

CONTRÔLEUR DE STORES INTELLIGENT A LOGIQUE FLOUE

TITRE : CONTRÔLEUR DE STORES INTELLIGENT A LOGIQUE FLOUE

Temps de préparation : 2h15

Temps de présentation devant le jury : 10 minutes

Entretien avec le jury : 10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte :

Document principal : CONTRÔLEUR DE STORES INTELLIGENT A LOGIQUE FLOUE à partir d'un projet de recherche du LESO (EPLF) http://lesowww.epfl.ch/anglais/Leso_a_recherche_IBT_delta.html

Document complémentaire : Pour y voir plus clair dans la logique floue de Bernard Mantel : <http://perso.club-internet.fr/bmantel/pages/logfloue/logfloue00.html>

Total : 13 pages.

Travail suggéré au candidat : En s'appuyant sur les exemples, préciser l'intérêt de la logique floue

.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

-Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable

-Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury

DELTA, UN CONTRÔLEUR DE STORES INTELLIGENT A LOGIQUE FLOUE

Nicolas MOREL, Manuel BAUER (LESO-PB/EPFL, CH-1015 Lausanne)

Joachim GEIGINGER, Günther SEJKORA (Zumtobel Licht, A-6851 Dornbirn)

Walter HEGETSCHWEILER (Landis & Gyr Building Control, CH-6301 Zug)

Peter WURMSDOBLER (Technical University of Vienna, A-1040 Wien)

1. INTRODUCTION

Le système de réglage proposé dans le cadre du projet DELTA tient compte des principes suivants:

- optimisation de l'utilisation de la lumière naturelle;
- optimisation du confort thermique (par exemple, éviter les surchauffes dues aux gains solaires);
- minimisation de la consommation énergétique (éclairage artificiel, chauffage, refroidissement);
- priorité donnée aux désirs de l'utilisateur.

Une description plus détaillée de l'expérience et de l'ensemble des résultats peut être consultée dans le rapport final du projet [2]. La régulation de la position d'un store est un problème complexe, qui n'a pas encore vraiment trouvé de solution complètement satisfaisante. La plupart des systèmes utilisés dans la pratique ne tiennent pas compte de l'ensemble des facteurs significatifs, et souvent irritent les utilisateurs du fait de mouvements trop fréquents et d'une stratégie pas entièrement satisfaisante. Il est alors fréquent de trouver le système de contrôle mis hors service, les stores étant bloqués en permanence dans une position non optimale (par exemple, complètement baissés, même s'il n'y a personne dans la pièce et que des gains solaires directs permettraient d'abaisser les besoins de chauffage en hiver, ou complètement relevés, avec les risques de surchauffe estivale qui en découlent).

L'emploi d'un algorithme utilisant la logique floue représente une intéressante possibilité de prendre en compte l'ensemble des paramètres d'influence, tout en laissant à l'utilisateur la liberté de régler lui-même la position de son store. De plus, l'algorithme développé ici présente la particularité d'être aisément intégrable à l'ensemble des systèmes de contrôle des installations techniques. Dans le cas de bâtiments administratifs, pour lesquels il est de plus en plus fréquent d'avoir un système de contrôle intégré avec de nombreuses sondes mesurant en permanence les conditions régnant dans tout le bâtiment, le surcoût d'installation d'un contrôleur de stores "intelligent" pourrait être relativement bas (par exemple quelques milliers de francs). Si un tel système, implanté dans un bâtiment de 1000 m² de plancher, permet une économie de 50 MJ/m² de plancher par année (soit environ 1500 francs en comptant un coût de l'énergie égal à 10 centimes par kWh), le temps de retour de l'investissement est suffisamment bas pour être financièrement intéressant.

2. PROBLEMATIQUE ET ALGORITHME PROPOSE

Un store joue au moins trois rôles distincts, dont seuls les deux premiers sont considérés ici:

- gestion de l'éclairage naturel (protection contre l'éblouissement, réalisation d'une ambiance visuelle confortable);
- gestion des gains solaires (utilisation des gains solaires en hiver, protection contre les gains solaires estivaux);
- confort visuel (séparation entre l'intérieur et l'extérieur, accroissement de l'intimité).

