortie après défuzzification est comprise entre Ssortie et – Ssortie. La valeur maximale de Ssortie va être fonction de la méthode de défuzzification, effet dans le cas de la méthode de la « racine carrée de la somme des carrés » Ssortie maximale va être de 66,7 %. Cette limitation est la même pour toutes les méthodes qui s'appuient sur les centres de gravité.

Par contre la méthode de la « moyenne des valeurs maximales » et la méthode de la « racine carrée de la somme des carrés », un peu mal mené (voir remarque paragraphe 3.1), Ssortie maximale peut atteindre 100 %.

Si l'on souhaite exploiter pleinement les sorties PWM de la carte Arduino, il nous faut transposer la sortie relative en sortie PWM, à savoir, appliquer des coefficients multiplicateurs.

$$\text{Commande} = \text{sortie} * k1 * k2$$

avec : k1 = coefficient pour convertir éventuellement la sortie dans la plage -100 à + 100 % (par exemple, k1 = 1,5)

k2 = coefficient de transposition dans la plage PWM (par exemple, k2 = 255/100)

8.2.1. Chauffage uniquement.

Pour notre fil conducteur, nous avons uniquement prévu de chauffer ou pas chauffer. Dans ce cas la commande utilisera que les sorties positives.

Si sortie < 0 ALORS commande = 0

Si sortie ≥ 0 ALORS commande = sortie * k1 * k2

8.2.2 Chauffage et refroidissement (2 voies).

Par exemple le refroidissement est assuré par un ventilateur à vitesse variable. Dans ce cas, il nous faudra 2 sorties en mode PWM (1 pour le chauffage (voie1) et une pour le refroidissement(voie2)).

Si sortie ≥ 0 ALORS pour voie1 : commande1 = sortie * k1 * k2

pour voie2 : commande2 = 0

Si sortie < 0 ALORS pour voie1 : commande1 = 0

pour voie2 : commande2 = -sortie * k1 * k2

8.2.3 Autres variantes.

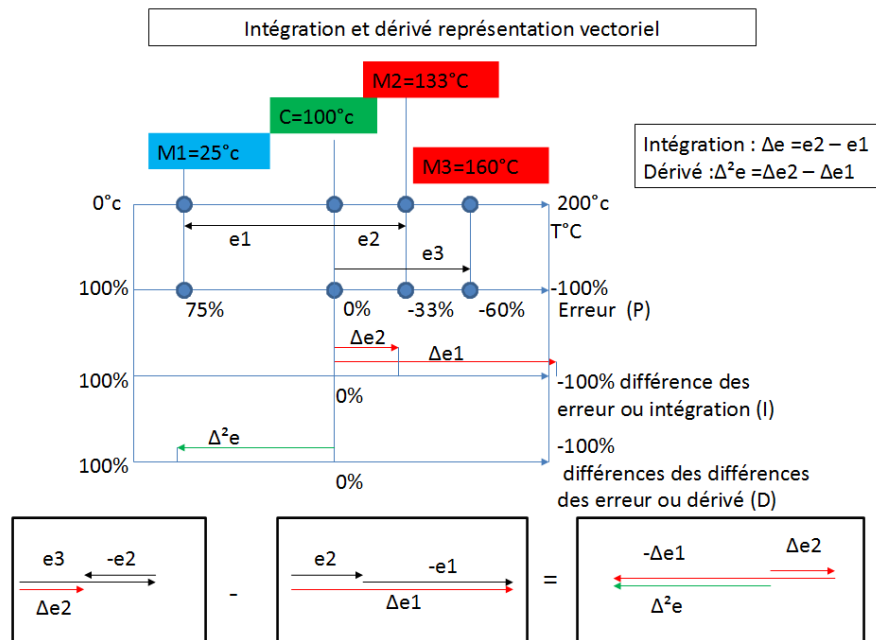
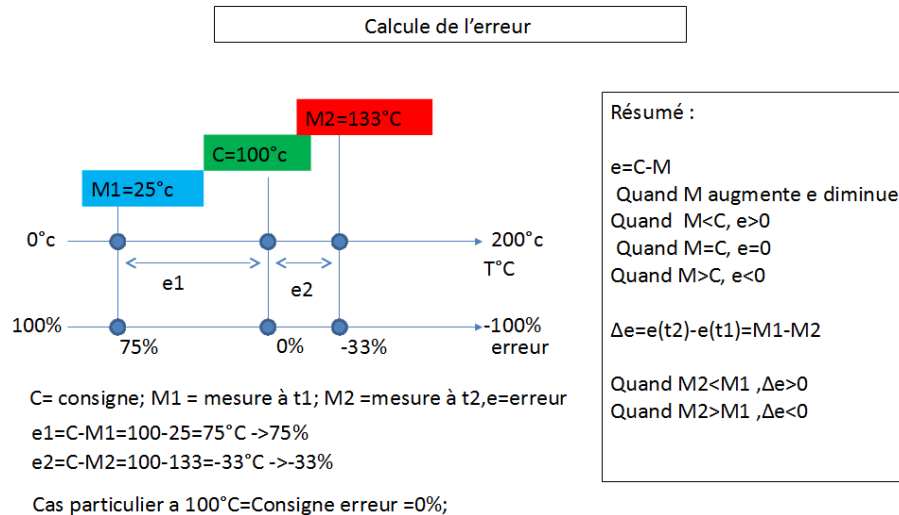
On peut également convertir sortie en une tension par l'intermédiaire d'un convertisseur digital analogique

