

Débuter avec FisPro

fispro@supagro.inra.fr



FisPro (*Fuzzy Inference System Professional*) permet de créer des systèmes d'inférence floue, et de les utiliser à des fins de raisonnement, en particulier pour la simulation d'un système physique ou biologique. Les systèmes d'inférence floue sont décrits brièvement dans le glossaire de logique floue donné dans ce document. Ils fonctionnent à partir de règles de raisonnement floues, qui ont l'avantage de gérer la progressivité des phénomènes.

L'implémentation faite dans FisPro permet tout d'abord de créer directement des systèmes à partir de la connaissance experte d'un domaine, par exemple en œnologie. Cette démarche est illustrée par un exemple donné dans le guide *Débuter avec FisPro*.

FisPro permet aussi de construire entièrement un système d'inférence floue à partir des données numériques du problème que l'on souhaite modéliser. Beaucoup de méthodes d'apprentissage automatique conduisent malheureusement à des systèmes de type "boîte noire". Dans FisPro, pour que l'utilisateur puisse comprendre le fonctionnement du système, des contraintes sont imposées aux algorithmes pour rendre les règles de raisonnement interprétables ([?]). Cette démarche novatrice constitue une des originalités du logiciel. Quelques exemples sont présentés dans le guide *Apprentissage avec FisPro*.

Les deux approches, écriture des règles par l'expert et apprentissage automatique, peuvent être combinées pour créer des systèmes plus complets et performants. FisPro intègre des outils à vocation pédagogique, pour illustrer le mécanisme de raisonnement, et d'autres permettant de mesurer la performance d'un système sur un jeu de données.

Ce logiciel est formé de deux parties distinctes : une bibliothèque de fonctions, écrite en C++, qui peut être utilisée de manière autonome et une interface utilis-

teur, écrite en Java, qui en implémente les principales fonctionnalités. Portable, il peut s'exécuter sur la majorité des plates-formes informatiques existantes.

L'utilisateur non familier avec la logique floue pourra commencer par une lecture du glossaire.

Les références suivantes sont conseillées pour une bonne prise en main de FisPro :

- Learning interpretable fuzzy inference systems with FisPro
Information Sciences, 181 :4409-4427, 2011.
- Fuzzy inference systems : An integrated modeling environment for collaboration between expert knowledge and data using FisPro
Expert Systems with Applications 39 :8744-8755, 2012.

D'autres publications, relatives aux méthodes ou bien à des applications conduites avec *FisPro*, sont disponibles dans la page *Publications*.

Auteurs

- Conception et implémentation C++ : Serge GUILLAUME, Irstea, UMR ITAP
(<http://ser.gui.free.fr/homepage>),
Brigitte CHARNO MORDIC, INRA, UMR MISTEA (<http://www.inra.fr>)
- Interface java : Jean-Luc LABELLE, Irstea, UMR ITAP
- Contributions :
 - C++
 - François OLIVIER, module optimisation, d'après l'ouvrage de Pierre-Yves GLORENNEC, *Algorithmes d'apprentissage pour systèmes d'inférence floue*, paru aux Editions Hermès en 1999 ;
 - Sébastien DESTERCKE, induction de règles par moindres carrés (ols)
 - Vincent THERRY, avec l'appui de la société Envilys, chaînage de systèmes (superfis)
 - Russel STANDISH, version optimisée et parallélisable (standard OPENMP)
 - Hazaël JONES, conception de la partie *règles implicatives*
 - Lydie DESPERBEN, implémentation C++ de la partie *règles implicatives*
 - Java
 - Pierre-Marie BOYER, interface JNI (Java-C++) ;
 - Mathieu GRELIER, visualisation des données (Table, 2D et 3D) ;
 - Anne TIREAU, interface java de la partie *règles implicatives*.
 - Communication
 - Jean-Michel FATOU, icônes de FisPro et conception graphique du site WEB

- Moacir Jr PEDROSO, traduction de l'interface en portugais
- Juan Luis CORTI, traduction de *Débuter avec FisPro* en espagnol

Remerciements

Le développement initial de FisPro a bénéficié du soutien de fonds publics, Etat français et région Languedoc-Roussillon, dans le cadre d'un projet de recherche, COST 2000-012, coordonné par l'association TRANSFERTS LR (<http://www.transferts-lr.org>) et dont le partenaire industriel était la cave coopérative "La Malepère", Arzens, Aude.



FisPro

est un logiciel *open source*, disponible sur le site

<http://www.inra.fr/mia/M/fispro/>

Notions élémentaires

Un système est aussi appelé SIF, pour système d'inférence floue.

On utilisera le terme SEF pour sous-ensemble flou (voir glossaire de logique floue, section 3).

Au démarrage de FisPro, aucun système n'est présent.

Vous pouvez ouvrir un système existant, ou en créer un nouveau, soit à partir de données, soit de toutes pièces.

Ce petit guide donne la démarche à suivre dans ce dernier cas, adapté à l'entrée de règles expertes.

Remarques :

- Pour la saisie des nombres, le séparateur décimal est la virgule (,).
- Les modifications, ajout d'entrée, de sortie ou de SEF, sont prises en compte immédiatement dans le SIF. Les fenêtres intermédiaires peuvent être fermées sans perte de données.
- Les options non disponibles en fonction du contexte sont grisées dans les menus.
- La définition experte ne fait intervenir que le menu *SIF*. Le menu *Apprentissage* est pour d'autres usages (induction automatique).
- Le menu *Données* permet d'ouvrir un fichier de données, de les visualiser, et d'inférer sur l'ensemble du fichier.