2.1 Algorithme thermique

Le système de réglage d'un store doit adopter un comportement très différent en hiver ou en été. Durant la saison de chauffage, le système devra tenter d'utiliser au maximum les gains solaires passifs par les fenêtres (sauf en cas de surchauffe, qui peut survenir même en hiver, si la surface de fenêtres est importante, le bâtiment bien isolé, et les gains internes substantiels). Si possible, les stores doivent être abaissés durant la nuit, afin de diminuer les pertes thermiques à travers les fenêtres. Au contraire, durant l'été, les gains solaires passifs doivent être minimisés, afin d'éviter les surchauffes. Durant la nuit, les stores devraient être relevés (et si possible, les fenêtres laissées ouvertes), afin d'évacuer un maximum d'énergie thermique. Une transition progressive entre les deux comportements extrêmes devra avoir lieu durant la mi-saison.

Principe de l'algorithme: le bilan thermique statique P_s pour l'ensemble fenêtre + store peut être représenté par une équation donnant les gains solaires et les pertes thermiques, en fonction des caractéristiques du vitrage, du rayonnement solaire et de la position du store α . Si $P_s > 0$, les gains solaires sont plus élevés que les pertes thermiques (la fenêtre permet alors de chauffer la pièce); si $P_s < 0$ la pièce est refroidie. L'idée de base

consiste à considérer le bilan thermique de la fenêtre P_s comme la variable à contrôler, de façon analogue à un système de chauffage. La position du store α sera alors évaluée à partir de la valeur souhaitée pour P_s . Le contrôleur devra donc réaliser les buts suivants:

- aider le système de chauffage/refroidissement grâce à un choix judicieux de la position du store α (apporter un maximum de gains lorsque le chauffage est en fonction, et au contraire minimiser les gains lorsqu'il est souhaitable de refroidir la pièce);
- assurer une optimisation à long terme des besoins nets de chauffage, en tenant compte de la dépendance saisonnière.

Cette approche présente les avantages suivants: • elle évite un comportement contradictoire du système de réglage du store et de celui du chauffage/refroidissement;

• elle assure une adaptation automatique à n'importe quel contrôleur de chauffage/refroidissement, ainsi qu'à n'importe quel bâtiment (les seuls paramètres nécessaires sont les caractéristiques des vitrages et du store, aisément accessibles). La logique floue permet d'introduire facilement des règles simples de fonctionnement correspondant aux principes énoncés ci-dessus (une discussion plus détaillée sur les contrôleurs à logique floue peut être trouvée dans la référence [4], et la description des variables et de la base de règles dans [2]). La valeur de P_s une fois évaluée au moyen de la base de règles, puis "défuzzifiée", la position du store la plus propre à assurer la valeur souhaitée pour P_s est calculée au moyen de l'équation inverse de l'équation donnant P_s , α étant limité à l'intervalle physiquement significatif $[0,1]$.

2.2 Algorithme visuel

Au contraire de l'aspect thermique, les exigences liées à l'éclairage (naturel et artificiel) ne dépendent que peu de la saison. De plus, le réglage de l'éclairage naturel (via la position du store) et de l'éclairage artificiel (luminaires) peut être instantané, puisqu'il n'y a pas d'inertie en jeu. Les stores sont utilisés pour protéger de l'éblouissement. Diverses stratégies plus ou moins complexes peuvent être considérées, depuis une évaluation continue du confort visuel jusqu'à la simple prise en compte de l'éclairement sur le plan de travail où se trouve l'utilisateur (exprimé en Lux, et mesuré par une sonde ou calculé par multiplication de l'éclairement extérieur par un "facteur de lumière du jour" incluant l'effet du store).

L'interaction entre le contrôle de la position du store et le réglage des luminaires est évidemment très étroite. Dans notre cas, une stratégie simple a été utilisée: l'éclairage artificiel est ajusté indépendamment, de façon à compenser si nécessaire le manque de lumière naturelle en fournissant la différence entre l'éclairement dû à la lumière naturelle (tenant compte de la position effective du store) et le niveau d'éclairement requis par l'utilisateur.

