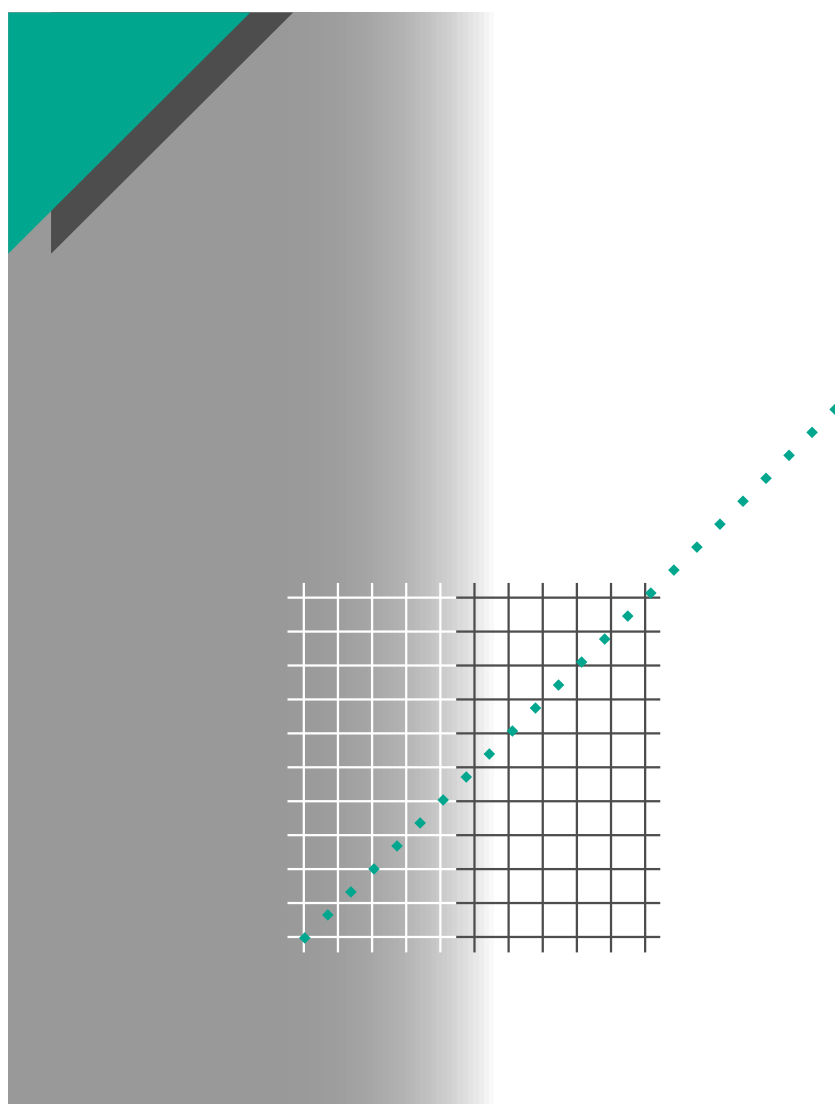


Cahier technique n° 191

La logique floue



F. Chevrie
F. Guély



GROUPE SCHNEIDER

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **maîtrise de l'électricité**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » du groupe Schneider.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider n° (à préciser) ».

n° 191

La logique floue



François CHEVRIE

Entré à Télémécanique en 1987, il a rejoint le Service Automatique Avancée de la Direction des Recherches en 1993. Ingénieur CNAM en Automatismes Industriels, il a réalisé son mémoire sur l'intégration de la logique floue dans les automates Schneider.

Il a participé activement à la réalisation de l'offre produit logique floue pour la gamme d'automates Micro/Premium, et à plusieurs mises en œuvre de cette technique notamment dans l'automobile et en agro-alimentaire.



François GUÉLY

Diplômé de l'École Centrale de Paris en 1988, entré chez Télémécanique, au Japon, en 1990, docteur en automatique en 1994, il est responsable du service Automatique Avancée de Schneider depuis 1995. Il a participé à l'élaboration de l'extension vers la logique floue de la norme des langages pour automates programmables.

Lexique

Activation :

Voir degré de vérité.

Base de connaissance :

Ensemble des fonctions d'appartenance et des règles d'un système flou contenant l'expertise, la connaissance de l'opérateur, de l'expert, etc.

Conclusion :

Une conclusion de règle est une proposition associant une variable linguistique et un terme linguistique écrite après le *alors* de la règle. Une conclusion peut être formée par la combinaison de plusieurs propositions.

Condition :

Voir prédicat

Défuzzification :

Transformation, après inférence, d'un ensemble flou d'une variable linguistique de sortie en valeur numérique.

Degré d'activation :

Voir degré de vérité.

Degré d'appartenance :

Un élément x appartient à un ensemble flou A avec un degré d'appartenance compris entre 0 et 1, donné par la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$.

Degré de vérité :

Le degré de vérité, ou encore degré d'activation, d'une règle prend une valeur y comprise entre 0 et 1 déduite des degrés d'appartenance des prédicats de la règle. Il influe directement sur la valeur des conclusions de cette même règle. On dit aussi que la règle est active à y .

Ensemble flou :

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble : cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas...) ou 1 (...appartient à l'ensemble). Un ensemble flou est défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1.

Fonction d'appartenance :

Fonction $\mu_A(x)$ qui à toute valeur d'entrée x fait correspondre son degré d'appartenance à l'ensemble A . Cette valeur graduelle est comprise entre 0 et 1.

Fusion capteurs :

Voir Fusion de données.

Fusion de données :

La fusion de données consiste à extraire, à partir de plusieurs données, une ou plusieurs informations pouvant être de natures différentes. Exemple : des grandeurs R , V et B de la couleur d'un biscuit, on déduit l'état de cuisson du biscuit. On parle également de fusion capteurs.

Fuzzification :

Transformation d'une valeur numérique en degré d'appartenance flou par évaluation d'une fonction d'appartenance.

Inférence :

Cycle de calcul des degrés d'activation de toutes les règles de la base ainsi que de tous les ensembles flous des variables linguistiques se trouvant dans les conclusions de ces règles.

Prédicat :

Appelé encore prémisse ou condition, un prédicat de règle est une proposition associant une variable linguistique et un terme linguistique écrite entre le *si* et le *alors* de la règle. Un prédicat peut être formé par la combinaison de plusieurs propositions.

Prémisse :

Voir Prédicat

Singleton :

Fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ « en bâton », c'est à dire nulle pour tout x , sauf en un point singulier x_0 .

Terme linguistique :

Terme associé à une fonction d'appartenance caractérisant une variable linguistique.

Variable linguistique :

Variable numérique appliquée en entrée, pour fuzzification, ou en sortie, après défuzzification, d'un module de logique floue. On lui attribue l'adjectif *linguistique* car elle est utilisée, dans les fonctions d'appartenance et les règles, par son nom et non pas par une valeur numérique.

La logique floue

Au départ théorie, la logique floue s'affirme comme une technique opérationnelle. Utilisée à côté d'autres techniques de contrôle avancé, elle fait une entrée discrète mais appréciée dans les automatismes de contrôle industriel.

La logique floue ne remplace pas nécessairement les systèmes de régulation conventionnels. Elle est complémentaire. Ses avantages viennent notamment de ses capacités à :

- formaliser et simuler l'expertise d'un opérateur ou d'un concepteur dans la conduite et le réglage d'un procédé,
- donner une réponse simple pour les procédés dont la modélisation est difficile,
- prendre en compte sans discontinuité des cas ou exceptions de natures différentes, et les intégrer au fur et à mesure dans l'expertise,
- prendre en compte plusieurs variables et effectuer de la « fusion pondérée » des grandeurs d'influence.

Quel est l'apport de cette technique dans la conduite d'un processus industriel ?

Quel peut être l'impact sur la qualité et le coût de fabrication du produit ?

Après quelques notions théoriques de base, ce Cahier Technique répond à l'automaticien et à l'utilisateur potentiel au travers d'exemples industriels, en termes de mise en œuvre et d'avantages concurrentiels.

Sommaire

1 Introduction	1.1 La logique floue aujourd'hui	p. 4
	1.2 Historique de la logique floue	p. 4
	1.3 Intérêt et utilisation de la logique floue pour le contrôle	p. 5
2 Théorie des ensembles flous	2.1 Notion d'appartenance partielle	p. 6
	2.2 Fonction d'appartenance	p. 6
	2.3 Opérateurs logiques flous	p. 8
	2.4 Règles floues	p. 9
3 Exemple didactique d'application	3.1 Introduction	p. 14
	3.2 Présentation de l'exemple	p. 14
	3.3 Variables et termes linguistiques	p. 15
	3.4 Règles et sorties	p. 15
4 Mise en œuvre	4.1 Quand peut-on utiliser les bases de règles floues ?	p. 16
	4.2 Conception d'une application	p. 16
	4.3 Exploitation d'une application	p. 17
	4.4 Choix de la technologie de mise en œuvre	p. 17
	4.5 Normes	p. 18
5 Application du flou	5.1 Types d'utilisations	p. 19
	5.2 Exemples de réalisations industrielles	p. 20
6 Conclusion		p. 24
Annexe		p. 26
Bibliographie		p. 28

1 Introduction

1.1 La logique floue aujourd'hui

La logique floue, dans la plupart des applications actuelles, permet de prendre en compte toutes sortes de connaissances qualitatives de concepteurs et d'opérateurs dans l'automatisation des systèmes.

Elle suscite en France un intérêt médiatique depuis le début des années 90. Les nombreuses applications dans l'électroménager et l'électronique grand public réalisées notamment au Japon en ont été l'élément déclenchant. Machines à laver sans réglage, caméscopes anti-bougé et de nombreuses autres innovations ont fait connaître le terme « logique floue » à un large public.

Dans l'automobile les transmissions automatiques, les contrôles d'injection et d'anticliquetis, l'air conditionné sont réalisés sur des véhicules de série grâce à la logique floue.

Dans le domaine des processus de production, continue et par lots, et dans les automatismes

(qui nous intéressent essentiellement ici) les applications se sont également multipliées. La logique floue s'y développe car il s'agit d'une approche essentiellement pragmatique, efficace et générique. On dit parfois qu'elle permet de systématiser ce qui est du domaine de l'empirisme, et donc difficile à maîtriser. La théorie des ensembles flous fournit une méthode pertinente et facilement réalisable dans des applications temps réel ; elle permet de transcrire et rendre dynamiques les connaissances des concepteurs ou des opérateurs.

Cet aspect adaptable et universel de la logique floue permet de s'attaquer à l'automatisation de procédures telles que la mise en route, le réglage de paramètres, pour lesquelles peu d'approches existaient auparavant.

Ce Cahier Technique présente la logique floue et son application dans le cadre des processus de production.

1.2 Historique de la logique floue

Apparition de la logique floue

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous » (Fuzzy sets). Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques.

Premières applications

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L.Smidth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue.

Essor

C'est au Japon, où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. A la fin des années 1980, c'est d'un véritable boum qu'il faut parler. Les produits grand public, machines à laver, appareils photographiques et autres caméscopes estampillés « fuzzy logic » ne se comptent plus. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical.

A partir de 1990, c'est en Allemagne que des applications apparaissent en grand nombre ainsi qu'à une moindre échelle aux USA. Enfin en France, la logique floue devient aujourd'hui une réalité.