Rappel :

L'option *Langue* du menu Options permet l'affichage des menus et des messages dans la langue de votre choix.

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Créer un système simple | 6 |
| 1.1 | Définir une entrée | 6 |
| 1.2 | Modifier une entrée ou une sortie | 7 |
| 1.3 | Définir une sortie | 8 |
| 1.4 | Définir une règle | 8 |
| 1.5 | Inférer | 8 |
| 2 | Un système plus complexe | 10 |
| 2.1 | La variable rendement | 10 |
| 2.2 | Générer les règles automatiquement | 12 |
| 2.3 | Visualiser l'inférence | 12 |
| 3 | Petit glossaire de la logique floue | 15 |

1 Créer un système simple

L'exemple choisi crée un système très simple : 1 entrée, 1 sortie et 3 règles.

L'entrée est le degré du vin, la sortie est son prix. Les règles font évoluer le prix en fonction du degré.

- Commencer par choisir l'option *Nouveau* du menu *Sif*
- Le nom par défaut *Nouveau SIF* s'affiche dans le champ *Nom*. Il est modifiable par simple saisie. Donnez-lui le nom *coop*.
- La conjonction est l'opérateur de combinaison des prémisses de la règle. C'est par défaut le produit.

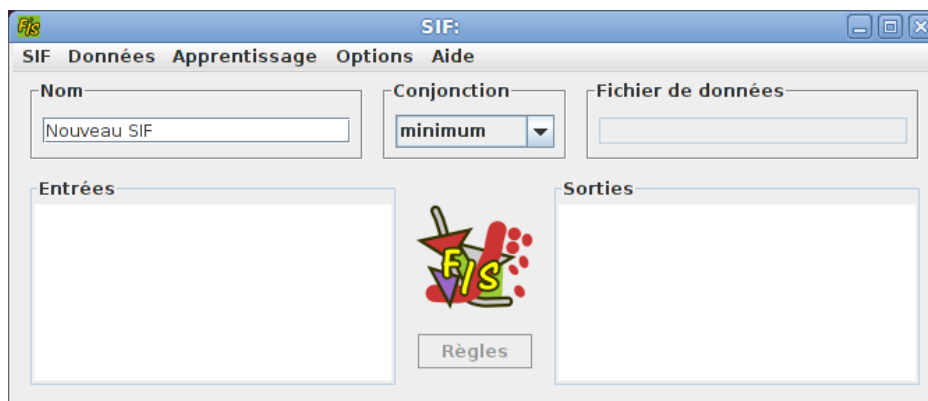


FIGURE 1 – Fenêtre principale de FisPro

1.1 Définir une entrée

Pour ajouter une entrée, utiliser soit l'option *Nouvelle Entrée* du menu *SIF*, soit un clic droit sur la zone *Entrées* de la fenêtre principale. La fenêtre *Entrée* apparaît.

Une entrée est caractérisée par son domaine, et sa partition floue, c'est-à-dire les sous-ensembles flous (SEF) qui la composent.

Elle peut être active (par défaut) ou inactive.

Donnez-lui le nom *Degré*.

- Le domaine de variation d'une entrée est par défaut $[0,1]$.
Pour le changer, choisir le menu *Domaine* de la fenêtre *Entrée*, et entrer les nouvelles valeurs du domaine de variation : 9 et 14.
- La méthode la plus rapide, dans ce cas, pour définir la partition est l'option *Grille irrégulière* du menu *SEF*, avec le nombre de SEF correspondant à la finesse voulue pour les labels linguistiques (3 par défaut). Cette option

permet de donner la position des sommets de chaque SEF : choisir 11,5, 12 et 12,5.

- Les SEF s'affichent dans la partie inférieure de la fenêtre : demi-trapèzes aux extrémités du domaine, et triangles ailleurs.
 - Pour la clarté du SIF, les noms des SEF sont importants, car ils apparaissent dans les règles.
 - SEF 1 : nom *Faible*, sommets 9, 11,5 et 12
 - SEF 2 : nom *Moyen*, sommets 11,5, 12 et 12,5
 - SEF 3 : nom *Elevé*, sommets 12, 12,5 et 14
- Vous obtenez la partition ci-dessous.