Un bon confort visuel peut être assuré aux conditions suivantes:

- *Eviter l'éblouissement.* Les indices de confort visuel proposés par la CIE [5] considèrent les contrastes de luminance dans le champ visuel de l'utilisateur. L'évaluation de tels indices par le système de contrôle étant difficile (complexité du calcul géométrique nécessaire), une approche simplifiée a été adoptée: afin d'éviter des contrastes trop élevés, il est en tout cas nécessaire d'éviter le rayonnement solaire direct. Les deux variables caractéristiques sont l'éclairement dû au rayonnement solaire incident et l'angle d'incidence de ce rayonnement par rapport à la fenêtre.

- *Assurer une ouverture minimale des stores.* Il apparaît dans la pratique que les usagers aiment conserver un contact visuel minimum avec l'extérieur. Cette exigence a été confirmée aussi bien par le gestionnaire technique d'un grand bâtiment bancaire que par les expérimentateurs du LESO-PB.

- *S'il n'y a pas de risque d'éblouissement, laisser entrer un maximum de lumière naturelle.*

- *Minimiser la fréquence des mouvements inattendus du store* (distraction, dérangement des personnes au travail).

Comme dans le cas de l'algorithme thermique, un algorithme utilisant la logique floue a été élaboré et testé. Les variables floues utilisées dans l'algorithme sont les suivantes:

- l'éclairement sur le plan de travail de l'utilisateur, dû au rayonnement solaire direct;
- l'éclairement sur le plan de travail de l'utilisateur, dû au rayonnement solaire diffus;
- l'angle d'incidence du rayonnement solaire par rapport au plan de la fenêtre.

2.3 Prise en compte des désirs des utilisateurs, intégration des divers aspects

De façon générale, l'utilisateur a la priorité lorsqu'il choisit une position du store au moyen des boutons- poussoirs. Ce n'est qu'après un certain temps (dans notre cas, environ 30 minutes) que l'on peut considérer que le vœu exprimé pourrait éventuellement ne plus correspondre à la réalité, et redonner alors la main au système automatique (l'utilisateur ayant évidemment la liberté d'appuyer à nouveau sur les boutons-poussoirs pour remettre le store dans la position de son choix, auquel cas une nouvelle période d'attente de 30 minutes redémarre).

En règle générale, les algorithmes thermique et visuel peuvent donner des consignes opposées. Par exemple, durant l'hiver, les gains solaires peuvent être les bienvenus mais la lumière naturelle trop élevée (conduisant donc à un éblouissement), si le store est complètement ouvert. Les principes permettant la combinaison des trois aspects (voeux de l'utilisateur, thermique, visuel) peuvent être énoncés de façon simple:

- l'utilisateur peut toujours choisir la position du store, à n'importe quel moment; son désir reste prioritaire durant une période fixée (techniquement, seules les contraintes liées à la sécurité ont une priorité supérieure, lorsque par exemple un vent violent impose que les stores soient relevés);
- le confort visuel a priorité sur les économies d'énergie lorsque les usagers sont présents dans le local; dans ces conditions, c'est la position déterminée par l'algorithme visuel qui est choisie;
- au contraire, lorsqu'ils ne sont pas présents (ou plus exactement qu'ils sont absents du local durant plus de 30 minutes), le système de réglage des stores vise alors à optimiser la consommation thermique (chauffage/refroidissement); dans ce cas, la position du store est celle déterminée par l'algorithme thermique;
- enfin, en mode automatique (dans tous les cas, sauf lorsque l'utilisateur modifie lui-même la position du store), seules 4 positions sont disponibles, ce qui réduit de façon drastique le nombre de déplacements inattendus des stores.

3. VERIFICATION EXPERIMENTALE

La vérification expérimentale a permis d'atteindre trois buts: valider le modèle thermique de simulation, vérifier le fonctionnement correct de l'algorithme de réglage (et corriger les bugs de programmation !), et étudier l'impact du comportement de l'utilisateur sur le système de contrôle des stores. Faute de place, la discussion sur les résultats de la vérification expérimentale ne figure pas dans le présent papier. Les personnes intéressées peuvent se référer au rapport final complet [2].