1.3 Intérêt et utilisation de la logique floue pour le contrôle

Intérêt

La logique floue trouve ses origines dans un certain nombre de constatations :

- La connaissance que l'être humain a d'une situation quelconque est généralement imparfaite,
 - elle peut être incertaine (il doute de sa validité),
 - ou imprécise (il a du mal à l'exprimer clairement).
- L'être humain résout souvent des problèmes complexes à l'aide de données approximatives : la précision des données est souvent inutile ; par exemple pour choisir un appartement, il pourra prendre en compte la surface, la proximité de commerces, la distance du lieu de travail, le loyer, sans pour autant avoir besoin d'une valeur très précise de chacune de ces données.
- Dans l'industrie ou les techniques, les opérateurs résolvent souvent des problèmes complexes de manière relativement simple et sans avoir besoin de modéliser le système. De même, tout le monde sait qu'un modèle mathématique n'est pas nécessaire pour conduire une voiture et pourtant une voiture est un système très complexe.
- Plus la complexité d'un système augmente, moins il est possible de faire des affirmations précises sur son comportement.

De ces constatations viennent naturellement les déductions suivantes :

- plutôt que de modéliser le système, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système ;
- plutôt que par des valeurs numériques précises, le fonctionnement doit être décrit par des qualificatifs globaux traduisant l'état approximatif des variables.

Utilisation pour le contrôle

La logique floue est bien connue des automaticiens pour ses applications dans le contrôle-commande de procédés, appelé alors couramment « contrôle flou ». Tout comme un contrôleur (ou correcteur) classique, le contrôleur flou s'insère dans la boucle de régulation et calcule la commande à appliquer au procédé suivant une ou plusieurs consignes et une ou plusieurs mesures effectuées sur celui-ci.

Les bases de règles floues sont intéressantes en commande car elles permettent :

- de prendre en compte une expertise existante de nature qualitative,
- de prendre en compte des variables que l'on sait difficilement intégrer dans la boucle,
- d'améliorer le fonctionnement de contrôleurs classiques, par :
 - autoréglage hors ligne ou en ligne des gains de ces contrôleurs,
 - modification de leur sortie (feed forward) en fonction d'événements qui ne peuvent pas être pris en compte par une technique classique.

La capitalisation du savoir-faire

Pour que l'utilisation de règles floues puisse être envisagée, il faut impérativement qu'il existe une expertise, un savoir-faire humain. Les bases de règles floues n'apportent pas de solution quand personne ne sait comment fonctionne le système ou ne peut le piloter manuellement.

Lorsque ce savoir-faire existe et est transcribable sous forme de règles floues, la logique floue permet de le mettre facilement en œuvre et le fonctionnement est facilement compréhensible par l'utilisateur.

Au-delà de l'automatisation, la logique floue permet une réelle capitalisation du savoir-faire du terrain, souvent recherchée pour éviter la perte du savoir-faire ou pour le démultiplier dans l'entreprise.

Lors du recueil d'expertise, l'oubli inconscient d'informations, la difficulté d'expliquer, la crainte de divulguer son savoir sont des obstacles souvent rencontrés. Cette étape doit donc être préparée et menée avec soin, particulièrement sur le plan humain.

Dans les cas où une expertise humaine existe, l'utilisation de règles floues est envisageable, à plus forte raison lorsque des imperfections entachent la connaissance du système, lorsque celui-ci est très complexe et que sa modélisation est difficile ou lorsque la façon de l'aborder passe par une vue globale de certains de ses aspects. Les règles floues ne se substituent pas aux méthodes classiques d'automatique mais les complètent.

2 Théorie des ensembles flous

2.1 Notion d'appartenance partielle

Dans la théorie des ensembles, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. Parmi des fruits, il est facile de définir l'ensemble des pommes. Par contre, il sera plus difficile de définir l'ensemble des pommes mûres. On conçoit bien que la

pomme mûrit progressivement... la notion de pomme mûre est donc graduelle.

C'est pour prendre en compte de telles situations qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou (cf. **fig. 1**) ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels ».

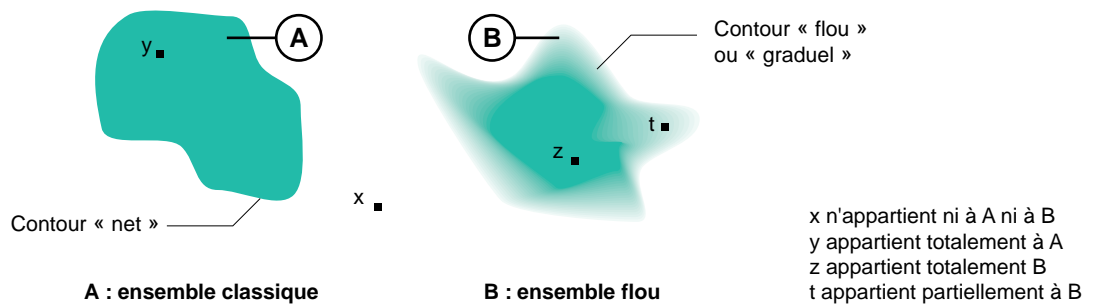


Fig. 1 : comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

2.2 Fonctions d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa « fonction d'appartenance », qui correspond à la notion de « fonction caractéristique » en logique classique.

Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1,60 m et 1,80 m. La fonction caractéristique de l'ensemble (cf. **fig. 2**)

donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1,60 m ; 1,80 m] et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0, 1]. A chaque taille possible correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble flou des « tailles moyennes » (cf. **fig. 3**), compris entre 0 et 1.

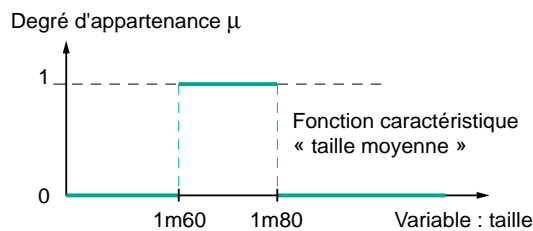


Fig. 2 : fonction caractéristique.

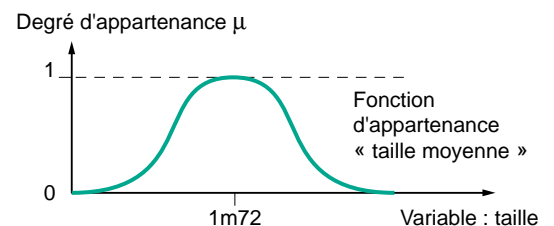


Fig. 3 : fonction d'appartenance.

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles « taille petite », « taille moyenne » et « taille grande », notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance (cf. **fig. 4**).

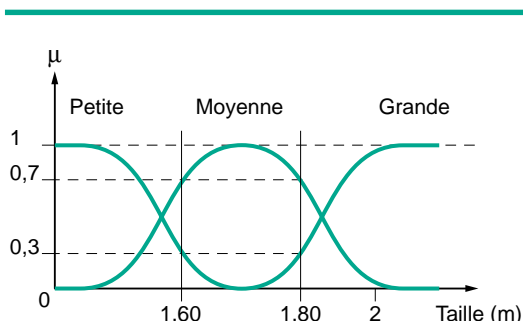


Fig. 4 : fonction d'appartenance, variable et terme linguistique.

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1,80 m appartient à l'ensemble « taille grande » avec un degré 0,3 et à l'ensemble « taille moyenne » avec un degré de 0,7. En logique classique, le passage de moyen à grand serait brusque. Une personne de 1,80 m serait par exemple de taille moyenne alors qu'une personne de 1,81 m serait grande, ce qui choque l'intuition. La variable (par exemple : taille) ainsi que les termes (par exemple : moyenne, grande) définis par les fonctions d'appartenance portent respectivement les noms de variable linguistique et de termes linguistiques.

Comme cela sera vu plus loin, variables et termes linguistiques peuvent être utilisés directement dans des règles.

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme. Toutefois, elles sont souvent définies par des segments de droites, et dites « linéaires par morceaux » (cf. **fig. 5**).

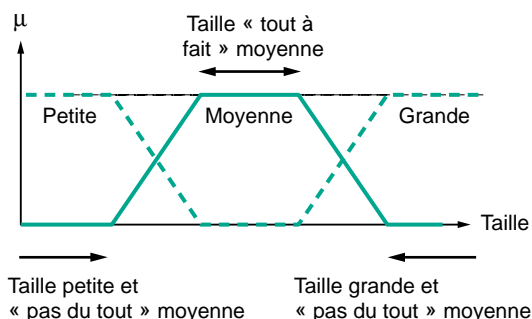


Fig. 5 : fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.

Les fonctions d'appartenance « linéaires par morceaux » sont très utilisées car :

- elles sont simples,
- elles comportent des points permettant de définir les zones où la notion est vraie, les zones où elle est fausse, ce qui simplifie le recueil d'expertise.

Ce sont des fonctions d'appartenance de ce type qui seront utilisées dans la suite de ce document.

Dans certains cas, les fonctions d'appartenance peuvent être égales à 1 pour une seule valeur de la variable et égales à 0 ailleurs, et prennent alors le nom de « fonctions d'appartenance singletons ». Un singleton flou (cf. **fig. 6**) défini sur une variable réelle (taille) est la traduction dans le domaine flou d'une valeur particulière (taille de Paul) de cette variable (cf. annexe).

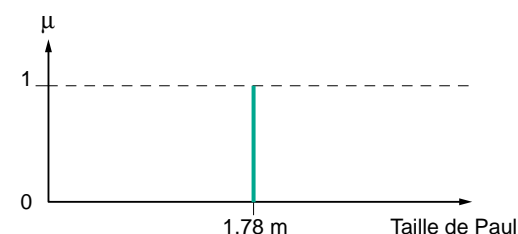


Fig. 6 : fonction d'appartenance singleton

Fuzzification - Degré d'appartenance

L'opération de fuzzification permet de passer du domaine réel au domaine du flou.

Elle consiste à déterminer le degré d'appartenance d'une valeur (mesurée par exemple) à un ensemble flou. Par exemple (cf. **fig. 7**), si la valeur courante de la variable « entrée » est de 2, le degré d'appartenance à la fonction d'appartenance « entrée faible » est égal à 0,4 qui est le résultat de la fuzzification.

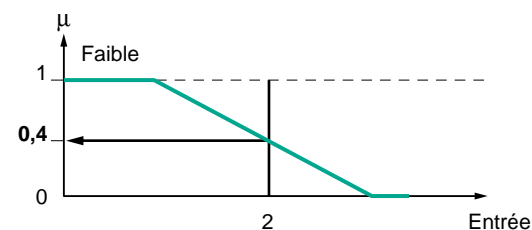


Fig. 7 : fuzzification

On peut aussi dire que la proposition « entrée faible » est vraie à 0,4. On parle alors de degré de vérité de la proposition. Degré d'appartenance et degré de vérité sont donc des notions similaires.

2.3 Opérateurs logiques flous

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir des opérateurs ET, OU, négation.

Exemple : Appartement Intéressant = Loyer Raisonnable ET Surface Suffisante

Choix des opérateurs

Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs (cf. annexe). Cependant, les plus répandus sont ceux dits « de Zadeh » décrits ci-dessous. Leur utilisation sera reprise dans l'exemple didactique d'utilisation d'une base de règles floues.

Dans ce qui suit, le degré de vérité d'une proposition A sera noté $\mu(A)$.

Intersection

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est le ET. Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés de vérité de A et de B :

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

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7
 « Pression Faible » est vraie à 0,5
 « Température Basse ET Pression Faible » est donc vraie à 0,5 = MIN(0,7; 0,5)

Remarque : l'opérateur ET de la logique classique est bien respecté : 0 ET 1 donne bien 0.

Union

L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le OU. Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B :

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

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7
 « Pression Faible » est vraie à 0,5

« Température Basse OU Pression Faible » est donc vraie à 0,7.

Remarque : l'opérateur OU de la logique classique est bien respecté : 0 OU 1 donne bien 1.