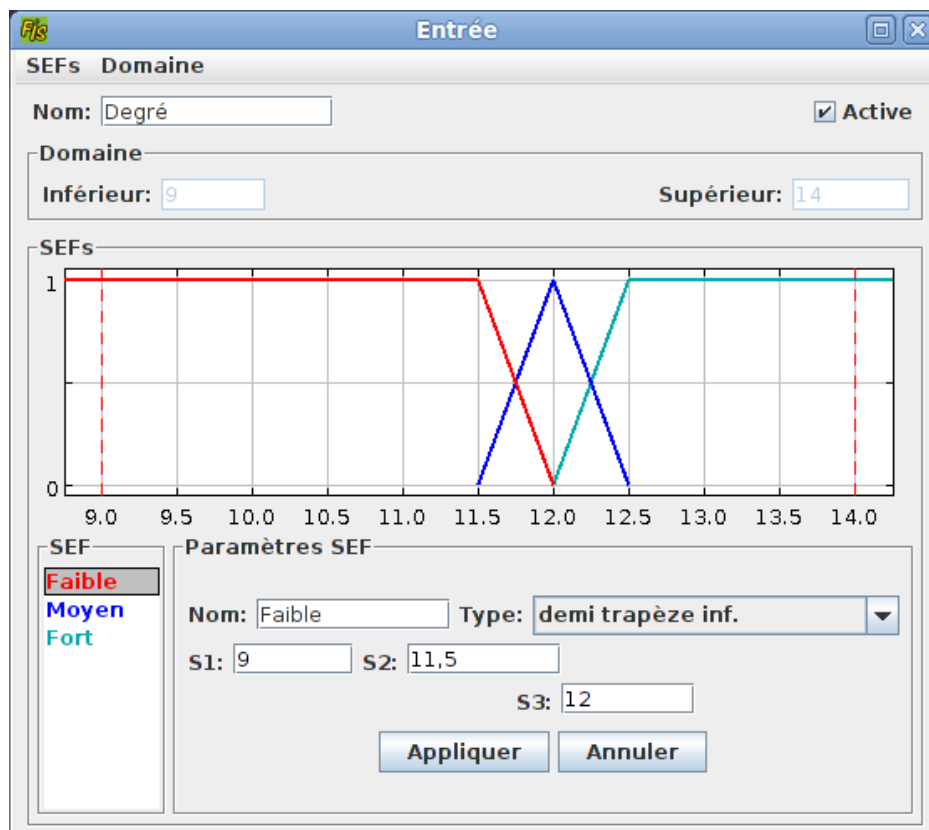


FIGURE 2 – Définition d'une entrée dans FisPro

1.2 Modifier une entrée ou une sortie

Pour modifier une entrée ou une sortie, double cliquer sur son nom dans la fenêtre principale.

1.3 Définir une sortie

Pour ajouter une sortie, utiliser soit l'option *Nouvelle Sortie* du menu SIF, soit un clic droit sur la zone *Sortie* de la fenêtre principale. La fenêtre *Sortie* apparaît.

Donnez lui le nom *Prix*. Une sortie est caractérisée avant tout par son domaine, et sa nature : sortie nette ou floue.

La nature est liée au raisonnement mis en oeuvre dans le SIF.

- Avec une sortie nette, la conclusion des règles peut être une valeur numérique quelconque.
- Avec une sortie floue, la conclusion des règles est le label linguistique d'un SEF, par exemple *Petit*, *Moyen* ou *Grand*.

Indépendamment du type de sortie, le résultat de l'inférence est une valeur numérique.

Autres paramètres :

- Valeur par défaut : c'est la valeur que prendra le résultat de l'inférence, pour cette sortie, au cas où aucune règle n'est activée.
- Défuzzification et disjonction : choix liés à la façon d'agréger les conclusions des règles (voir 3).
- classif : cocher cette case pour arrondir le résultat de l'inférence à la classe (valeur discrète) la plus proche.

Les classes possibles sont limitées aux valeurs des conclusions des règles.

Si la sortie est floue, il faut en plus définir sa partition floue, comme pour une entrée floue.

1.4 Définir une règle

Pour créer les règles, cliquer sur la case *Règles* de la fenêtre principale. La fenêtre *Règles* s'affiche.

Dans cette fenêtre, pour ajouter une règle, utiliser soit l'option *Nouvelle Règle* du menu SIF, soit un clic droit sur la colonne *Règle*.

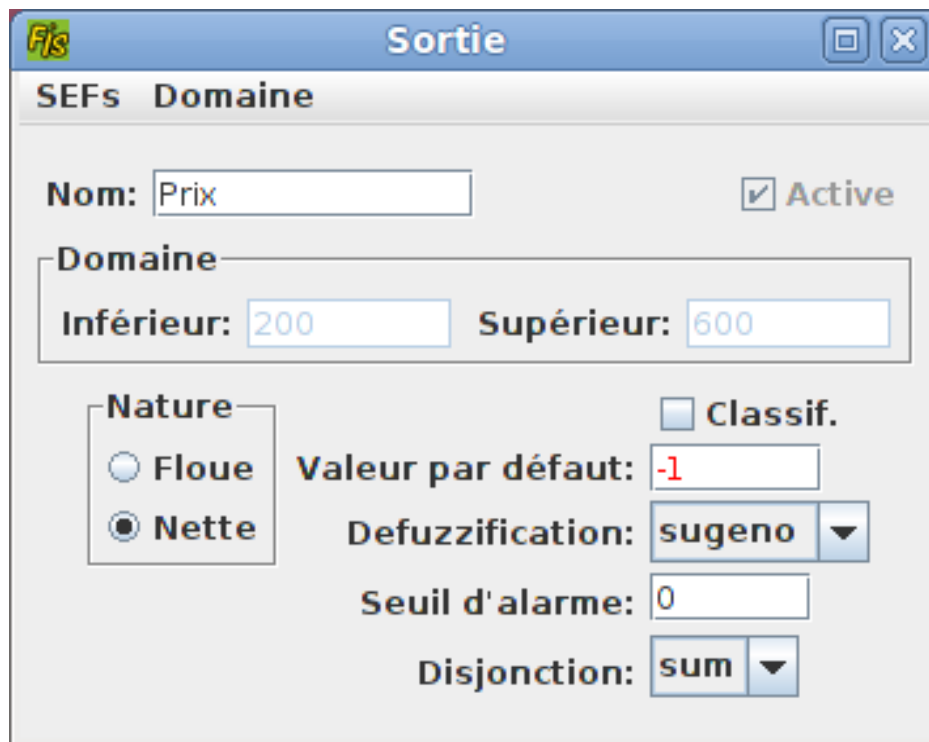
Cliquer successivement sur les colonnes représentant les variables, pour choisir les labels qui interviendront dans la règle, ou pour entrer la valeur numérique (sortie nette).