(DAC). A partir de cette tension continue, on peut imaginer d'autres interfaces plus ou moins standardisées avec l'interface matériel qui va bien (0-10V, 0-20 mA, 4-20 mA, etc.).

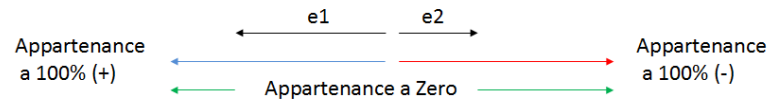
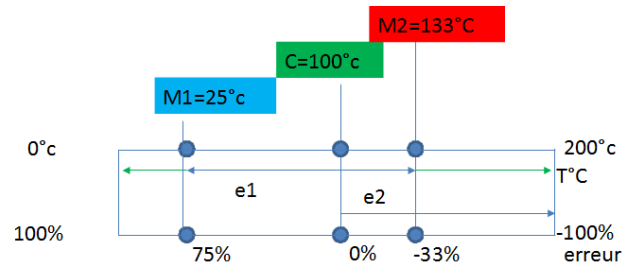
9. Contributions externes.

Un chapitre pour ceux qui ont apporté des remarques, suggestions et autres propositions.

Merci à Christophe alias Heloderma-kris (membre du forum Arduino) pour sa représentation des variables et leurs interprétations.