Les pièces faisant l'objet de l'expérimentation sont deux bureaux du bâtiment LESO, décrit en détail dans [1] ou [6]. Les bureaux sont orientés vers le sud, et ont les caractéristiques essentielles suivantes: 15.6 m² de surface de plancher, 3.77 m² de surface vitrée (vitrage triple), construction lourde, isolation poussée de chaque unité vers l'extérieur et vers les autres unités du bâtiment (les deux bureaux constituent une unité du bâtiment). Les stores sont des stores textiles extérieurs, de qualité médiocre. Une installation complexe, comportant trois PC compatibles IBM interconnectés, a été utilisée pour le contrôle et le monitoring des différentes grandeurs physiques. Elle est décrite en détail dans [2].

4. RESULTATS DE SIMULATION

La simulation nous a permis une comparaison détaillée de plusieurs variantes de l'algorithme, en comparaison avec des situations usuelles lorsqu'aucun système automatique de contrôle n'est prévu. Les simulations, effectuées au moyen d'un programme de simulation nodal (au total 35 noeuds) écrit à l'aide du logiciel Matlab, ont couvert une année complète. Des comparaisons qualitatives (évolution de la position des stores et de la température intérieure pour des jours-types) et quantitatives (consommation d'énergie sur l'année complète) ont été effectuées. Seules les résultats quantitatifs sont présentés ici. Deux catégories d'algorithmes ont été simulés:

A. Des situations de "référence" avec un contrôle élémentaire du store:

- store toujours ouvert
- store toujours mi-ouvert
- store toujours fermé
- économie d'énergie de chauffage en hiver (store fermé la nuit et ouvert le jour)
- économie d'énergie de refroidissement en été (store ouvert la nuit et fermé le jour)
- "utilisateur économe en énergie" (durant l'hiver, store fermé la nuit et ouvert le jour; durant l'été, store ouvert la nuit et fermé le jour)

B. Algorithmes automatiques de contrôle de la position du store:

- algorithme "DELTA énergétique" (optimum énergétique en permanence, comme si la pièce était toujours inoccupée)
- algorithme "DELTA visuel" (optimum visuel en permanence, comme si la pièce était toujours occupée)
- algorithme "DELTA standard" (combinaison optimum énergétique - optimum visuel, suivant un schéma standard d'occupation 8 h - 18 h)

Les données météo utilisées pour la simulation ont été générées par le logiciel Meteonorm 95 [7], pour l'emplacement considéré (Ecublens/Lausanne). Les consommations d'énergie (chauffage, refroidissement et éclairage artificiel) sont représentées sur la figure 1.

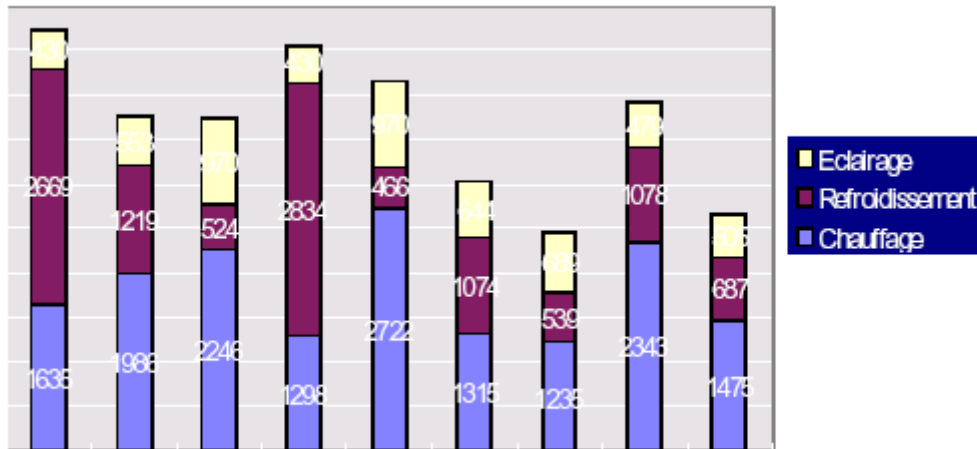


Figure 1: demande annuelle d'énergie [MJ] pour diverses variantes de contrôle de store (surface de référence énergétique: 17.7 m² de plancher).