Complément

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation.

$$\mu(\text{NON } A) = 1 - \mu(A)$$

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7
 « NON Température Basse », que l'on utilisera généralement sous la forme « Température NON Basse », est donc vraie à 0,3.

Remarque : l'opérateur négation de la logique classique est bien respecté : NON(0) donne bien 1 et NON(1) donne bien 0.

Ladder flou

Le langage ladder, ou langage à contacts, est très utilisé par les automaticiens pour écrire des combinaisons logiques. Il permet en effet de les représenter graphiquement. Schneider a introduit l'utilisation de la représentation ladder pour décrire les combinaisons logiques floues.

En voici un exemple, traitant du confort de l'air ambiant :

l'air chaud et humide est inconfortable (transpiration excessive) ; de même la respiration devient difficile dans un air froid et trop sec. Les situations les plus confortables thermiquement sont celles pour lequel l'air est chaud et sec, ou froid et humide. Cette constatation physiologique peut être transcrite par le ladder flou de la **figure 8** correspondant à la combinaison suivante :

Confort bon = (Température faible ET Humidité forte) OU (Température forte ET Humidité faible)

Elle représente une définition possible de la sensation de confort ressentie par une personne dans une ambiance thermique pour laquelle l'air est immobile.

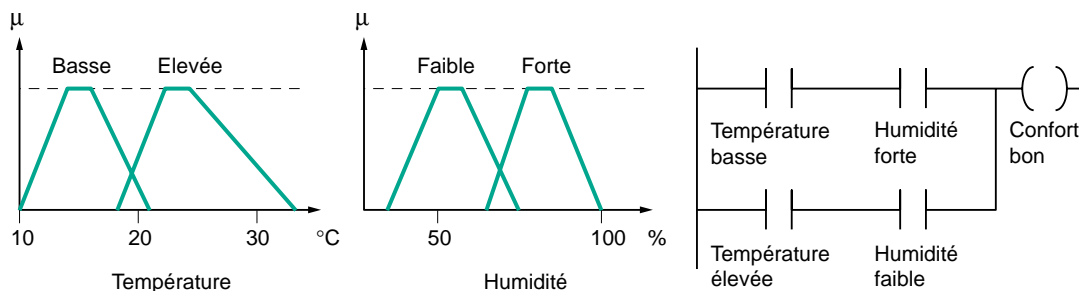


Fig. 8 : ladder flou.

Classification floue

La classification comprend en général deux étapes :

- préparatoire : détermination des classes à considérer,
- en ligne : affectation des éléments aux classes.

La notion de classe et d'ensemble sont identiques sur le plan théorique.

Il existe trois types de méthodes d'affectation, selon le résultat produit :

- booléen : les éléments appartiennent ou non aux classes,
- probabiliste : les éléments ont une probabilité d'appartenance à des classes booléennes, comme par exemple la probabilité qu'un patient ait la rougeole au vu des symptômes qu'il présente (diagnostic),
- graduelle : les éléments ont un degré d'appartenance aux ensembles ; par exemple,

une salade appartient plus ou moins à la classe des « salades fraîches ».

Les méthodes de classification, qu'elles produisent un résultat graduel, booléen ou probabiliste, peuvent être mises au point à partir :

- d'une expérience (cas du « ladder flou » mentionné précédemment),
- d'exemples utilisés pour un apprentissage (par exemple dans le cas de classificateurs à réseaux de neurones)
- d'une connaissance mathématique ou physique du problème (par exemple le confort d'une situation thermique peut être évalué à partir d'équations de bilan thermique).

Les méthodes de classification graduelle (ou floue) permettent, notamment, de mettre au point des boucles de régulation. C'est le cas dans l'exemple de la cuisson industrielle des biscuits exposé plus loin.

2.4 Règles floues

La logique floue et l'intelligence artificielle

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications.

Une règle est du type :

SI « prédicat » ALORS « conclusion ».

Par exemple : « Si température élevée et pression forte ALORS ventilation forte et soupape grande ouverte ».

Les bases de règles floues, tout comme les systèmes experts classiques, fonctionnent en s'appuyant sur une base de connaissance issue de l'expertise humaine. Il y a néanmoins de grandes différences dans les caractéristiques et le traitement de cette connaissance. (cf. **fig. 9**).

Une règle floue comporte trois étapes fonctionnelles résumées dans la **figure 10**.

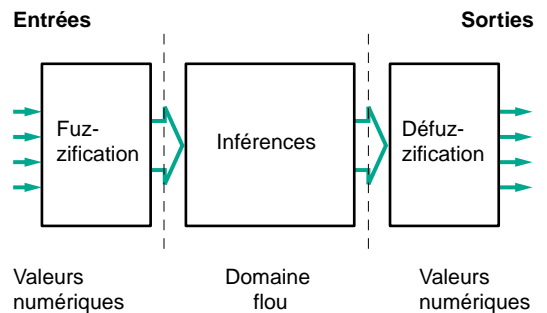


Fig. 10 : traitement flou.

Prédicat

Un prédicat (encore appelé prémisse ou condition) est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON.

Les propositions « température élevée » et « pression forte » de l'exemple précédent sont combinées par l'opérateur ET pour former le prédicat de la règle.

Base de règles floues	Base de règles classiques (système expert)
Peu de règles	Beaucoup de règles
Traitement graduel	Traitement booléen
Enchaînement possible mais peu utilisé	Règles enchaînées $A \text{ OU } B \Rightarrow C,$ $C \Rightarrow D,$ $D \text{ ET } A \Rightarrow E$
Règles traitées en parallèle	Règles utilisées une par une, séquentiellement
Interpolation entre règles pouvant se contredire	Pas d'interpolation, pas de contradiction

Fig. 9 : base de règles floues et base de règles classiques.

Inférence

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit « de Mamdani ». Il représente une simplification du mécanisme plus général basé sur « l'implication floue » et le « modus ponens généralisé ». Ces concepts sont explicités en annexe. Seules les bases de règles « de Mamdani » sont utilisées dans ce qui suit.

Conclusion

La conclusion d'une règle floue est une combinaison de propositions liées par des opérateurs ET. Dans l'exemple précédent, « ventilation forte » et « soupape grande ouverte » sont la conclusion de la règle.

On n'utilise pas de clauses « OU » dans les conclusions, car elles introduiraient une incertitude dans la connaissance (l'expertise ne permettrait pas de déterminer quelle décision prendre). Cette incertitude n'est pas prise en compte par le mécanisme d'inférence de Mamdani, qui ne permet de gérer que des imprécisions. Les règles floues « de Mamdani » ne sont donc a priori pas adaptées à du diagnostic

de type « diagnostic médical » pour lequel les conclusions sont incertaines. La théorie des possibilités, inventée par Lotfi Zadeh, apporte dans ces cas une méthodologie adéquate.

De même, la négation est a priori interdite dans les conclusions pour des règles de Mamdani. En effet, si une règle avait par exemple la conclusion « Alors ventilation non moyenne », il serait impossible de dire si cela signifie « ventilation faible » ou « ventilation forte ». Ce serait encore un cas d'incertitude.

Mécanisme d'inférence de Mamdani

■ Principe

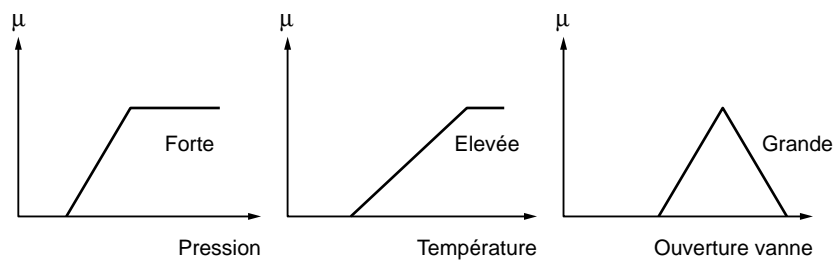
Une base de règles floues de Mamdani comprend donc des règles linguistiques faisant appel à des fonctions d'appartenance pour décrire les concepts utilisés (cf. [fig. 11](#))

Le mécanisme d'inférence comprend les étapes suivantes :

■ Fuzzification

La fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles, comme illustré par la [figure 12](#) :

Si « pression forte » ET « temp. élevée » ALORS « ouverture vanne grande »



Si « pression moyenne » ET « temp. élevée » ALORS « ouverture vanne moyenne »

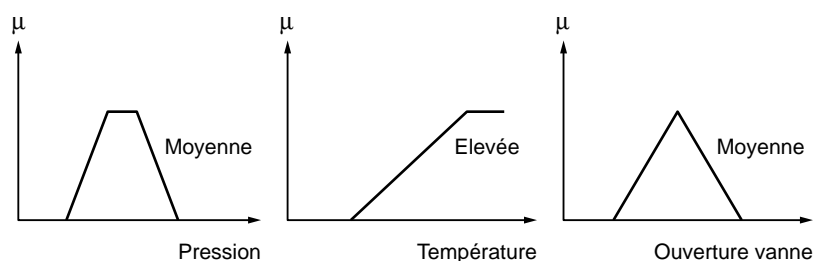


Fig. 11 : implication

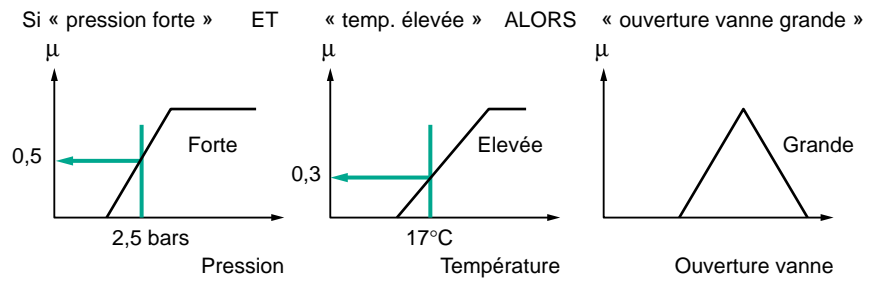


Fig. 12 : fuzzification.

■ Degré d'activation

Le degré d'activation d'une règle est l'évaluation du prédicat de chaque règle par combinaison logique des propositions du prédicat (cf. chap 2.3),

comme illustré figure 13. Le « ET » est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions.

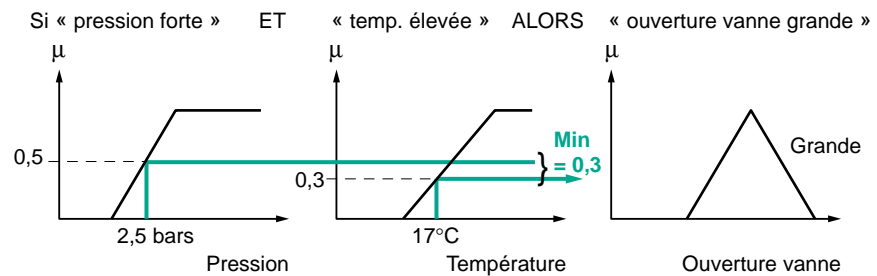


Fig. 13 : activation

■ Implication

Le degré d'activation de la règle permet de déterminer la conclusion de la règle, c'est l'implication. Il existe plusieurs opérateurs d'implication (cf. annexe), mais le plus utilisé est le « minimum ». L'ensemble flou de

conclusion est construit en réalisant le minimum entre le degré d'activation et la fonction d'appartenance, sorte d'« écrêtage » de la fonction d'appartenance de conclusion (cf. fig. 14).