Fuzzification et degré d'appartenance, représentation vectoriel



10. Plate-forme d'essais.

10.1. Principe.

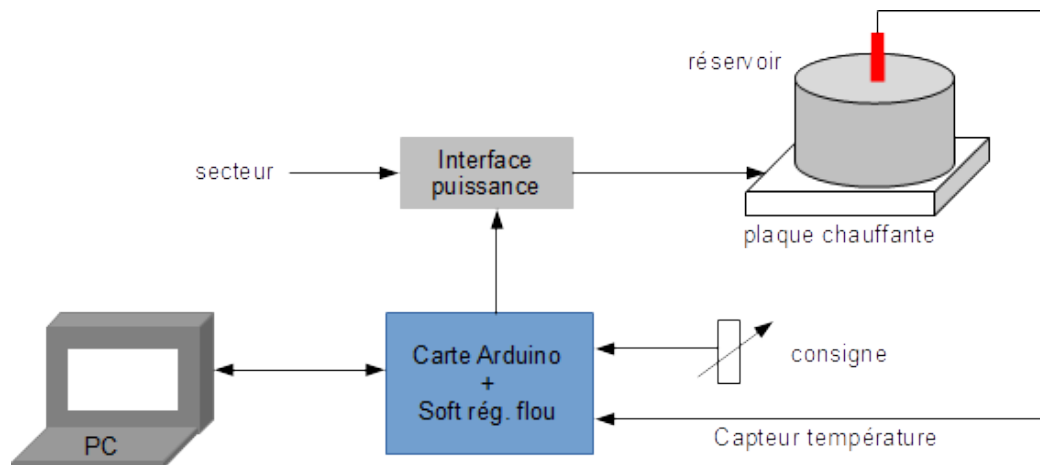


Fig 46 : Principe de l'expérience

10.2. Schéma électrique.

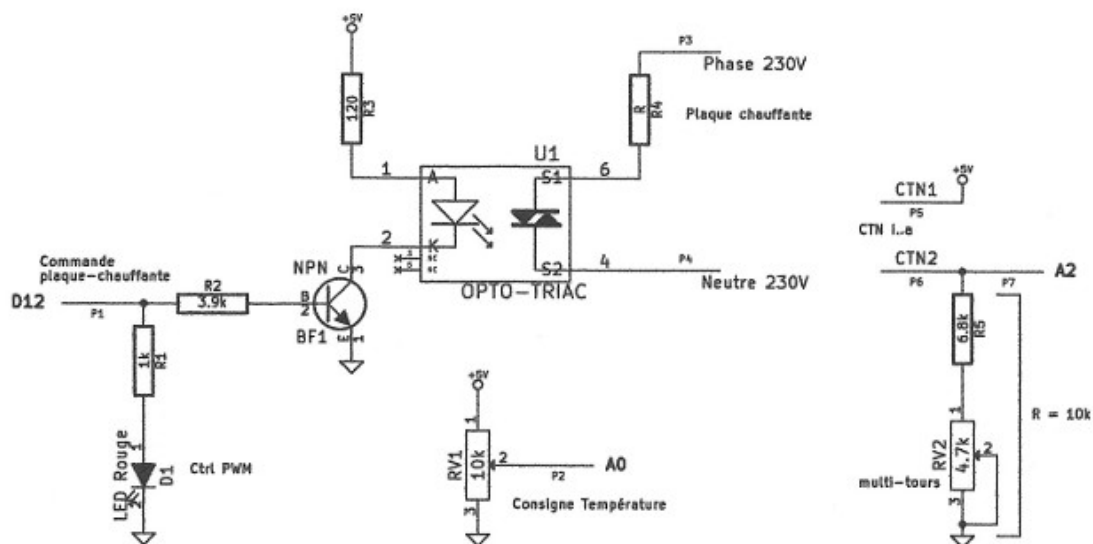


Fig 47 : Schéma électrique de la plate-forme d'essai.

La carte Arduino n'est pas représentée sur le schéma ci-dessus mais cela reste du classique.

10.3. Capteur de température CTN.

Les mesures de température sont réalisées à l'aide d'une CTN. Il nous fallait une sonde sous tube inox de qualité alimentaire. Le prix de ce type de composant est relativement chère pour notre application. Une solution de rechange c'est présentée sous la forme d'un thermomètre/chronomètre d'une grande surface de meubles suédois. Il suffisait de garder que la sonde de température et de définir sa caractéristique par quelques mesures.

Le résultat des mesures est représenté sous forme de courbes en figure 47b, avec en plus une régression linéaire pour une éventuelle conversion de la mesure du convertisseur analogique digital en température.

La CTN fait 50 kΩ à 25°C.