Les constatations suivantes peuvent être faites:

- en ce qui concerne le chauffage et le refroidissement, l'algorithme de la variante "DELTA énergétique" est très efficace en comparaison avec les cas de référence;
- lorsque le bâtiment est occupé, les utilisateurs ont besoin de confort visuel dans les pièces. L'algorithme "DELTA standard" correspond à cette situation, en supposant que l'occupation des locaux a lieu de 8 h à 18 h. Des économies substantielles peuvent encore être faites en comparaison avec les stratégies à position fixes, et même par rapport à la stratégie "utilisateur efficace en énergie";
- en ce qui concerne l'énergie utilisée pour l'éclairage artificiel, l'algorithme "DELTA standard" donne un résultat très proche du cas où le store est ouvert en permanence (le cas le plus favorable du point de vue de l'éclairage naturel). La faible différence entre les deux cas correspond aux situations pour lesquelles l'éclairage artificiel a été utilisé malgré un store en partie abaissé, du fait des exigences de confort visuel (notamment éblouissement dû au rayonnement solaire direct);
- les deux stratégies DELTA prenant en compte un optimum énergétique de chauffage/refroidissement (DELTA énergétique et DELTA standard) montrent une très bonne caractéristique énergétique globale. Elles sont bien meilleures que toutes les stratégies de référence, y compris la stratégie "utilisateur efficace en énergie", qui constitue pourtant une bonne variante en ce qui concerne l'économie d'énergie de chauffage/refroidissement;
- la stratégie DELTA standard prend en compte l'optimum de confort visuel lorsque l'utilisateur est présent. Malgré ce compromis, qui dégrade quelque peu les performances thermiques, la consommation totale d'énergie n'est supérieure que de peu à la stratégie DELTA énergétique (2667 MJ au lieu de 2463 MJ).

6. CONCLUSIONS

L'algorithme de contrôle automatique des stores présenté dans cet article est basé sur deux principes, mis en oeuvre au moyen de bases de règle à logique floue très simples:

- le contrôle des gains solaires directs par la fenêtre pour aider au maximum le système de chauffage/refroidissement; une optimisation à long terme est considérée, en tenant compte de la saison;
- l'optimisation du confort visuel, lorsque l'utilisateur est présent dans la pièce. Les principes de base utilisés dans l'algorithme proposé ont plusieurs avantages:
 - une adaptation très facile à n'importe quelle installation de chauffage et de refroidissement;
 - les seules caractéristiques thermiques à connaître sont celles du vitrage;
 - le seul paramètre à ajuster est le seuil pour la fuzzification de la variable "saison", qui correspond normalement à la "température de non-chauffage" du bâtiment.

Les enquêtes de satisfaction des utilisateurs ont montré qu'il est important de laisser ceux-ci régler eux-mêmes la position du store, avec une priorité plus élevée que celle du système automatique. L'expérience a également montré

une bonne acceptation du comportement du système. Grâce à des contrôleurs utilisant des algorithmes évolués, il est possible d'économiser une proportion importante de l'énergie consommée dans les bâtiments, sans diminuer en aucune manière le confort (thermique, visuel, qualité de l'air) des utilisateurs. Le marché pour des contrôleurs "intelligents" (algorithmes sophistiqués et auto-adaptation) et intégrés (considération du bâtiment comme un seul système réglé global) croîtra donc de façon considérable. Les fabricants de systèmes de contrôle l'ont d'ailleurs bien compris: la participation de deux entreprises de taille importante au projet DELTA, et la prise, en commun entre tous les participants au projet, d'un brevet concernant l'algorithme développé, montre cet intérêt. Le contrôleur développé ici a comme caractéristiques essentielles le fait d'être facile à installer et de raccourcir et améliorer la qualité de la mise en service. Les plaintes des utilisateurs se rapportant fréquemment à une mise en service insuffisante (ou même parfois "oubliée"), l'intérêt du système est évident.


Pour y voir plus clair ...

... dans la logique floue !

La **logique floue** (fuzzy logic pour les anglo-saxons) est un nouveau concept, que l'on peut légitimement considérer comme une **petite révolution**, au moins intellectuelle.