1.5 Inférer

L'option *Inférer* du menu SIF permet d'explorer le fonctionnement du système.

Le raisonnement à base de règles floues est représenté graphiquement.

Les valeurs des variables d'entrée sont saisies manuellement (déplacement du curseur ou saisie de valeur).



Sortie

SEFs **Domaine**

Nom: ☒ Active

Domaine

Inférieur: Supérieur:

Nature

☐ Floue ☒ Nette

☐ Classif.

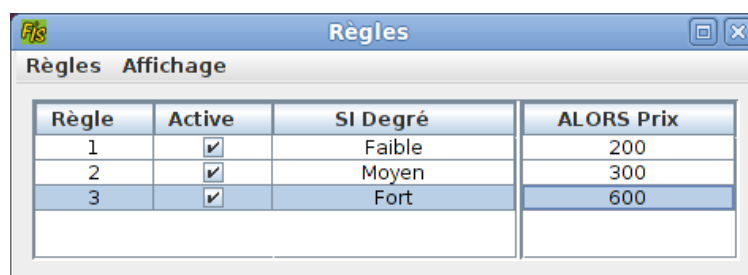
Valeur par défaut:

Defuzzification: ▼

Seuil d'alarme:

Disjonction: ▼

FIGURE 3 – Définition d’une sortie dans FisPro



Règles

Règles **Affichage**

| Règle | Active | SI Degré | ALORS Prix |
|-------|-------------------------------------|----------|------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | Faible | 200 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | Moyen | 300 |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | Fort | 600 |

FIGURE 4 – Définition de règles dans FisPro

Le système affiche la valeur inférée pour la sortie, avec plusieurs informations intermédiaires permettant de comprendre les étapes du raisonnement flou :

Pour chaque règle :

- degré d'appartenance de la valeur à chaque SEF présent dans les prémisses de la règle, visualisé comme un taux de remplissage du SEF
- degré de vérité de la règle.

Ce degré de vérité est, dans notre exemple, égal au degré d'appartenance précédent, car le système ne comporte qu'une seule entrée. Dans les cas plus complexes, ce degré est obtenu par la combinaison des SEF des prémisses.

Il est visualisé sous forme de valeur numérique si la sortie est nette, ou comme le taux de remplissage du SEF de conclusion, si la sortie est floue.

Pour chaque sortie :

- La valeur inférée est affichée en haut à droite de la fenêtre, 480 ici.

La sortie *Prix* étant nette, avec une défuzzification de type Sugeno et une agrégation de type somme, elle s'obtient par une simple moyenne des conclusions des règles, pondérées par les degrés de vérité des règles, affichés à droite. Les conclusions des règles sont indiquées entre parenthèses.

Pour l'ensemble des degrés compris dans le domaine de l'entrée *Degré*, donc entre 9 et 14, on peut obtenir le prix correspondant. La progression du prix est continue, grâce aux capacités d'interpolation du système.

2 Un système plus complexe

Nous allons rendre plus réaliste l'exemple précédent, en ajoutant une variable et en modifiant les règles pour qu'elles tiennent compte des deux variables.

L'entrée supplémentaire est le rendement de la parcelle.

L'objectif est de reproduire le système de raisonnement synthétisé sur la figure. La rémunération doit baisser quand le rendement augmente, et doit monter avec le degré. En-dessous d'un certain degré, ou bien au-dessus d'un rendement donné, elle est limitée d'office.

2.1 La variable rendement

Pour ajouter la variable *Rendement*, procéder comme indiqué à la section *Définir une entrée* (1.1).

Fixer le domaine à [50,100], et construire une grille régulière de 4 SEF.