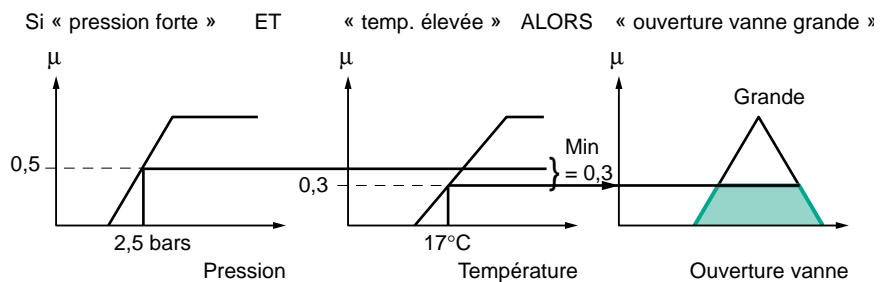


Fig. 14 : implication

■ Agrégation

L'ensemble flou global de sortie est construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacune des règles concernant cette sortie. L'exemple suivant présente le cas où deux règles

agissent sur une sortie. On considère que les règles sont liées par un « OU » logique, et on calcule donc le maximum entre les fonctions d'appartenance résultantes pour chaque règle (cf. **fig. 15**).

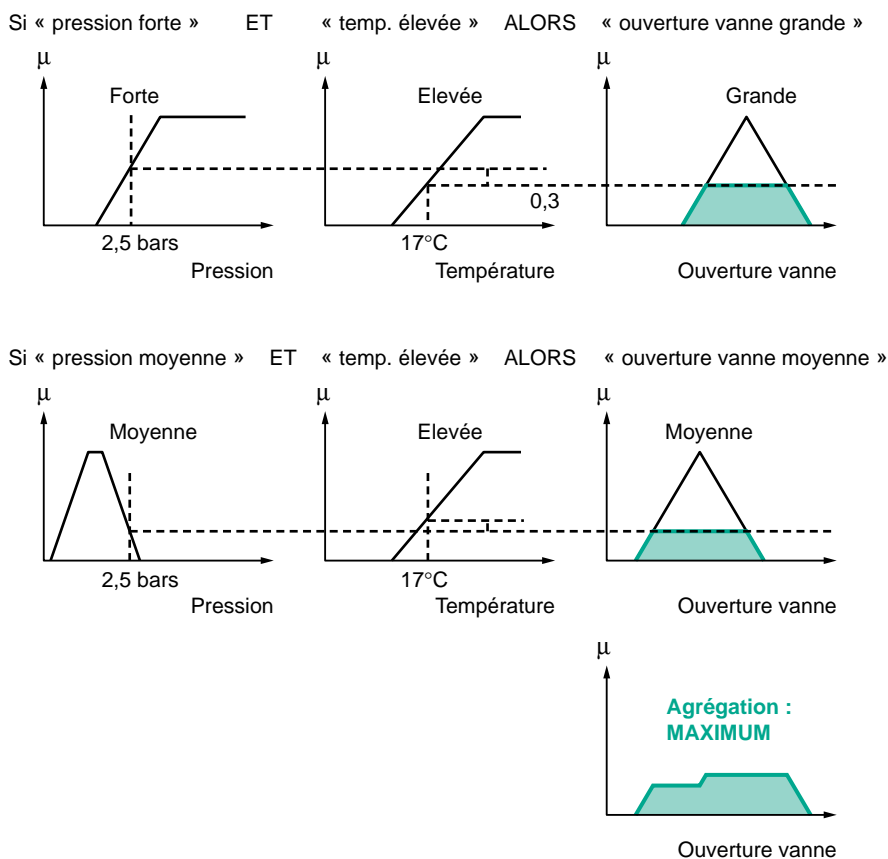


Fig. 15 : agrégation des règles.

Défuzzification

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la *défuzzification*.

Il existe plusieurs méthodes, la plus souvent rencontrée étant le calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou (cf. **fig. 16**).

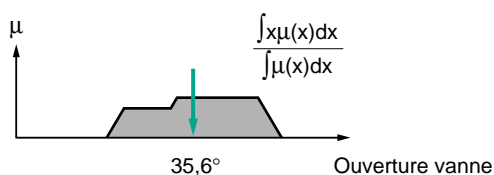


Fig. 16 : défuzzification par centre de gravité.

Règles « libres » et « en tableau »

Les bases de règles floues, dans leur cas général, sont donc définies par des fonctions d'appartenance sur les variables du système, et par des règles qui peuvent être écrites textuellement. Chaque règle fait appel à des entrées et des sorties qui peuvent être différentes, comme le montre l'exemple qui suit :

- R1 : SI « température élevée »
ALORS « sortie élevée »
- R2 : SI « température moyenne »
ET « pression basse »
ALORS « sortie moyenne »
- R3 : SI « température moyenne »
ET « pression élevée »
ALORS « sortie basse »
- R4 : SI « température basse »
ET « pression élevée »
ALORS « sortie très basse »

Schématiquement, on peut représenter les « zones d'action » des règles et leur recouvrement dans le tableau de la **figure 17** .

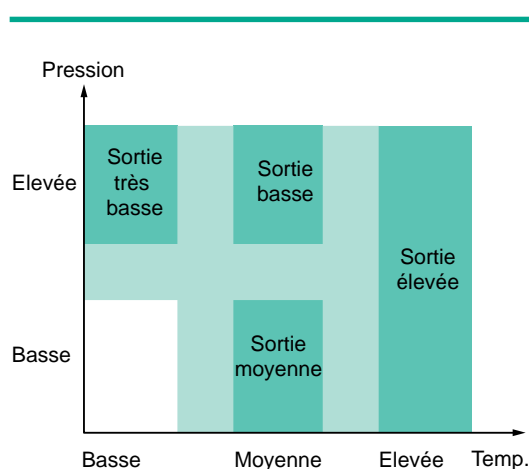


Fig. 17 : implication représentée en tableau.

On constate que :

- tout l'espace n'est pas forcément couvert ; la combinaison « température basse et pression basse » n'est pas ici prise en compte ; l'explication est par exemple que cette combinaison n'est physiquement pas possible pour cette machine, ou qu'elle ne nous intéresse pas ; il est préférable de le vérifier car il peut s'agir d'un oubli ;

- la première règle ne prend en compte que la température ; cette situation est tout à fait normale dans la mesure où elle reflète correctement l'expertise existante.

Beaucoup d'applications définissent cependant des « tableaux » de règles. Dans cette optique, l'espace est « quadrillé », et à chaque « case » correspond une règle. Cette approche a l'avantage d'être systématique, mais :

- elle ne permet pas toujours de traduire simplement (en un minimum de règles) l'expertise existante,
- elle n'est applicable que pour deux voire trois entrées, alors que des bases de règles « libres » peuvent être bâties avec un nombre important de variables.

Remarques

- Une base de règles floues a un comportement statique non linéaire par rapport à ses entrées.
- Les bases de règles floues ne sont pas dynamiques en elles-mêmes, bien qu'elles utilisent souvent comme entrées des variables traduisant la dynamique du système (dérivées, intégrales, ...) ou le temps.
- Le régulateur « PID flou », souvent présenté comme exemple didactique pour se faire une idée sur la logique floue, présente comme intérêt principal de réaliser un PID non linéaire, ce qui justifie rarement de l'utiliser à la place d'un PID classique. Par ailleurs, il y a difficilement ici possibilité d'intégrer une expertise.

3 Exemple didactique d'application

3.1 Introduction

La plupart des réalisations de logique floue font appel à une connaissance spécialisée préalable du domaine d'application. Afin d'être accessible

au lecteur, l'exemple qui suit est basé sur une application fictive. Il est destiné à illustrer la démarche de création d'une base de règles floues.

3.2 Présentation de l'exemple

Il s'agit d'un procédé de lavage de salades destiné à produire des salades pré-emballées pour les rayons « frais » des supermarchés.

Les salades sont coupées, puis lavées et enfin emballées. Ce lavage est destiné à débarrasser les salades de la terre ainsi que des micro-organismes qui pourraient proliférer pendant la durée de conservation du produit. Le fabricant souhaite automatiser le procédé de lavage.

Le lavage est réalisé en continu. Les morceaux de salade sont placés dans des « tambours » qui se déplacent dans un « tunnel » comportant des buses permettant de pulvériser de l'eau chlorée. L'eau permet d'évacuer la terre, alors que le chlore est destiné à tuer les micro-organismes (cf. **fig. 18**).

Les priorités suivantes ont été exprimées par le marketing et ordonnées selon leur importance :

- Vis-à-vis du client
 - Garantir la qualité
 - Salades « bien propres » (apparence).
 - Absence de goût de chlore.
 - Garantir la sécurité
 - Niveau de micro-organismes acceptable.
- Vis-à-vis de la rentabilité
 - Maximiser la production.

- Économiser l'eau.
- Économiser le chlore.

Les opérateurs contrôlant le procédé manuellement ont l'habitude de regarder l'eau usée en fin de lavage. Si cette eau est claire, ils en déduisent par expérience que les salades auront une apparence « propre ». On décide donc d'installer un capteur optique « de turbidité » permettant de déterminer le degré de transparence de cette eau.

D'autre part, les opérateurs utilisent toutes les heures un rapport d'analyse effectué dans l'usine, et donnant le taux de micro-organismes dans des salades lavées prélevées en bout de chaîne, ainsi que leur taux en chlore rémanent.

On souhaite donc utiliser ces informations pour contrôler au mieux :

- la vitesse de défilement des salades (qui permet d'augmenter le débit de production),
- la quantité de chlore pulvérisée,
- la quantité d'eau pulvérisée.

Des limites sont imposées :

- sur la vitesse de défilement, par la mécanique,
- sur le débit d'eau afin de ne pas abîmer les feuilles.

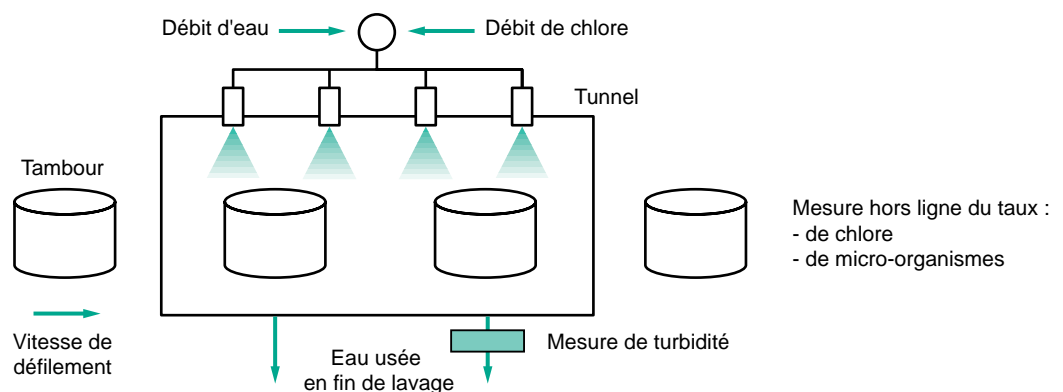


Fig. 18 : procédé de lavage des salades.