Comme tout nouveau concept, la logique floue nécessite un effort de compréhension ou plutôt une disponibilité d'esprit. Elle propose, en effet, une approche des problèmes beaucoup plus **pragmatique** que mathématique qui peut heurter, ou faire sourire, les esprits cartésiens ou trop déterministes.

Pourtant, dans certains problèmes où les mathématiques peinent par impossibilité ou **difficulté de modélisation**, la logique floue apporte une étonnante **efficacité**.

 Cette page n'a pour modeste ambition que de **démystifier le concept** de la logique floue. Elle se limite à rappeler l'histoire de cette technique, à énoncer les principes qu'elle utilise et la façon de les mettre en oeuvre. Un exemple illustre la **mise en pratique** concrète de la méthode.

ATTENTION, VOUS ÊTES TOUS CONCERNÉS !
VOTRE CERVEAU FONCTIONNE EN LOGIQUE FLOUE.
SURE, YOU ARE FUZZY ! IS IT NOT CRAZY ?

La logique floue est très proche du processus de la pensée humaine "quotidienne". Elle met en oeuvre un jeu de règles comme, implicitement, nous en utilisons chaque jour. Enfin, pour la plupart d'entre nous !

Prenons l'exemple de la conduite automobile à l'approche d'un carrefour contrôlé par des feux tricolores :
Si vous êtes un conducteur normal - j'exclus évidemment les *beaufs*, les demeurés et les pris de boisson, tous totalement hermétiques à toute forme de logique ... Si, si ! Vous pouvez rester ! - le processus de conduite met en oeuvre les quelques règles élémentaires suivantes :

si le feu est rouge ...	si ma vitesse est élevée ...	et si le feu est proche ...	alors je freine fort.
si le feu est rouge ...	si ma vitesse est faible ...	et si le feu est loin ...	alors je maintiens ma vitesse.
si le feu est orange ...	si ma vitesse est moyenne ...	et si le feu est loin ...	alors je freine doucement.
si le feu est vert ...	si ma vitesse est faible ...	et si le feu est proche ...	alors j'accélère.

Vous êtes vous reconnus ? Oui ? Alors, poursuivons ensemble :

Prenons la première des 4 règles. Elle est typiquement "floue". Si nous essayons de la transposer dans un monde plus mathématique "moins flou", cela donnerait (en forçant "légèrement" le trait) :

Si le feu est rouge, si ma vitesse dépasse 85,6 Km/H et si le feu est à moins de 62,3 mètres, alors j'appuie sur la pédale de frein avec une force de 33,2 Newtons !!!

Vous pigez ? Vous ne fonctionnez pas comme cela ! Et bien la logique floue formalise le monde exactement comme le fait votre cerveau. Elle apprécie les variables d'entrées de façon approximative (faible, élevée, loin, proche), fait de mêmes pour les variables de sorties (freinage léger ou fort) et édicte un ensemble de règles permettant de déterminer les sorties en fonction des entrées. Etonnant, non ? Comme Monsieur JOURDAIN, vous faisiez dans la logique floue sans le savoir !

La logique floue a déjà 60 ans ...

Pressenti par le philosophe Max Black dès 1937, le concept de la logique floue fut réellement introduit en 1965 par Lotfi Zadeh, un professeur d'électronique à l'université de Berkeley (USA). Sa "Fuzzy Set Theory" n'eut pas un succès immédiat. Elle fut développée surtout en Europe et au Japon. Ce dernier, poussé par une pénurie de programmeurs, était à la recherche de méthodes pouvant réduire les coûts de développement des logiciels. Freinée par la réticence à appréhender un nouveau concept et par des difficultés de réalisation pratique, la logique floue ne débouche réellement qu'en 1990 avec l'apparition de produits et de systèmes utilisant cette technique. Aujourd'hui, la logique floue est arrivée à maturité et est utilisée dans de nombreux produits "grand public" notamment au Japon. Sa mise en oeuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement.