Vous devez obtenir la partition de la figure 7

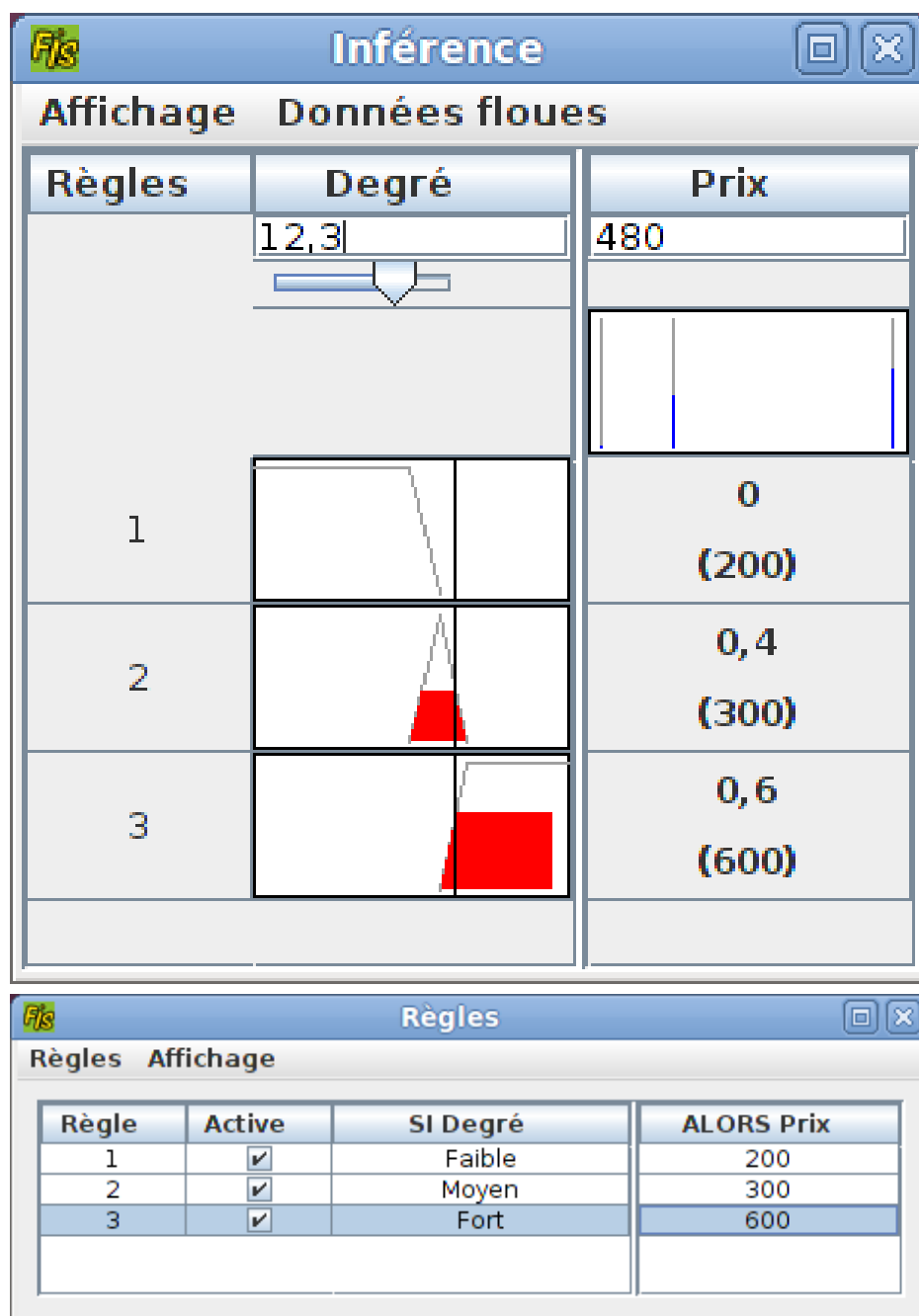


FIGURE 5 – Inférence floue dans FisPro

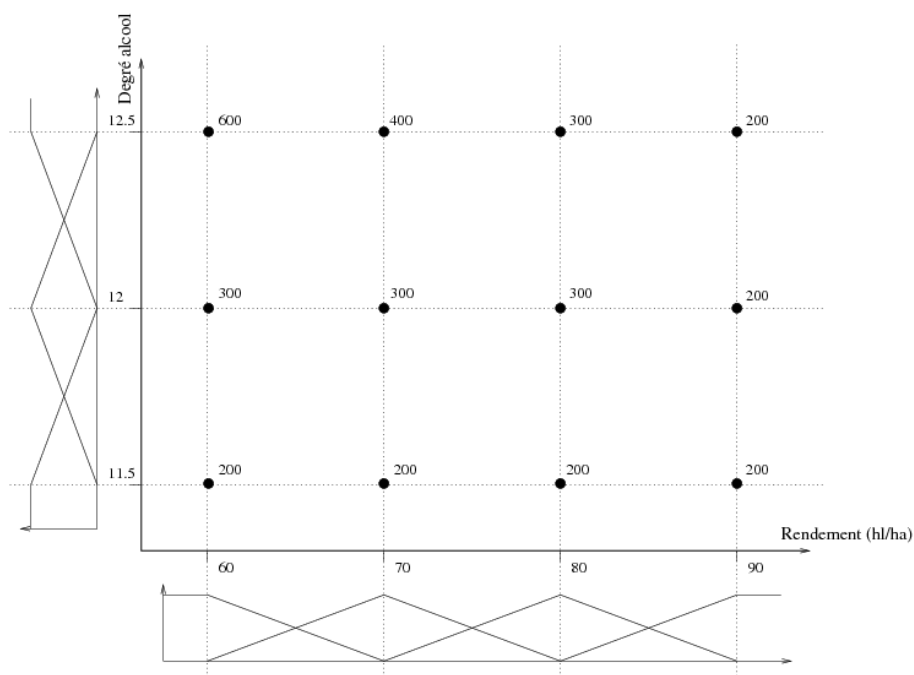


FIGURE 6 – Rémunération des coopérants

2.2 Générer les règles automatiquement

Nous souhaitons écrire le système de règles de la figure 8.

La façon la plus simple de le générer est d'utiliser l'option *Générer règles* du menu *SIF*.

Cette option génère les règles correspondant à toutes les combinaisons possibles des SEF des variables d'entrée : *Degré* et *Rendement*, soit $4 \times 3 = 12$ règles dans notre cas.

Les conclusions sont initialisées avec la valeur 1.

Commencez par simplifier les règles relatives au degré faible et au rendement très élevé, en éliminant les règles inutiles, puis entrez les conclusions voulues dans la colonne du Prix, afin d'obtenir le système de règles ci-dessus.

2.3 Visualiser l'inférence

Utilisez l'option *Inférer* du menu *SIF*, et changez tour à tour les valeurs des deux variables.