3.3 Variables et termes linguistiques

On décide donc de retenir les variables suivantes :

■ entrées :

- taux de micro-organismes : Taux_Micro
- taux de chlore rémanent : Taux_Cl
- turbidité de l'eau : Turbidité
- vitesse de défilement : Vitesse
- débit d'eau : D_Eau

■ sorties :

- modification du débit d'eau : Var_D_Eau
- modification du débit de chlore : Var_D_Cl
- modification de la vitesse : Var_Vit

Une séance avec un opérateur expérimenté, un spécialiste de microbiologie et un « goûteur » de salades permet d'obtenir les fonctions d'appartenance suivantes (cf. **fig. 19**) :

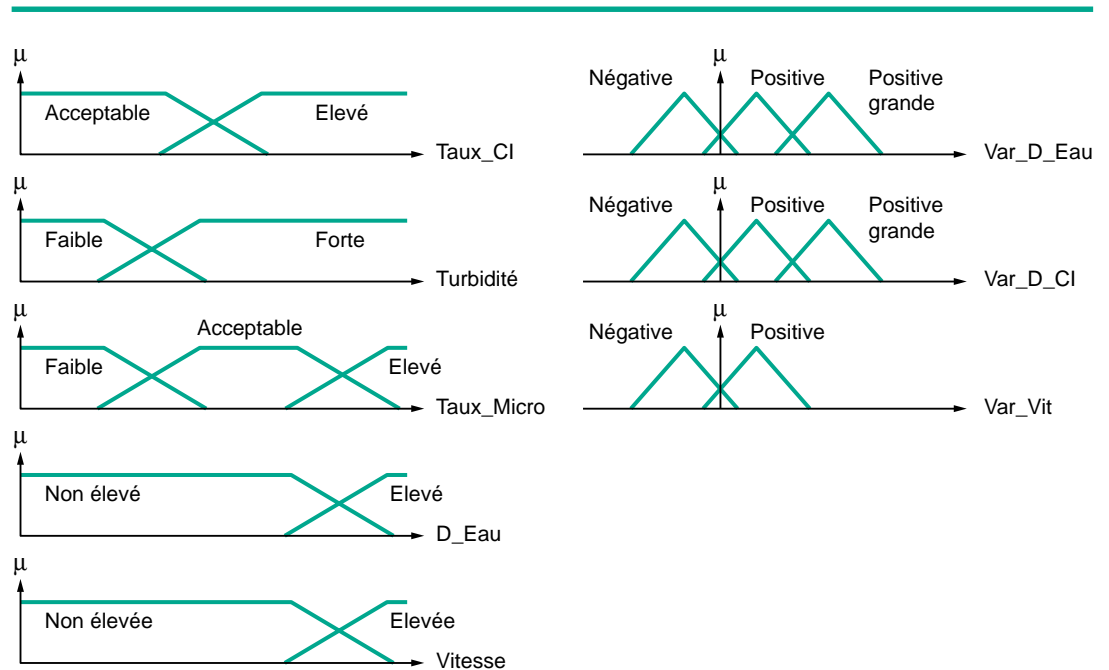


Fig. 19 : fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.

3.4 Règles et sorties

Ecriture des règles floues

Une réunion avec des opérateurs permet de déterminer les sept règles suivantes, qui correspondent chacune à un cas de figure donné (en italique) :

SI « Turbidité forte » ET « D_Eau non élevé »
ALORS « Var_D_Eau positive grande »
(salades mal lavées)

SI « Turbidité forte » ET « D_Eau élevé »
ALORS « Var_Vit négative »
(salades mal lavées mais vitesse de bande élevée)

SI « Taux_Micro élevé » ALORS « Var_D_Cl positive grande »
(trop de micro-organismes)

SI « Turbidité faible » ET « Taux_Micro non élevé » ET « Vitesse non élevée » ET « Taux_Cl acceptable » ET « D_Eau non élevé » ALORS
« Var_Vit positive » ET « Var_D_Cl positive » ET
« Var_D_Eau positive »
(tout va bien et il est possible d'augmenter la production)

SI « Taux_Cl élevé » ET « Taux_Micro non élevé » ALORS « Var_D_Cl négative »
(salades ayant un goût chloré mais pas de micro-organismes)

SI « Vitesse élevée » ET « Taux_Cl acceptable » ET « Turbidité faible » ALORS « Var_D_Eau négative »
(tout va bien et la production est maximale : économiser l'eau)

SI « Taux_Micro faible » ALORS « Var_D_Cl négative »
(aucun micro-organisme : diminuer le chlore pour l'économiser)

Défuzzification

Dans la mesure où on souhaite un comportement progressif de la base de règles dans tous les cas et une interpolation entre les règles, on choisit le centre de gravité comme opérateur de défuzzification.

4 Mise en œuvre

4.1 Quand peut-on utiliser les bases de règles floues ?

Le choix des bases de règles floues pour résoudre un problème applicatif peut être fait quand les conditions suivantes sont réunies :

- possibilité d'agir sur le procédé (contrôlabilité),
- existence d'une expertise ou d'un savoir-faire,

- possibilité de mesurer ou d'observer les grandeurs importantes (entrées et sorties),
- expertise qualitative (si elle est mathématique, l'automatique classique est à favoriser),
- expertise graduelle (si elle est booléenne, les systèmes experts sont plus adaptés).

4.2 Conception d'une application

Choix des opérateurs

Dans la plupart des applications, les bases de règles « de Mamdani » sont utilisées. Ce choix est adapté sauf si l'expertise comprend des indéterminations.

On choisit également le plus souvent d'utiliser des fonctions d'appartenance « trapézoïdales », car elles sont plus faciles à implémenter, et car elles simplifient le recueil d'expertise. Les fonctions d'appartenance de sortie sont le plus souvent des singletons, sauf quand les règles sont enchaînées. Une fonction d'appartenance de sortie triangulaire signifie en effet une incertitude sur la sortie à appliquer, et n'a pas beaucoup d'effet sur l'interpolation entre les règles.

Enfin, la défuzzification est réalisée par le « centre de gravité » pour la régulation (on tient compte de toutes les règles actives); l'utilisation de la « moyenne des maxima » pour les problèmes de prise de décision, permet de trancher lorsque des règles sont « en conflit » et évite d'aboutir à une décision intermédiaire.

Méthodologie

La conception d'une base de règles floues est un processus interactif. La plus grosse part de travail se trouve au niveau du recueil des connaissances. Un des intérêts de la logique floue est la possibilité de valider la base de règles auprès de ceux qui ont fourni l'expertise, avant de la tester sur un système réel. La **figure 20** illustre la démarche employée.

Recueil de connaissance

Il peut être décomposé en trois étapes :

- lister les variables à prendre en compte ; elles deviendront les variables linguistiques de la base de règles ;
- lister les grandeurs qualitatives à prendre en compte, préciser quand elles sont vraies et fausses ; ces grandeurs deviendront les termes linguistiques de la base de règles ;
- exprimer comment ces concepts sont manipulés : quels sont les cas à considérer, comment ils se caractérisent, comment agir dans chaque cas.

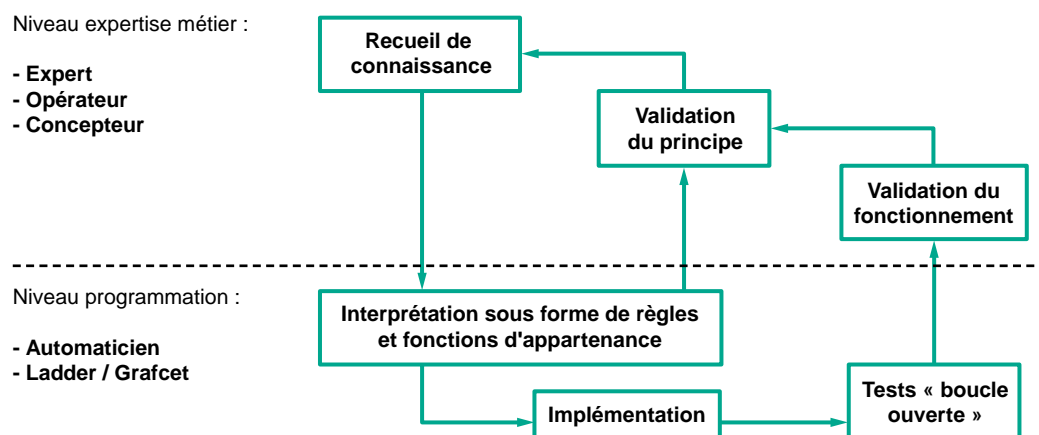


Fig. 20 : méthodologie de conception.

La transcription sous forme de règles floues est alors directe. Il convient cependant d'écrire le moins de fonctions d'appartenance et de règles possible afin de limiter le nombre de paramètres qu'il faudra régler par la suite et conserver une bonne lisibilité de la base. On constate qu'il est plus facile d'ajouter des règles pour prendre en compte des situations nouvelles que d'en enlever.

Validation de la base de connaissance

Elle est conduite en plusieurs étapes :

- présentation de la base de règles aux experts qui ont participé au recueil de connaissances et discussion : celle-ci permet d'identifier des points qui n'avaient pas été abordés, et de vérifier si les règles sont compréhensibles par tous ;
- simulation « en boucle ouverte » : les experts comparent le comportement de la base de règles au comportement attendu d'après eux, sur des cas choisis à l'avance ;

- si le procédé peut être simulé, on peut également effectuer des simulations en boucle fermée.

Mise au point

Les bases de règles ainsi écrites donnent souvent satisfaction dès leur premier essai. Il arrive cependant que l'on ait besoin de modifier ou de mettre au point la base de règles. Les principes qui suivent permettent de se guider dans la recherche de la cause probable de l'écart constaté :

- si le comportement du correcteur en boucle fermée est contraire à ce qu'il devrait être, certaines règles sont probablement mal écrites ;
- si l'on désire optimiser la performance, il est en général préférable de régler au mieux les fonctions d'appartenance ;
- si le système n'est pas robuste, qu'il marche dans certains cas mais pas toujours, il est probable que tous les cas n'ont pas été pris en compte et qu'il faut ajouter des règles.

4.3 Exploitation d'une application

Le rôle des opérateurs

Le niveau d'implication des opérateurs pilotant une application faisant appel à la logique floue est très variable.

On constate les cas suivants :

- système complètement autonome, l'utilisateur final ne connaît pas la logique floue et ne sait pas qu'elle est utilisée,
- la logique floue est une « boîte noire » pouvant être débranchée ou passée en « mode manuel » par l'opérateur,
- l'opérateur est capable de modifier (régler) les fonctions d'appartenance en fonction de la situation et il le fait par exemple lors d'un changement de production,
- l'opérateur a une visibilité sur les règles (par exemple leur degré d'activation) ; il comprend et sait interpréter ce que la base de règles fait ; par exemple quand la situation est exceptionnelle il peut prendre le pas sur la base de règles ;
- l'opérateur est le principal concepteur de la base ; les moyens de consigner lui-même son

savoir-faire et de valider le comportement obtenu lui ont été fournis.

Les changements dans la production

Lors de la vie de l'application, la base de règles doit pouvoir être adaptée aux changements du système de production et des produits fabriqués. Ces changements peuvent être de diverses natures :

- les objectifs sont différents (température de cuisson...), par exemple du fait d'un changement de produit fabriqué : il faut alors modifier les consignes ou les fonctions d'appartenance d'entrée des règles ;
- les dimensionnements du système sont différents : il faut alors modifier des fonctions d'appartenance ;
- la nature du système a changé (par exemple portage de la base de règles d'une machine à une autre) : il faut alors revoir les règles et les fonctions d'appartenance.

Les changements les plus fréquents sont du premier type et peuvent alors être conduits par des opérateurs qualifiés.

4.4 Choix de la technologie de mise en œuvre

La plupart des applications qui existent aujourd'hui sont réalisées avec des plates-formes matérielles courantes (microcontrôleur, microprocesseur, automate, microordinateur...). De nombreux logiciels d'aide au développement de bases de règles floues ayant pour cibles microcontrôleurs, automates programmables, microordinateurs entre autres, permettent de

mettre en œuvre rapidement des bases de règles floues sans programmer.

Il est possible de programmer directement les inférences floues (assembleur, langage C...). Cette solution a l'inconvénient d'être moins rapide en phase de prototypage et d'exiger une compétence en programmation et une maîtrise des algorithmes utilisés en logique floue.