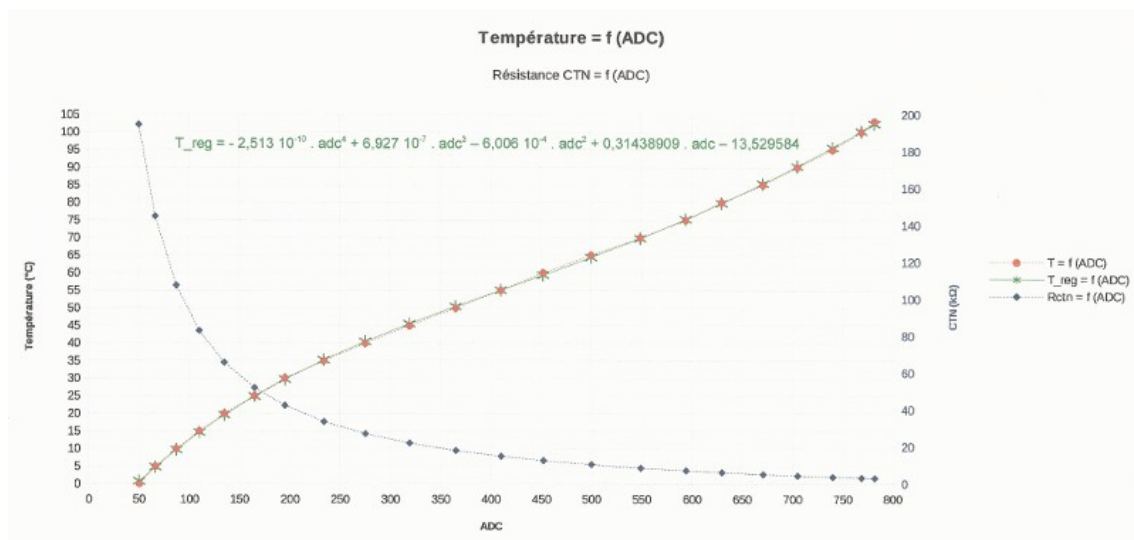


Fig 47b : Caractéristique CTN

11. Programme.

11.1. Organigramme.

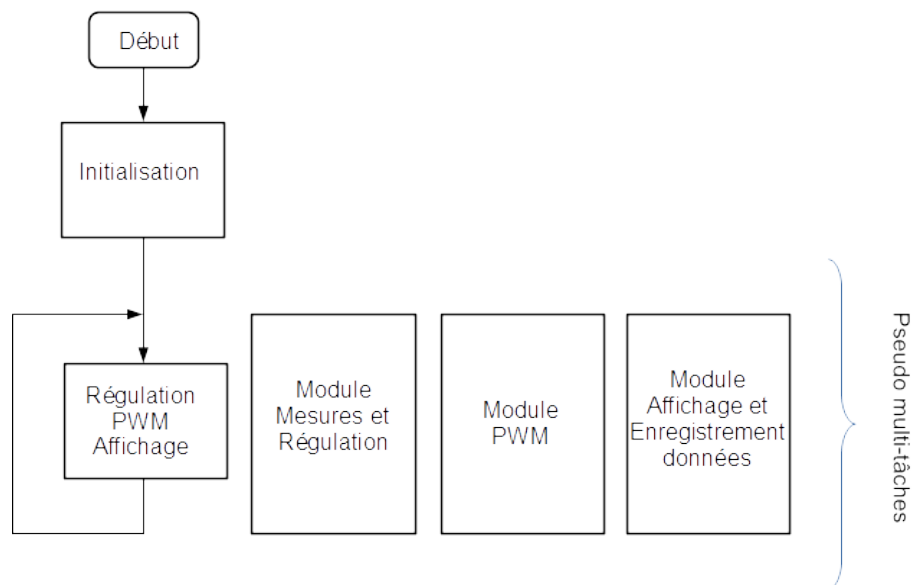


Fig 48 : Organigramme programme.

11.1.1. Module Initialisation.

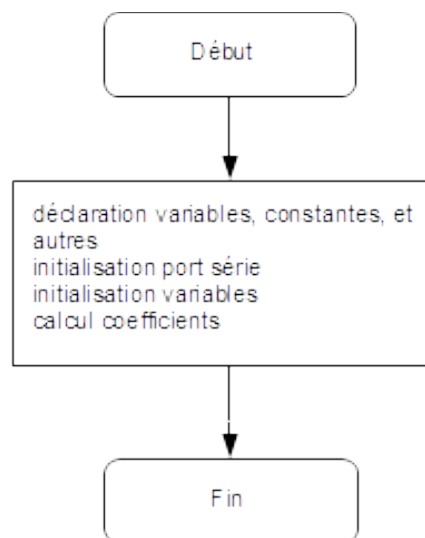


Fig 49 : Organigramme module Initialisation

11.1.2. Module PWM.

La commande de la puissance se fait par l'intermédiaire d'un triac opto-couplé avec détection de passage par zéro du courant. La puissance minimale fournie à la plaque va correspondre à l'envoi d'une sinusoïde (durée 20 ms) toutes les 5,1 s ($255 * 20 \text{ ms} = 5100 \text{ ms}$). Avec cet artifice, nous disposons d'une commande variant de 0 à 255 ($0 \leq \text{duty} \leq 255$).

$$P = \text{Puissance plaque de chauffe} * \text{duty} / 255$$

Pour notre plate-forme d'essai la puissance de chauffe est comprise entre 0 et 1500 W avec des pas de 5,9 W.