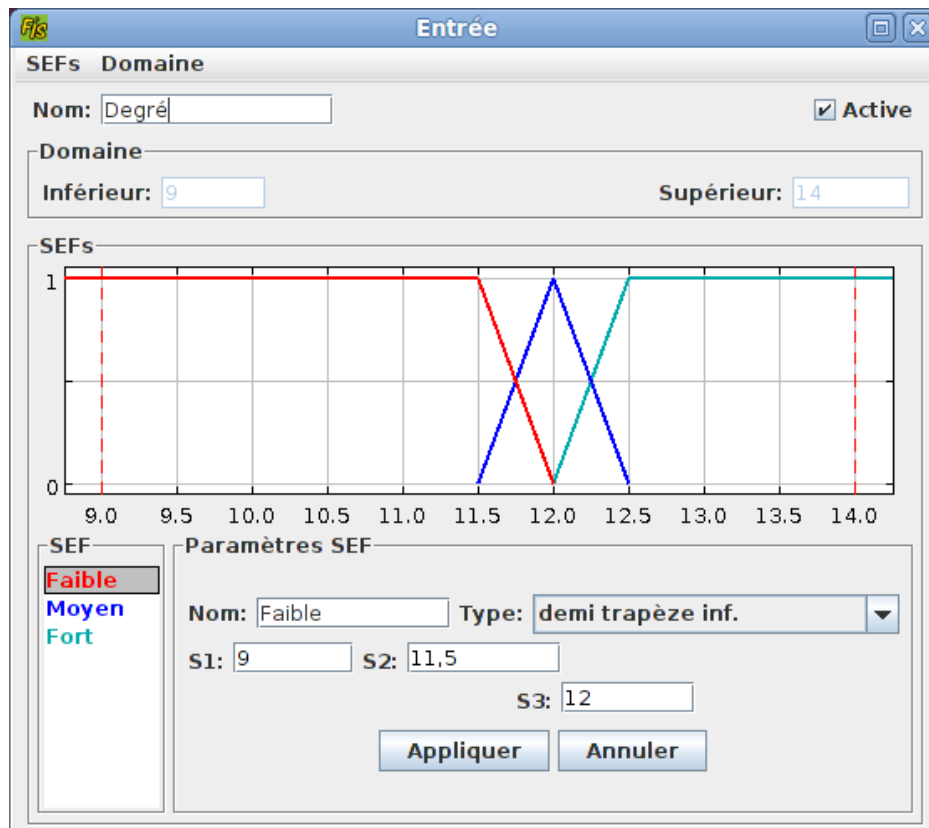


FIGURE 7 – Sortie

Règles

Règles Affichage

| Règle | Active | SI Degré | ET Rendement | ALORS Prix |
|-------|-------------------------------------|----------|--------------|------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | Faible | | 200 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | Moyen | Faible | 300 |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | Moyen | Moyen | 300 |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | Moyen | Elevé | 300 |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | Fort | Faible | 600 |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> | Fort | Moyen | 400 |
| 7 | <input checked="" type="checkbox"/> | Fort | Elevé | 300 |
| 8 | <input checked="" type="checkbox"/> | | Très élevé | 200 |