Pour les applications très exigeantes en temps de réponse ou pour obtenir un prix de revient de grande série très bas, l'utilisation de composants dédiés à la logique floue est intéressante. Ceux-ci se développent car :

- les opérations nécessaires pour effectuer des inférences floues sont élémentaires et réalisables en nombres entiers,
- il est possible de réaliser certaines opérations en parallèle,
- le calcul se déroule par étapes successives, ce qui permet de réaliser simplement des architectures « pipeline ».

En particulier, de nombreux ASIC destinés à des marchés particuliers existent (automobile,

électroménager...). Ils sont maintenant souvent intégrés à l'intérieur même des microcontrôleurs, même de faible coût, où ils permettent d'accélérer les inférences floues.

La **figure 21** illustre à titre d'exemple les besoins applicatifs que l'on peut rencontrer en nombre de règles (complexité de l'application) et temps de cycle (rapidité), ainsi que les technologies utilisables (chiffres de 1993). Les règles considérées ici sont à un prédicat et une conclusion.

Le choix technico-économique à faire est donc un compromis entre la flexibilité apportée par les solutions logicielles, l'économie d'échelle et la performance des solutions matérielles dédiées.

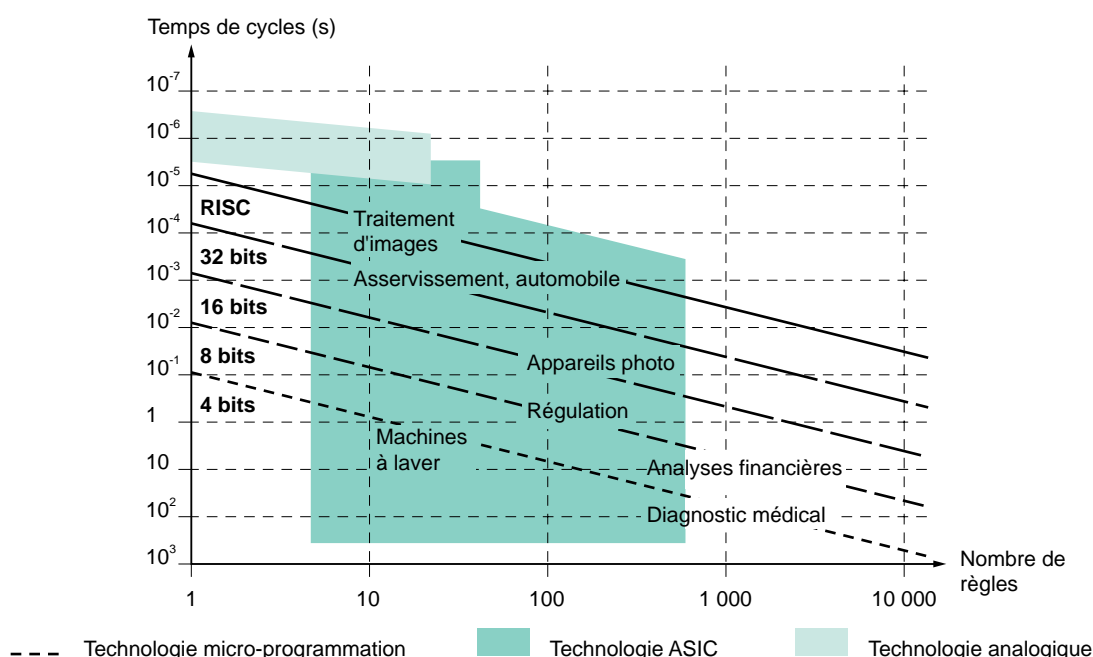


Fig. 21 : performances des composants et domaines applicatifs.

4.5 Normes

Composants

L'absence de normes est un des problèmes majeurs qui retarde l'utilisation de composants dédiés à la logique floue. Ils ne sont en effet pas compatibles entre eux, étant chacun le résultat de choix effectués par les constructeurs.

Logiciel

Dans le domaine du logiciel, le manque de portabilité a retardé également la généralisation de l'utilisation de la logique floue dans l'industrie.

Aujourd'hui, un groupe de travail auquel Schneider participe activement, intègre la norme langage « logique floue » à la norme langage des automates programmables (premier draft officiel de la norme IEC 61131-7 disponible en 1997). D'autres initiatives dans le domaine de la normalisation de la logique floue devraient en découler.

5 Applications du flou

5.1 Types d'utilisations

Fonctions réalisées

Le tableau qui suit montre les fonctions le plus souvent réalisées industriellement à l'aide de systèmes flous (X signifie utilisation possible, XX que la technique est bien adaptée à ce type de problème.). Les bases de règles excellent là où une interpolation et une action sont nécessaires, alors que les méthodes de classification sont adaptées pour les tâches d'évaluation et de diagnostic effectuées en général en amont. Il arrive que des applications associent plusieurs de ces fonctions, en préservant la gradualité de l'information.

	bases de règles	algorithmes de classification
régulation, commande	XX	
réglage automatique de paramètres	XX	
aide à la décision	XX	X
diagnostic	X	XX
contrôle de qualité		XX

Logique floue et autres techniques

La logique floue est avant tout une extension, une généralisation de la logique booléenne. Elle permet d'introduire une gradualité dans des notions auparavant soit vraies soit fausses.

Les probabilités, sans remettre en cause la nature binaire des événements (soit vrais soit faux), permettent de gérer l'incertitude de l'occurrence de ces événements.

A la charnière entre ces deux approches, la théorie des possibilités (inventée par Lotfi Zadeh) permet de prendre en compte à la fois gradualité et incertitude (cf. fig. 22).

Les bases de règles floues sont souvent comparées pour les applications de commande / régulation aux réseaux neuronaux et à l'automatique classique. Ces trois approches nécessitent respectivement pour pouvoir être appliquées une expertise, des données servant à l'apprentissage, et un modèle dynamique du procédé.

Leur comparaison n'est possible que quand les trois sont simultanément disponibles, ce qui est

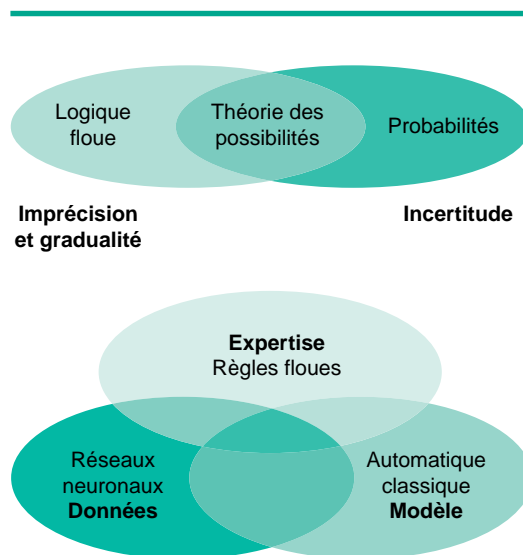


Fig. 22 : comparaison de la logique floue et d'autres techniques.

souvent le cas dans les études théoriques mais rarement en pratique ; si les trois sont disponibles, les aspects pratiques sont souvent prépondérants. En particulier, la logique floue peut être préférée pour son intelligibilité par les opérateurs.

Hybridation des techniques

La logique floue est souvent utilisée en combinaison avec d'autres techniques. Ces associations sont heureuses quand chaque approche met en avant ses propres points forts.

■ Apprentissage de règles floues ou neuroflou

Les bases de règles floues peuvent être modifiées en utilisant des méthodes d'apprentissage.

Les premières méthodes dites de « self-organizing controller » ont été mises au point dès 1974 et visaient à modifier heuristiquement le contenu des règles floues appartenant à un « tableau de règles ». L'expertise elle-même est modifiée par l'apprentissage, mais les fonctions d'appartenance restent inchangées.

Une deuxième approche plus souvent expérimentée consiste à modifier des paramètres représentatifs des fonctions d'appartenance. A la

différence de la première méthode, les règles et la structure de l'expertise ne sont pas altérées. La modification des paramètres des fonctions d'appartenance est réalisée en utilisant des méthodes d'optimisation, par exemple des méthodes de gradient, ou des méthodes d'optimisation globale telles que les algorithmes génétiques ou le recuit simulé. Cette approche est souvent qualifiée de « neuroflou », en particulier dans le cas où le gradient est utilisé. En effet, l'utilisation du gradient pour optimiser ces paramètres s'apparente à la « rétropropagation », utilisée dans les réseaux neuronaux dits « perceptrons multicouches » pour optimiser les poids entre les couches du réseau de neurones. Une troisième approche (que l'on peut qualifier d'optimisation structurelle de la base de règles) vise à déterminer simultanément règles et fonctions d'appartenance par apprentissage. On conduit alors en général l'apprentissage sans

référence à une expertise. Les règles obtenues peuvent alors théoriquement être utilisées pour aider à bâtir une expertise.

■ Utilisation de logique floue combinée à l'automatique

Une base de règles floues fait parfois partie d'un régulateur. L'emploi de la logique floue pour simuler un terme proportionnel permet toutes sortes de non-linéarités. Les cas particuliers de fonctionnement dégradé comme les surcharges, la maintenance ou les pannes partielles sont aisément intégrés.

Une base de règles floues est plus avantageusement utilisée hors de la boucle de régulation, en supervision d'un régulateur. Elle sert alors à remplacer un opérateur pour ajuster les paramètres du régulateur en fonction des conditions d'exploitation de l'asservissement.

5.2 Exemples de réalisations industrielles

La logique floue est maintenant admise comme faisant partie des méthodes courantes pour contrôler les processus industriels. L'automatique binaire et le régulateur PID sont encore suffisants pour bien des applications ; mais de plus en plus la logique floue est reconnue et utilisée pour ses atouts différenciateurs, notamment en matière de maîtrise de la qualité de production et des coûts. En raison des avantages concurrentiels offerts par la logique floue dans certaines applications, l'intégrateur ou l'utilisateur final ne souhaite généralement pas en faire état. Il y a dans ces applications tout un savoir-faire capitalisé, ou bien un astucieux raccourci technique. La confidentialité est alors de mise. Cela explique qu'il n'a pas été possible de détailler de la même façon tous les exemples qui suivent.

Station d'épuration

Pour la plupart, les stations d'épuration modernes utilisent des procédés biologiques (développement de bactéries dans des réservoirs aérés) pour purifier les eaux usées avant de les rejeter dans l'environnement naturel. La matière organique contenue dans l'eau de rejet est utilisée par la bactérie pour créer ses constituants cellulaires. Celle-ci rejette du gaz carbonique (CO₂) et de l'azote (N₂). De l'air est insufflé dans les réservoirs. L'énergie utilisée pour cette ventilation représente couramment plus de la moitié de l'énergie globale consommée par la station. Pour assurer le développement correct des bactéries et l'épuration, les concentrations de NH₄ et O₂ dans les réservoirs d'aération

doivent être étroitement maîtrisées ; d'autant plus que pour réduire les coûts d'énergie, le débit d'air est maintenu au minimum compatible avec le processus biologique.

Il faut rajouter à ces exigences la prise en compte de quelques cas de fonctionnement particuliers, comme par exemple un débit amont très élevé, circonstance extrême où les paramètres sont profondément modifiés, et les performances d'épuration dégradées.

Bien qu'il existe des modèles mathématiques partiels de stations, aucun modèle complet n'est disponible, et la stratégie de pilotage de l'ensemble doit souvent être développée heuristiquement.

L'emploi de la logique floue aujourd'hui est assez fréquent dans une station d'épuration. La station de la **figure 23**, située en Allemagne, fonctionne depuis 1994. Le contrôle flou a été réalisé sur un automate programmable Schneider Modicon, grâce à ses modules fonctionnels standard de régulation floue.

Le concepteur souligne l'intérêt d'utiliser la logique floue dans la régulation : les exceptions, situations où la capacité d'épuration est partiellement dégradée, sont traitées simplement et sans discontinuité.