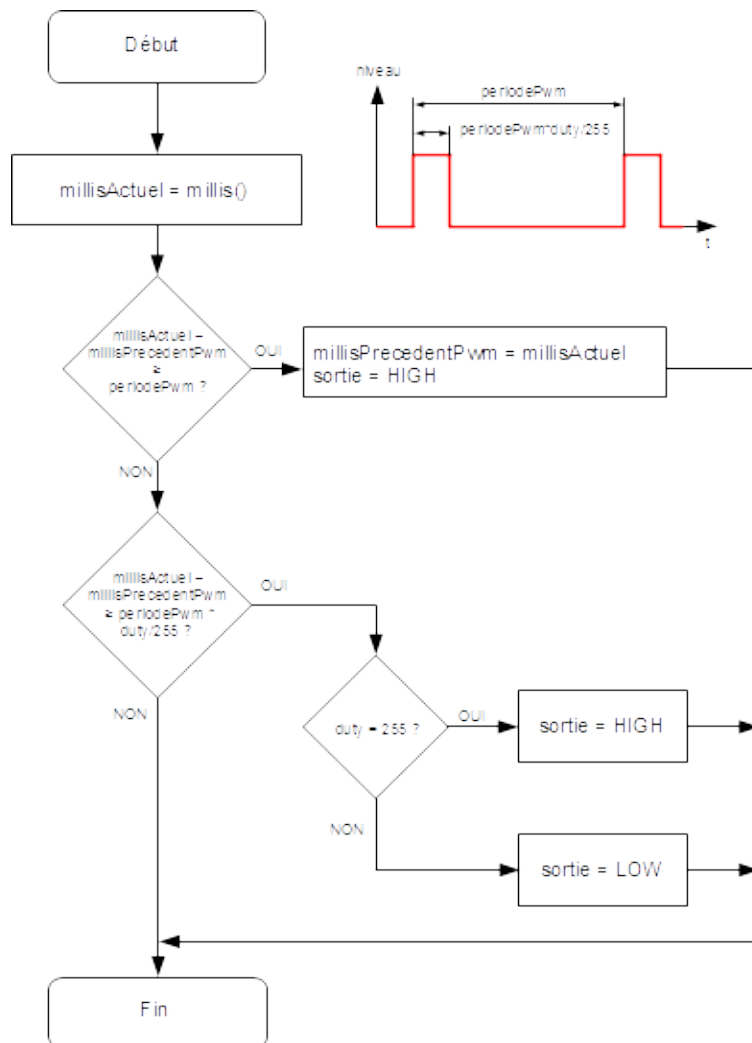


Fig 50 : Organigramme module PWM

11.1.3. Module Mesures et Régulation.

La période de la boucle de régulation sera du même ordre de grandeur que celle du module PWM.

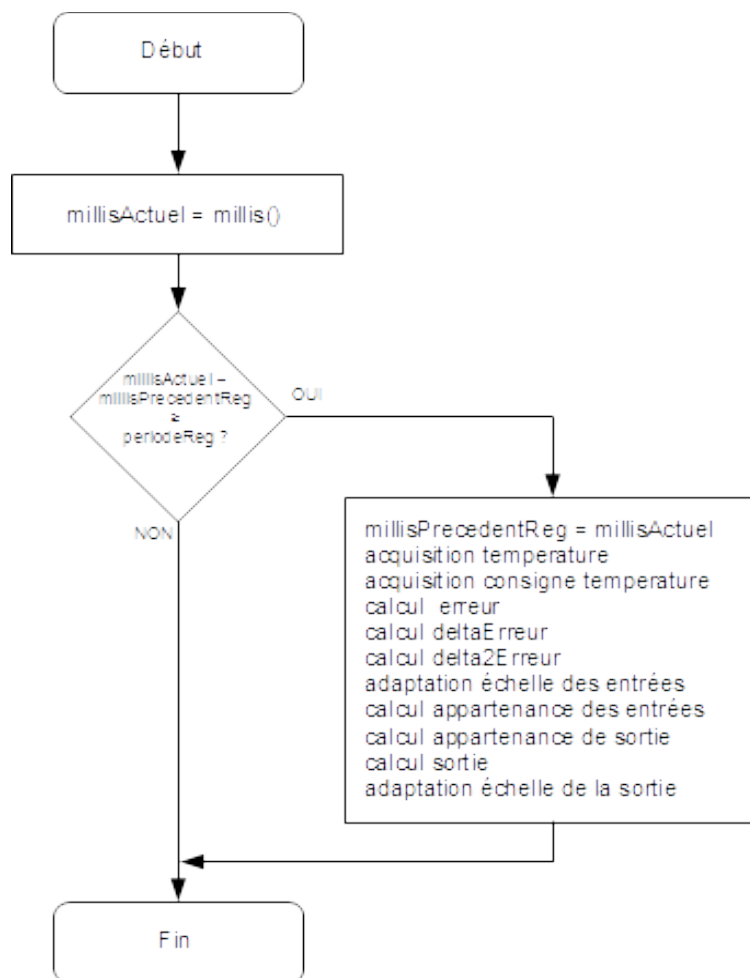


Fig 51 : Organigramme module Mesure et régulation

11.1.4. Module Affichage et enregistrement données.

Ce module permet d'envoyer via le port série les différentes mesures de l'expérience. Comme l'inertie thermique du dispositif de chauffe est importante, la période d'envoi sera importante par rapport aux périodes de la boucle de régulation et du PWM.