FIGURE 8 – Base de règles

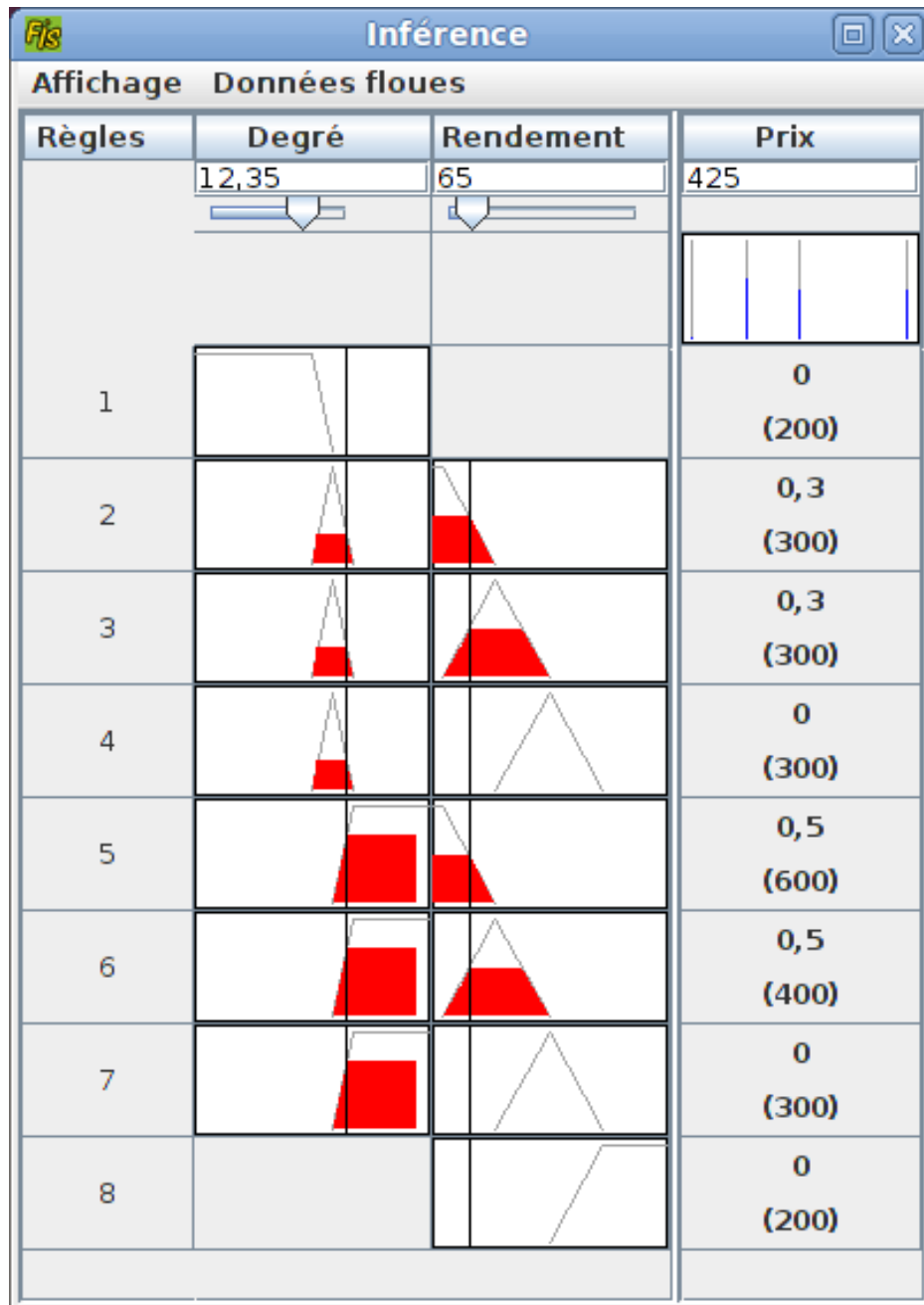


FIGURE 9 – Inférence sur la rémunération des coopérants

3 Petit glossaire de la logique floue

- Ensemble flou : Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance. Un point de l'univers, x , appartient à un ensemble, A avec un degré d'appartenance, $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$.

La figure 10 montre un ensemble de forme triangulaire.

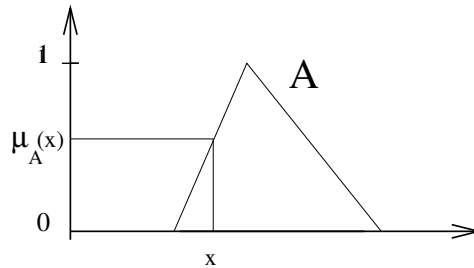


FIGURE 10 – Un ensemble flou de forme triangulaire

- Prototype d'un ensemble : un point est un prototype d'un ensemble flou si son degré d'appartenance à cet ensemble vaut un.
- Opérateurs :
 - *ET* : opérateur de conjonction, noté \wedge , les plus employés sont le minimum et le produit.
 - *OU* : opérateur de disjonction, les plus employés sont le maximum et la somme.
 - *est* : la relation x est A est quantifiée par le degré d'appartenance de la valeur x au sous-ensemble flou A .
- Partitionnement : Le découpage du domaine de définition d'une variable en sous-ensembles flous est appelé partitionnement. Ces ensembles sont notés A_1, A_2, \dots
- Partition floue forte : La partition de la variable X_i sera appelée une partition floue forte si $\forall x \in X_i, \sum_j \mu_{A_j^i}(x) = 1$.
- Exemple : un exemple ou individu est formé d'un vecteur d'entrée x de dimension p et, dans le cas général, d'un vecteur y , de dimension q .

– Règle floue : Une règle floue est de la forme *Si je rencontre telle situation Alors j'en tire telle conclusion*. La situation, appelée prémisse ou antécédent de la règle, est définie par une combinaison de relations de la forme $x \text{ est } A$ pour chacune des composantes du vecteur d'entrée. La partie conclusion de la règle est appelée conséquence, ou encore simplement conclusion.

– Les règles sont de deux types :

1. Mamdani : Une règle floue de type Mamdani, dont la conclusion est un ensemble flou, s'écrit :

$$SI \ x_1 \text{ est } A_1^i \ ET \ \dots \ ET \ x_p \text{ est } A_p^i \ ALORS \ y_1 \text{ est } C_1^i \ \dots \ ET \ y_q \text{ est } C_q^i$$

où A_j^i et C_j^i sont des ensembles flous qui définissent le partitionnement des espaces d'entrée et de sortie.

2. Takagi-Sugeno : Dans le modèle de Sugeno la conclusion de la règle est nette. Celle de la règle i pour la sortie j est calculée comme une fonction linéaire des entrées : $y_j^i = b_{j0}^i + b_{j1}^i x_1 + b_{j2}^i x_2 + \dots + b_{jp}^i x_p$, également notée : $y_j^i = f_j^i(x)$.

– Règle incomplète : Une règle floue sera dite incomplète si sa prémisse est définie par un sous-ensemble des variables d'entrée seulement. La règle, $SI \ x_2 \text{ est } A_2^1 \ ALORS \ y \text{ est } C_2$, est incomplète car la variable x_1 n'intervient pas dans sa définition. Les règles formulées par les experts sont principalement des règles incomplètes. Formellement, une règle incomplète est définie par une combinaison implicite de connecteurs logiques *ET* et *OU* opérant sur l'ensemble des variables. Si l'univers de la variable x_1 est découpée en 3 sous-ensembles flous, la règle incomplète ci-dessus peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$SI \ (x_1 \text{ est } A_1^1 \ OU \ x_1 \text{ est } A_1^2 \ OU \ x_1 \text{ est } A_1^3) \ ET \ x_2 \text{ est } A_2^1 \ ALORS \ y \text{ est } C_2.$$

- Degré de vérité : Pour une règle donnée, i , son degré de vérité pour un exemple, également appelé poids, et noté w_i , résulte d'une opération de conjonction des éléments de la prémisse : $w_i = \mu_{A_1^i}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{A_p^i}(x_p)$, où $\mu_{A_j^i}(x_j)$ est le degré d'appartenance de la valeur x_j à l'ensemble flou A_j^i .
- Activité : Un exemple active une règle, ou bien une règle active un exemple, si le degré de vérité de la règle pour l'exemple est non nul.