Voici la méthode choisie pour introduire ces états d'exception dans une boucle de régulation :

Un terme proportionnel qui doit s'adapter aux circonstances exceptionnelles est identifié dans la boucle de régulation ; le terme proportionnel est d'abord transcrit en logique floue, puis cet élément de logique floue inséré dans la boucle de régulation.

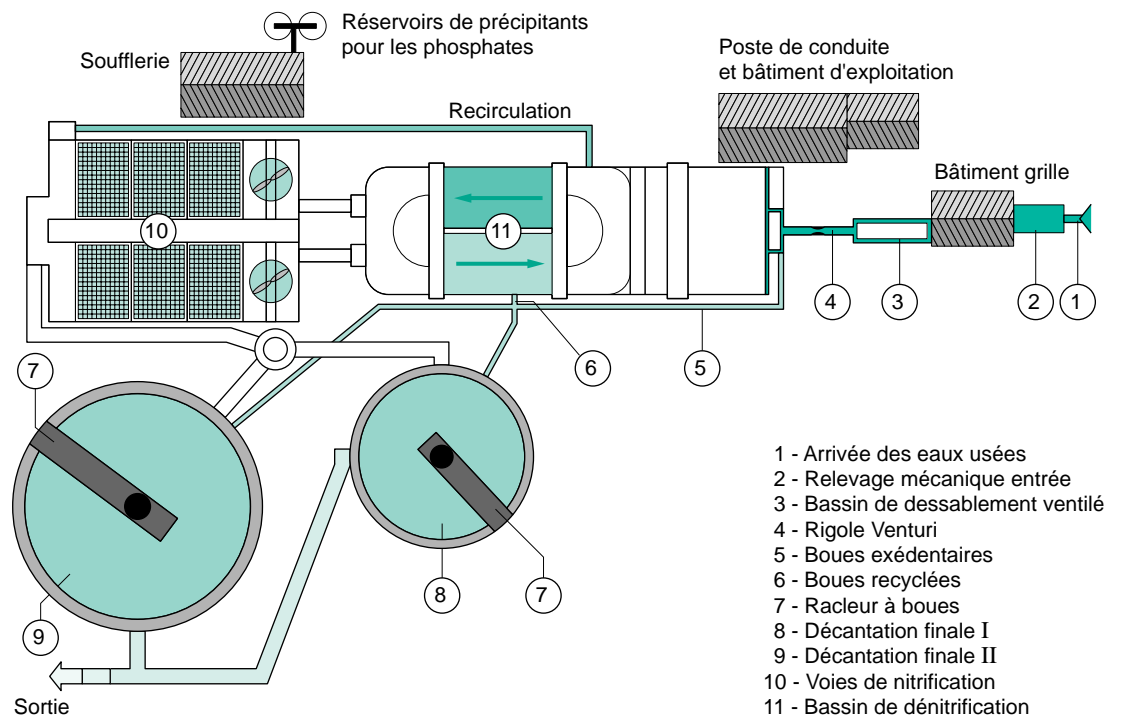


Fig. 23 : synoptique de la station d'épuration.

Une fois les fonctions d'appartenance convenablement ajustées, deux règles suffisent à décrire ce régulateur proportionnel :

SI entrée basse ALORS sortie basse.
 SI entrée haute ALORS sortie haute.

Une troisième règle est rajoutée à la demande des opérateurs qui y trouvent une meilleure compréhension du fonctionnement :

SI entrée moyenne ALORS sortie moyenne (cf. fig. 24).

Une fois le terme proportionnel simulé, les exceptions sont introduites sous forme d'autres règles, dépendant d'autres combinaisons de variables d'entrée.

Un exemple simple de cette possibilité est illustré par la figure 25.

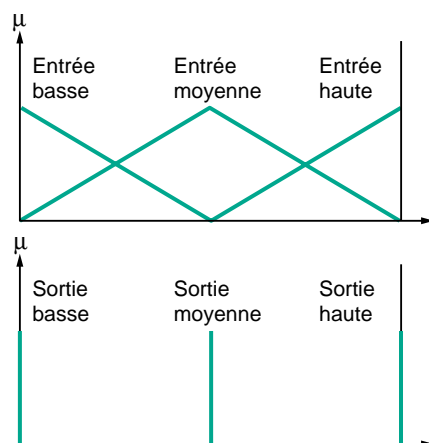


Fig. 24 : simulation d'un terme proportionnel de régulateur.

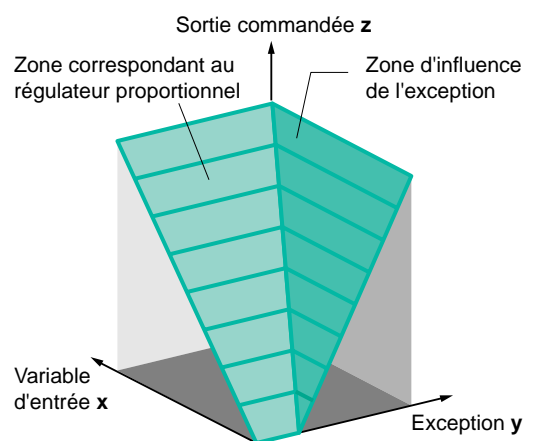


Fig. 25 : introduction d'une exception dans un terme proportionnel.

Le tableau de la **figure 26** présente les règles correspondant à la recirculation. Le terme proportionnel est réalisé à partir de la variable d'entrée

« teneur en NO_x ». Les deux variables d'entrée « teneur O₂ nitri », « teneur O₂ dénitré » définissent une situation d'exception dans la première règle.

SI teneur O ₂ nitri	ET teneur O ₂ dénitré	ET teneur No _x	ALORS quantité recirculation
non basse	supérieure à 0		basse
		basse	basse
		normale	normale
		élevée	élevée

Fig. 26 : tableau de règles de la fonction recirculation.

Voici un autre traitement utilisant la logique floue : une partie des boues qui se déposent dans le bassin aval est recyclée et réinjectée en amont. Le tableau de la **figure 27** présente les règles correspondant au recyclage des boues. La première règle traduit une exception, due à un trop fort débit amont. Dans ces conditions, un recyclage important amènerait une surcharge

accrue de l'installation. L'état d'exception est détecté par la turbidité élevée, car les boues sédimentent peu à cause du débit trop élevé.

Pour mémoire, d'autres fonctions de l'installation utilisent la logique floue :

- injection d'air,
- gestion des boues excédentaires.

SI turbidité de l'eau évacuée	ET quantité écoulee de boues recyclées	ET niveau des boues	ALORS quantité
élevée		bas	basse
	normale	bas	basse
	élevée	bas	normale
	basse	normal	élevée
	normale	normal	normale
	élevée	normal	élevée
	basse	haut	normale
	normale	haut	élevée

Fig. 27 : tableau de règles de la fonction recyclage des boues.

Agro-alimentaire

L'automatisation des lignes de fours industriels pour la cuisson intéresse les fabricants de biscuits autant en France qu'en Allemagne. Pour ce type de régulation, une solution conventionnelle ne peut donner satisfaction à cause des non-linéarités, de la multiplicité et de l'hétérogénéité des paramètres sensibles. La modélisation du processus de cuisson est complexe et incomplète. Cependant, des opérateurs entraînés sont parfaitement à même de contrôler correctement la cuisson en utilisant leurs connaissances empiriques.

L'exemple choisi est celui d'une chaîne de production de biscuits apéritifs.

Un groupe français a fait appel à Schneider qui en collaboration avec l'ENSIA (Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires), a développé une solution automatisée.

Les principales caractéristiques mesurables d'un biscuit sont sa couleur, son humidité et ses dimensions. Elles peuvent être influencées par les variations de qualité des constituants de la pâte, des conditions d'ambiance, de la durée de séjour du biscuit dans le four... Ces influences

doivent être compensées par le réglage des fours et la vitesse de défilement des convoyeurs. La régulation de la qualité de production d'un procédé agro-alimentaire de ce type peut être décomposée selon les étapes fonctionnelles suivantes :

- conditionnement et fusion de données,
- évaluation de grandeurs subjectives (liées à la qualité),
- diagnostic des écarts de qualité,
- prise de décision.

La logique floue permet ici de prendre en compte des grandeurs qualitatives tout au long de cette décomposition et d'utiliser l'expertise « métier » existante. Des bases de règles floues ont été utilisées avec profit, conjointement à d'autres techniques (cf. **fig. 28**).

Fonctions	Techniques associées
Fusion capteurs	Interpolateur « boîte noire » à apprentissage
Evaluation subjective	Classification floue
Diagnostic	Ladder flou
Prise de décision	Base de règles floues

Fig. 28 : fonctions et techniques associées.

■ Evaluation subjective

La plupart des notions définissant la qualité dépendent de plusieurs variables. La qualité est évaluée entre autres par la couleur, qui est tridimensionnelle, d'où l'intérêt de définir des fonctions d'appartenance non booléennes à plusieurs variables. Les algorithmes de classification, à partir des variables d'entrée et de ces fonctions, fournissent les éléments de diagnostic (dessus biscuit bien cuit, trop cuit...).

■ Diagnostic

Le ladder flou a été utilisé pour le diagnostic des écarts de qualité constatés sur les biscuits (cf. **fig. 29**). Le four comporte 3 sections.

Le bilan de fonctionnement de l'ensemble est satisfaisant.

Autres exemples

■ Automatismes

Les correcteurs G.P.C. (Global Predictive Controllers) sont très performants, mais nécessitent le réglage de 4 paramètres N1, N2, Nu, I (horizons de commande, de prédiction, coefficient de pondération). Ce réglage est long et difficile, et nécessite habituellement un expert. La filiale NUM de Schneider développe des commandes numériques et souhaitait utiliser des correcteurs G.P.C. dans ses futures réalisations.

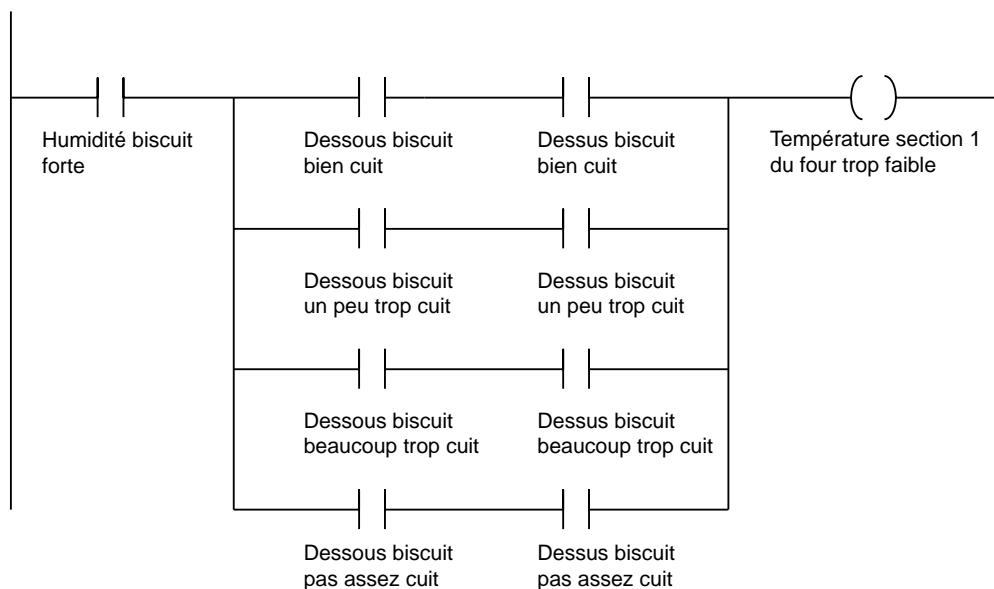


Fig. 29 : ladder flou de diagnostic des écarts de qualité.