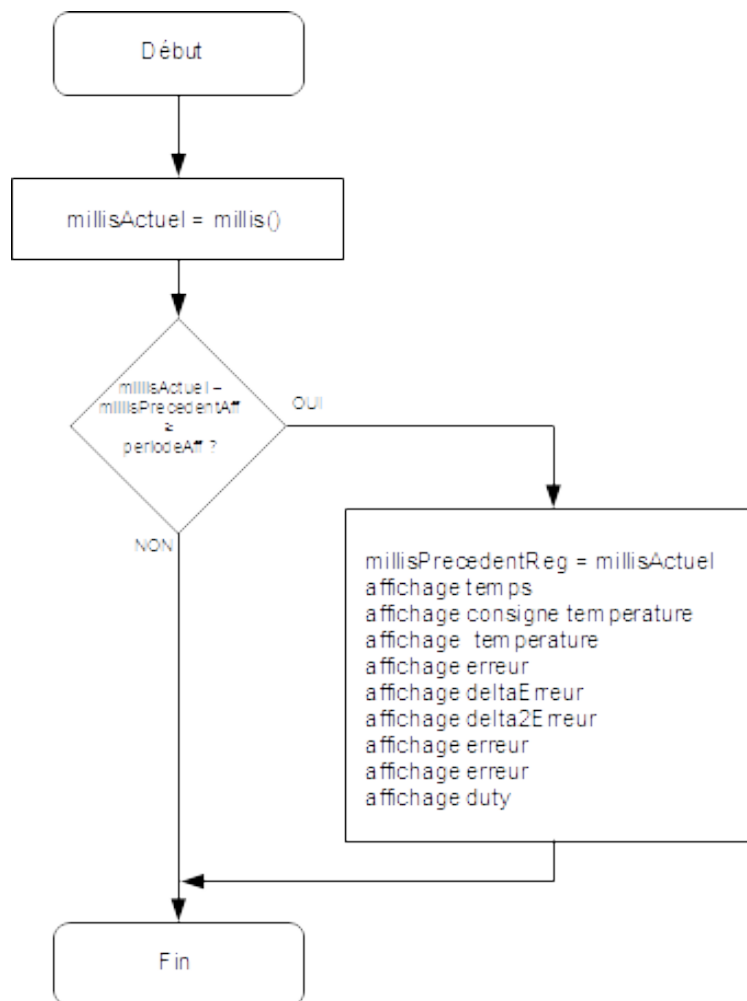


Fig 52 : Organigramme module Affichage

12. Résultats des mesures.

12.1. Régulateur type P.

TODO

12.2. Régulateur type PI.

TODO

12.3. Régulateur type PD.

TODO

12.4. Régulateur type PID.

TODO

13. Exemple pratique pour l'appertisation.

13.1. Historique.

Le pauvre Nicolas Appert (http://fr.wikipedia.org/wiki/Nicolas_Appert)

13.2. Principe.

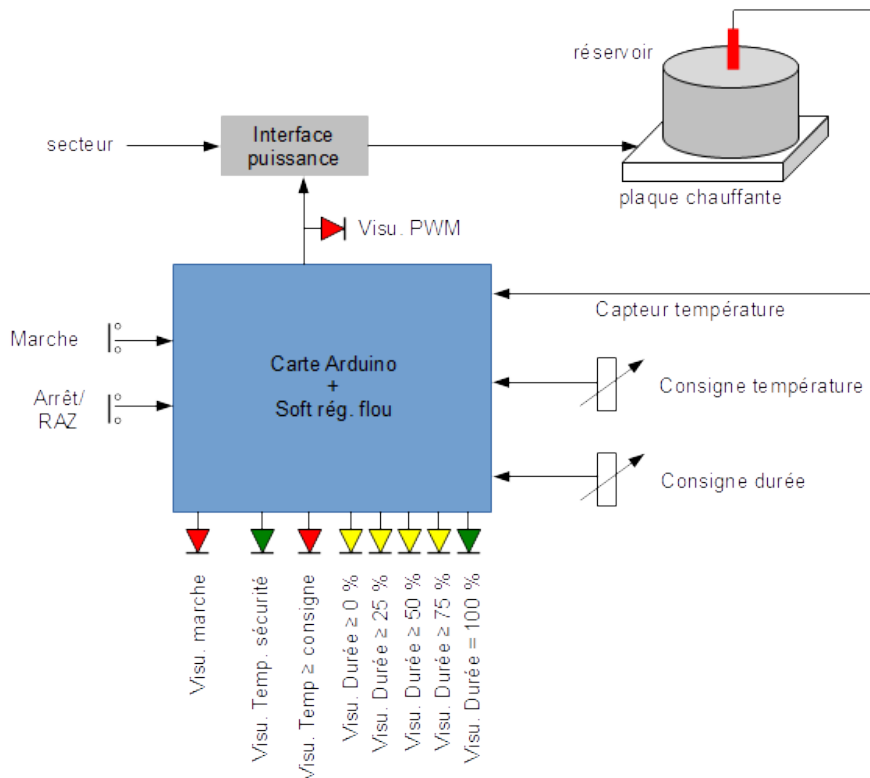


Fig x : Principe de « l'appertiseur ».

Cet applicatif dispose d'une interface homme/machine (IHM) dès plus simple mais tout à fait efficace. Les deux potentiomètres permettent de régler la consigne de température ($50^{\circ}\text{C} \leq \text{température} \leq 100^{\circ}\text{C}$) et la consigne de durée du traitement thermique ($20 \text{ min} \leq \text{durée} \leq 150 \text{ min}$). Le bouton poussoir « Marche » est destiné à démarrer le processus de traitement thermique, tandis que le bouton « Arrêt » permet, d'une part, d'arrêter le processus et, d'autre part, la remise à zéro du dispositif.