- Prototype d’une règle : un exemple est un prototype d’une règle si son degré de vérité pour cette règle vaut un.
- Système d’inférence floue (SIF) : Un système d’inférence floue est formé de trois blocs comme indiqué sur la figure 11. Le premier, l’étage de fuzzification transforme les valeurs numériques en degrés d’appartenance aux différents ensembles flous de la partition. Le second bloc est le moteur d’inférence, constitué de l’ensemble des règles. Enfin, un étage de défuzzification permet, si nécessaire, d’inférer une valeur nette, utilisable en commande par exemple, à partir du résultat de l’agrégation des règles. Le nombre de règles du système est noté r .

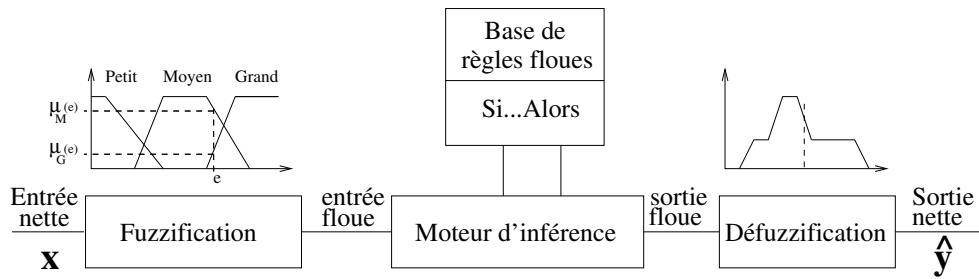


FIGURE 11 – Un système d’inférence floue

- Sortie inférée par le système : la valeur inférée, pour une entrée donnée, dépend bien entendu de la base de règles mais aussi des opérateurs d’agrégation et de défuzzification.

L’agrégation des règles est disjonctive, signifiant que chaque règle ouvre une nouvelle possibilité pour la sortie. Les deux principaux opérateurs sont le **maximum** et la **somme**. Les niveaux d’activation résultants sont, r étant le nombre de règles et m le nombre de termes linguistiques de la partition de la variable de sortie :

- max : $\forall j = 1, \dots, m$

$$W^j = \left\{ \max_r (w^r(x)) \mid C^r = j \right\}$$
- sum : $\forall j = 1, \dots, m$

$$W^j = \min \left(1, \left\{ \sum_r (w^r(x)) \mid C^r = j \right\} \right)$$

Plusieurs opérateurs de défuzzification sont disponibles. La figure 12 illustre la défuzzification pour un représentant des deux principales familles.

Notons \hat{y}_i la valeur inférée pour l’exemple i .

Avec la **moyenne des maxima**, la sortie vaut $\hat{y}_i = mm$. Cet opérateur considère seulement le segment correspondant au niveau d’activation maximum.

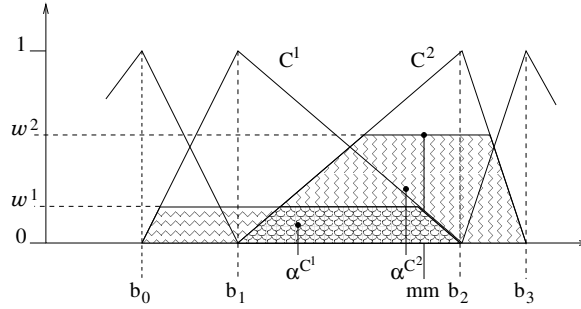


FIGURE 12 – Un exemple de défuzzification

Aussi, il travaille principalement au sein d'un terme linguistique. D'autres valeurs que la moyenne sont possibles, comme le minimum ou le maximum des maxima.

L'opérateur de **pondération par les aires** favorise l'interpolation entre termes linguistiques. La sortie est calculée suivant la formule :

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^m \alpha^{C^j} \text{area}(C_\alpha^j)}{\sum_{j=1}^m \text{area}(C_\alpha^j)} \quad (1)$$

où m est le nombre de sous-ensembles flous dans la partition, $\alpha = W^j$ est le niveau d'activation résultant de l'ensemble j , α^{C^j} est l'abscisse du centre de gravité de C_α^j , et C_α^j un nouvel ensemble flou, défini à partir de C^j comme :

$$\mu^{C_\alpha^j}(x_i) = \begin{cases} \mu(x_i) & \text{si } \mu^{C^j}(x_i) \leq \alpha \\ \alpha & \text{sinon} \end{cases}$$

- Apprentissage supervisé : L'apprentissage supervisé consiste à induire des relations entre les entrées et la sortie, de dimension un, d'un système à partir d'un ensemble d'exemples. L'ensemble d'apprentissage comprend n exemples.
- Erreur quadratique moyenne : notée EQM , elle est calculée comme :

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\hat{y}_i - y_i\|^2$$

- Erreur Moyenne : Contrairement à la précédente, elle est homogène à une mesure. Son expression est :

$$ErM = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \|\hat{y}_i - y_i\|^2} = \frac{\sqrt{EQM}}{\sqrt{n}}$$

Références

- [1] L. A. Zadeh. Is there a need for fuzzy logic ? *Information Sciences*, 178 (13) :2751–2856, 2008.