Schneider a développé pour elle une méthode de réglage automatique des paramètres de ces correcteurs. Celui-ci est effectué à l'aide d'une base de règles floues. Une vingtaine de règles suffisent pour assurer un réglage rapide et fiable des paramètres. D'autre part, la présence d'un spécialiste de contrôle-commande, difficile à assurer dans le contexte de l'installation d'une commande numérique, n'est plus nécessaire.

■ Automobile

Renault et Peugeot (PSA) annoncent une boîte de vitesse automatique qui grâce à la logique floue, s'adapte au type de conduite de celui qui prend le volant.

■ Cimenteries

La première application industrielle de la logique floue, reprise ensuite par les autres

constructeurs, a été réalisée par la société F.L. Smidth Automation du Danemark dans la régulation des fours à ciment. Ce procédé prend en compte de nombreuses variables, en particulier les influences climatiques sur le four qui mesure plusieurs dizaines de mètres.

■ Electroménager et électronique grand public

Principalement au Japon, de nombreuses applications atteignent le grand public. Par exemple, les caméscopes numériques, ultra-légers, sont très sensibles au bougé. La logique floue pilote le système électronique anti-bougé de ces appareils.

6 Conclusion

■ Classée parmi les techniques de l'intelligence artificielle, la logique floue permet de modéliser puis de remplacer l'expertise de conduite de processus, expertise en provenance du concepteur ou de l'utilisateur.

■ Outil d'amélioration de la qualité, de la productivité, elle procure des avantages concurrentiels à l'industriel en quête d'optimisation technico-économique.

■ Ce Cahier Technique a montré dans quels domaines cette approche intéressante s'appliquait avec profit.

■ Grâce à des automates adaptés et des outils conviviaux, la logique floue est maintenant accessible à tout automaticien désireux d'accroître le champ de ses compétences et la performance de ses réalisations. De tels outils sont disponibles dans l'environnement de développement de certains automates programmables (cf. **fig. 30**).

Des possibilités d'évaluations simples sont offertes par ces outils.

■ Une évaluation limitée à la mise en concurrence avec les autres outils traditionnels du contrôle n'a pas d'intérêt : ces outils, tels les régulateurs PID, gardent leur place et leurs terrains d'applications.

■ La logique floue a ses domaines de prédilection où elle fait merveille, dès qu'entrent en jeu une expertise, une prise de décision nuancée, la prise en compte de phénomènes non-linéaires, de paramètres subjectifs, voire des facteurs de décision contradictoires. Un contact avec un spécialiste Schneider permettra à un utilisateur ou un concepteur de trouver réponse au cas par cas, à sa légitime interrogation :

« Quels avantages décisifs la logique floue apporterait-elle dans mon application ? »

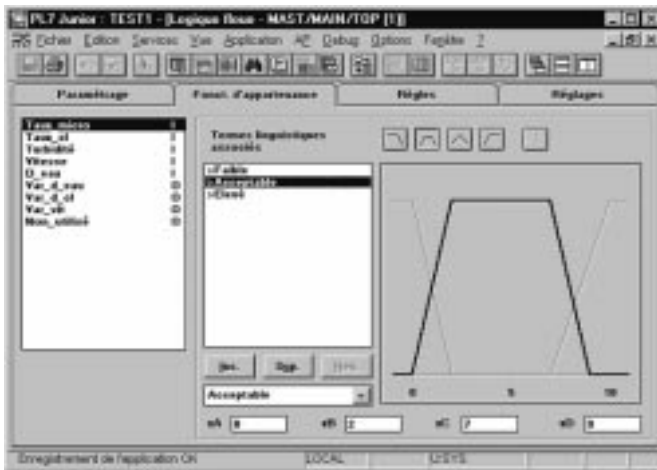
a - paramétrage du module de logique floue



c - écriture des règles



b - définition des fonctions d'appartenance



d - simulation - validation



Fig. 30 : pour la logique floue, les automates Schneider disposent d'outils de développement conviviaux sur PC.

Opérateurs entre ensembles flous

Le tableau de la **figure 31** présente les différents opérateurs de ZADEH.

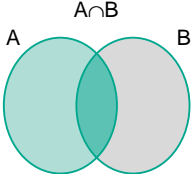
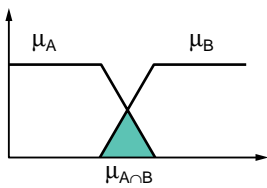
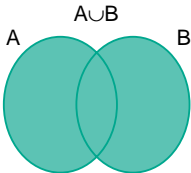
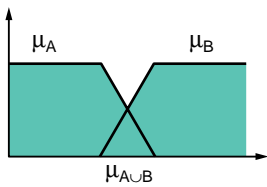
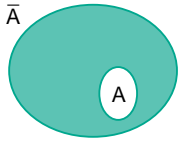
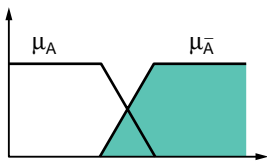
		Opérateur de ZADEH	Opération logique	
Intersection		$\mu_{A \cap B} = \text{MIN} (\mu_A, \mu_B)$	ET	
Union		$\mu_{A \cup B} = \text{MAX} (\mu_A, \mu_B)$	OU	
Négation		$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$	NON	

Fig. 31 : opérateurs entre ensembles flous

Les fonctions d'appartenance de sortie singletons

Les fonctions d'appartenance « singletons » sont souvent utilisées comme fonctions d'appartenance de sortie pour les règles floues. En effet, elles permettent le même effet d'interpolation entre les règles que dans le cas des fonctions d'appartenance triangulaires par exemple, pour des calculs beaucoup plus simples. Il n'est pas nécessaire de calculer le maximum des fonctions d'appartenance de sortie (agrégation) et le centre de gravité est également simplifié. La **figure 32** illustre ce calcul.

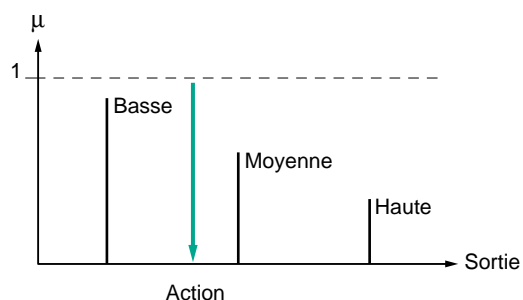


Fig. 32 : défuzzification de fonctions d'appartenance singletons.

Les inférences floues : Implication floue et Modus Ponens Généralisé

Comme le montre la **figure 33**, le mécanisme classique d'inférence « par l'avant » ou « modus ponens » consiste à partir de règles, aussi appelées implications et d'un mécanisme de déduction (le modus ponens) à déduire des conclusions à partir des faits observés.

L'implication « $A \Rightarrow B$ » est considérée vraie tant qu'elle n'est pas infirmée (A vrai et B faux) : voir **figure 34**. Le modus ponens, sachant si l'implication est vraie ou fautive, permet de déduire une conclusion B' à partir d'une observation A'.

Le même principe théorique peut être généralisé en logique floue. Le schéma général est donné par la **figure 35**.

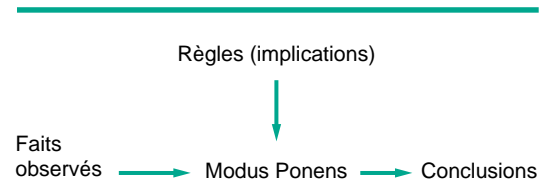


Fig. 33 : principe de l'inférence par l'avant.

		A				A'	
A ⇒ B		0	1	B'		0	1
	B	0	1	0	0	0	0
		1	1	1	1	0	1
Implication				Modus Ponens			

Fig. 34 : principe de l'implication et du Modus Ponens.

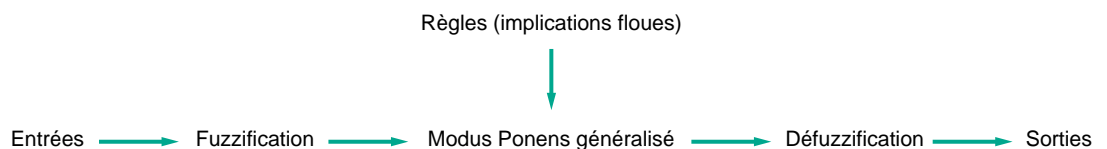


Fig. 35 : principe des inférences floues.

Le mécanisme généralisant l'implication est appelé « implication floue ». Il existe divers opérateurs d'implication floue, dont ceux mentionnés ci-dessous :

$$\text{MAMDANI} : \mu_{A \Rightarrow B} = \text{MIN} (\mu_A, \mu_B)$$

$$\text{LARSEN} : \mu_{A \Rightarrow B} = \mu_A \cdot \mu_B$$

$$\text{LUKASIEWICZ} : \mu_{A \Rightarrow B} = \text{MIN} (1, 1 - \mu_A + \mu_B)$$

L'implication floue fonctionne comme l'implication classique, A et B étant des ensembles flous.

Le mécanisme généralisant le modus ponens est appelé « modus ponens généralisé ». Il obéit à la formule qui suit et permet de déterminer un ensemble flou conclusion B'. Le plus souvent, l'opérateur T utilisé est le Minimum (appelé opérateur de Zadeh).

$$\mu_{B'}(y) = \text{MAX}_x (T(\mu_{A'}(x), \mu_{A \Rightarrow B}(x, y)))$$

où T : opérateur de modus ponens (t - norme),

L'opérateur de Lukasiewicz se comporte comme l'implication classique quand on se restreint à des valeurs booléennes. Ce n'est pas le cas des opérateurs de Larsen et Mamdani, utilisés dans les bases de règles de Mamdani. Ces opérateurs sont les plus largement utilisés car :

- on constate leur bonne robustesse dans les applications.

- les calculs sont considérablement simplifiés et permettent une interprétation graphique simple (voir chap. 2.4). Les calculs sur l'entrée x et la sortie y sont découplés, comme le montre la formule suivante :

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \text{MAX}_x (\text{Min} (\mu_{A'}(x), \mu_{A \Rightarrow B}(x, y))) \\ &= \text{Min} (\mu_{B'}(y), \text{MAX}_x (\text{Min} (\mu_{A'}(x), \mu_{A \Rightarrow B}(x, y))) \end{aligned}$$

Bibliographie

Normes

IEC 61131-7 Programmable Controllers part 7
Fuzzy Control Programming.

Ouvrages divers

■ Fuzzy models for pattern recognition, James C. BEZDEK & Sanker K. PAL, IEEE Press, 1992.

■ Fuzzy sets and systems : Theory and applications, D. DUBOIS, H. PRADE, Academic Press 1980, Mathematics in Sciences and Engineering vol. 144.

■ Evaluation subjective ; méthodes, applications et enjeux, les cahiers des clubs CRIN, club CRIN logique floue.

■ A.I. and expert system myths, legends and facts, M.S. FOX, IEEE Expert 02/90, pp 8-20, 29 réf.

■ La logique floue et ses applications, Bernadette BOUCHON-MEUNIER, Addison-Wesley, 1995.

Internet

■ <http://pages.pratique.fr/~bmantel/pages/logfloue.html> (simple et didactique)

■ http://www.ipl.fr/ecam/laborato/logique_floue.html (brève présentation)

■ <http://www.cs.nthu.edu.tw/~jang/nfsc.htm> (bibliographie, liens vers ressources en anglais)

■ <http://maxwell.univalle.edu.co/~paulo/fuzzy/bibliografia.html> (bibliographie)

■ <http://mijuno.larc.nasa.gov/dfc/tec/fuzsysB.html> (bibliographie)