Quelques « LED » complètent l'appertiseur, à savoir :

- Visu. Marche (attente, en marche ou arrêt)
- Visu. Temp. Sécurité (température $< 50^{\circ}\text{C}$)
- Visu. Temp. $\geq$ consigne température
- les 5 voyants indiquent la durée du traitement (durée est incrémentée que si température $\geq$ consigne température).

13.3. Schéma.

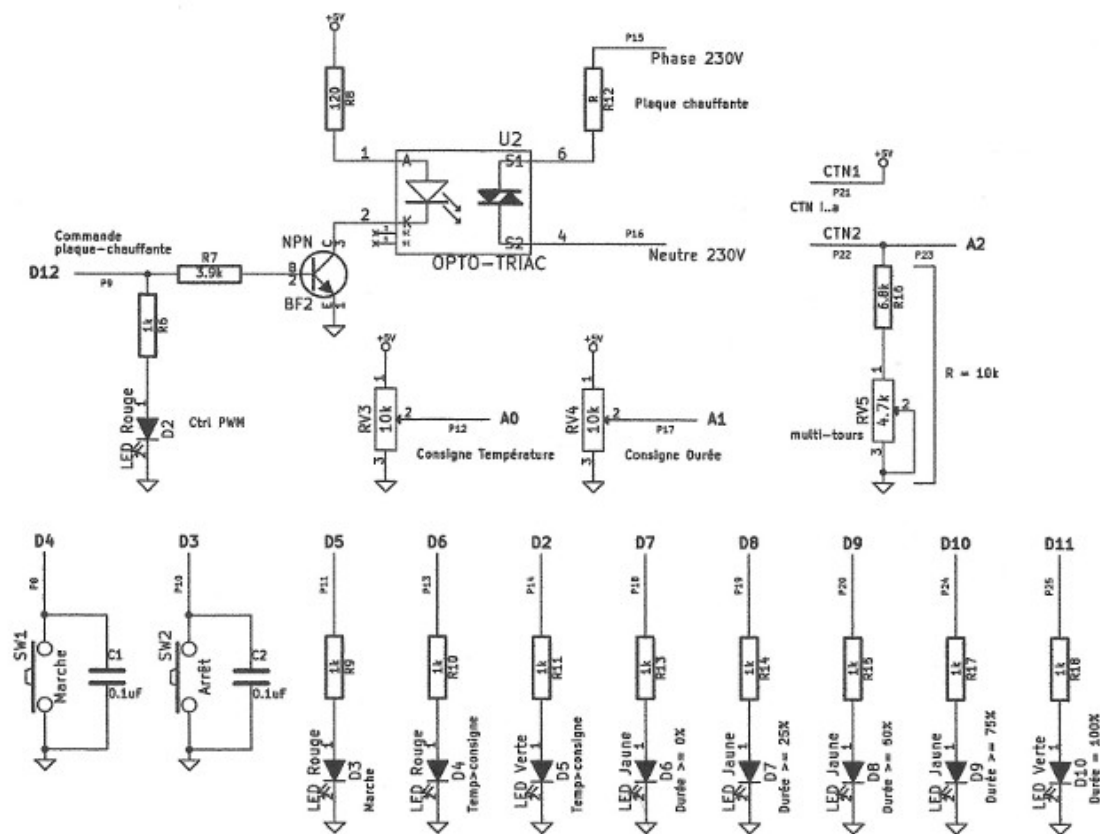


Fig x : Schéma électrique de «l'appertiseur»

La carte Arduino n'est pas représentée sur le schéma ci-dessus mais cela reste du classique.

13.4. Résultats.

TODO

14. Autres Asservissements.

Dans le monde Arduino, on peut imaginer énormément d'applications, à savoir :

- les asservissements de vitesse,
- les asservissements de positionnement,
- les systèmes de poursuite ;
- etc.

TODO : à compléter

15. Suite...

Lors de la réalisation de la présente étude et des essais, on peut envisager d'autres simplifications pour soulager les micro-contrôleurs des cartes Arduino.

Faire des essais avec d'autres méthodes de défuzzification.

TODO : à compléter

16. Conclusion provisoire.

Finalement la logique floue n'est pas si compliquée si on fait abstraction du côté ~~obscur~~ de la force expertise du pilotage du dispositif. La mise en œuvre se résume dans l'application de « recettes de cuisine ».

TODO

17. Bibliographie :

17.1. Ouvrages.

TODO

17.2. Web.

L'immensité de la toile.;)

TODO

17.3. Autres.

TODO

Annexes :

TODO

Index lexical

Arduino.....	1, 4, 5
Défuzzification.....	6, 7, 20, 21, 29, 38, 51
ET flou.....	5, 25, 26, 34, 35, 36
fuzzification.....	6, 7, 18, 20, 21, 24, 29, 33, 38, 43, 51
Inférence.....	6
logique floue.....	1, 4, 5, 7, 8, 10
NON flou.....	6
OU flou.....	5

Figures

Fig 1 : Ensemble net et ensemble flou.....	5
Fig 2 : Principe de la logique floue.....	7
Fig 3 : Appartenance d'entrée.....	9
Fig 4 : Appartenance deltaEntrée.....	9
Fig 5 : Appartenance deltaCarréEntrée.....	10
Fig 6 : Appartenance de sortie.....	11
Fig 7 : Appartenance entrée et sortie.....	12
Fig 8 : Zones d'appartenance pour les centreX.....	13
Fig 9 : centreNeg.....	13
Fig 10 : centreZer.....	15
Fig 11 : centrePos.....	15
Fig 12 : entrée + 30 %.....	18
Fig 13 : Entrée -15 %.....	19
Fig 14 : Appartenance de sortie (entrée +30%).....	19
Fig 15 : Appartenance de sortie (entrée -15%).....	20
Fig 16 : Sortie (entrée +30%).....	21
Fig 17 : Sortie (entrée -15%).....	21
Fig 18 : Variation sortie en fonction de l'entrée.....	21
Fig 19 : Variation sortie en fonction de l'entrée (E0MIN=-75 % et E0MAX=+75%).....	22
Fig 20 : Variation sortie en fonction de l'entrée (E0MIN=-75 % et E0MAX=+75%).....	22
Fig 21 : deltaE +10 %.....	24
Fig 22 : deltaE -5 %.....	25
Fig 23 : Appartenance sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=+10%).....	27
Fig 24 : Appartenance sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=-5%).....	28
Fig 25 : Appartenance sortie (erreur=-5 %-deltaErreur=+10%).....	28
Fig 26 : Appartenance sortie (entrée=-15 %-deltaEntrée=-5%).....	29
Fig 27 : Sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=+10%).....	30
Fig 27 : Sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=+10%).....	30
Fig 28 : Sortie (entrée=+30 %-deltaEntrée=-5%).....	30
Fig 29 : Sortie (entrée=-15 %-deltaEntrée=+10%).....	31
Fig 30 : Sortie (entrée=-15 %-deltaEntrée=-5%).....	31
Fig 31a : Variation sortie ($S_{min} \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PI.....	32
Fig 31b : Variation sortie ($0 \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PI.....	32
Fig 32 : deltaCarreE +75 %.....	34
Fig 33 : deltaCarreE -50 %.....	35
Fig 34 : Appartenance sortie (entrée=+30 %-deltaCarreE=+75%).....	36
Fig 35 : Appartenance sortie (entrée=+30 %-deltaCarreE=-50%).....	37
Fig 36 : Appartenance sortie (entrée=-15 %-deltaCarreE=+75%).....	38
Fig 37 : Appartenance sortie (entrée=-15 %-deltaCarreE=-50%).....	38
Fig 38 : Sortie (entrée=+30 %-deltaCarreE=+75%).....	39
Fig 39 : Sortie (entrée=+30 %-deltaCarreE=-50%).....	39
Fig 40 : Sortie (entrée=-15 %-deltaCarreE=+75%).....	40
Fig 41 : Sortie (entrée=-15 %-deltaCarreE=-50%).....	40
Fig 42a : Sortie ($S_{min} \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PD.....	41
Fig 42b : Sortie ($0 \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PD.....	41
Fig 43a : Sortie ($S_{min} \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PID pour deltaCarreErreur = -50 %.....	52
Fig 43b : Sortie ($0 \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PID pour deltaCarreErreur = -50 %.....	52
Fig 44a : Sortie ($S_{min} \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PID pour deltaCarreErreur = +50 %.....	52
Fig 44b : Sortie ($0 \leq \text{sortie} \leq S_{max}$) en fonction des entrées du régulateur PID pour deltaCarreErreur = +50 %.....	52
Fig 45 : e, Δe et $\Delta 2e$ en fonction du temps.....	53
Fig 46 : Principe de l'expérience.....	57
Fig 47 : Schéma électrique de la plate-forme d'essai.....	57
Fig 47b : Caractéristique CTN.....	58
Fig 48 : Organigramme programme.....	59
Fig 49 : Organigramme module Initialisation.....	59
Fig 50 : Organigramme module PWM.....	60
Fig 51 : Organigramme module Mesure et régulation.....	61
Fig 52 : Organigramme module Affichage.....	62
Fig x : Principe de « l'appertiseur ».....	68
Fig x : Schéma électrique de « l'appertiseur ».....	69

Tableaux

Tableau 1 : Matrice règles P.....	17
Tableau 2 : Matrice règles PI.....	24
Tableau 3 : Matrice règles PD.....	33
Tableau 4 : Matrice règles PID.....	43
Tableau 4 : Variables, Constantes et Autres.....	63