Bien que floue, cette logique a des principes

La résolution d'un problème par la logique floue comprend 3 étapes :

- La **QUANTIFICATION "FLOUE"** des entrées / sorties du système,
- L' **ETABLISSEMENT DES REGLES** liant les sorties aux entrées,
- La **COMBINAISON DES REGLES** pour la génération des sorties.

Quantification "floue" des entrées / Sorties du système

Le concept de la logique floue vient de la constatation que la variable booléenne, qui ne peut prendre que deux valeurs (vrai ou faux) est mal adaptée à la représentation de la plupart des phénomènes courants.

Par exemple, on trouve dans un traité de médecine l'affirmation suivante :

un patient atteint d'hépatite présente généralement les symptômes suivants :

- Le patient a une forte fièvre,
- sa peau présente une coloration jaune,
- il a des nausées.

Comment modéliser l'état : "a une forte fièvre" ? La variable booléenne ci-contre tente de représenter cet état. En deçà de la température T_0 , le patient n'a pas de température. Au delà, il doit consulter !

Le problème commence lorsqu'il s'agit de donner une valeur à T_0 . Doit-on prendre 39 ou 40 degrés ? La notion de fièvre est typiquement une notion floue difficilement modélisable avec l'algèbre booléenne classique, surtout si l'on considère les différences de métabolisme d'un individu à l'autre.

La variable "a une forte fièvre" manipulée par la logique floue serait la suivante :

La transition entre les valeurs faux (codée 0) et vrai (codée 1) est maintenant **progressive**.

La fonction représentée doit être considérée comme un **degré d'appartenance** (degree-of-membership) à l'état décrit ou comme une **probabilité d'appartenir à l'ensemble** considéré.

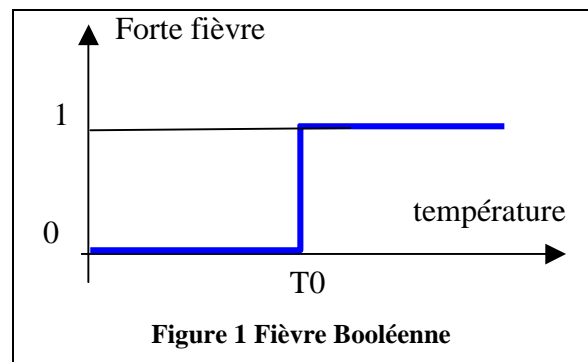


Figure 1 Fièvre Booléenne

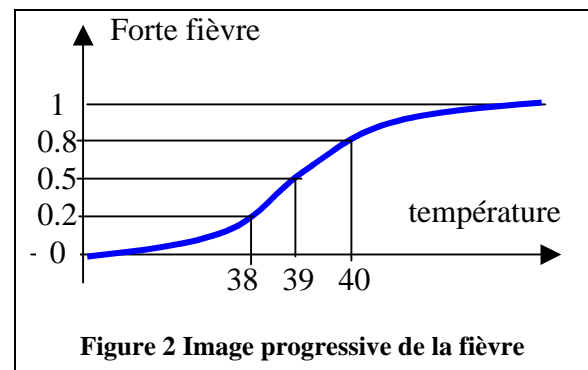


Figure 2 Image progressive de la fièvre

Ainsi, un patient présentant une température de 38 n'a qu'un faible degré d'appartenance 20 % (0,2) à l'état "a une forte fièvre" alors que celui qui atteint 40 présente un fort degré d'appartenance (80 %) à ce même état.

On voit qu'il est maintenant beaucoup plus aisé de fixer la température de basculement (progressif) d'état. A 39, on n'appartient qu'à 50 % à l'état "a une forte fièvre".

Si l'on reprend l'exemple du diagnostic médical, pour un patient dont la température aurait été juste inférieure à la température de transition (38,9 °C pour 39 °C), on aurait exclu l'hépatite alors qu'avec la logique floue, on l'aurait envisagée avec une probabilité moyenne, mais non nulle de 50 % !

La première étape du traitement d'un problème par la logique floue consiste donc à modéliser chacune des entrées du système par des courbes donnant les degrés d'appartenance à différents états identifiés pour ces entrées.

Cette étape de quantification "floue" des variables d'entrée est aussi appelée fuzzification (mille excuses aux puristes de notre belle langue).

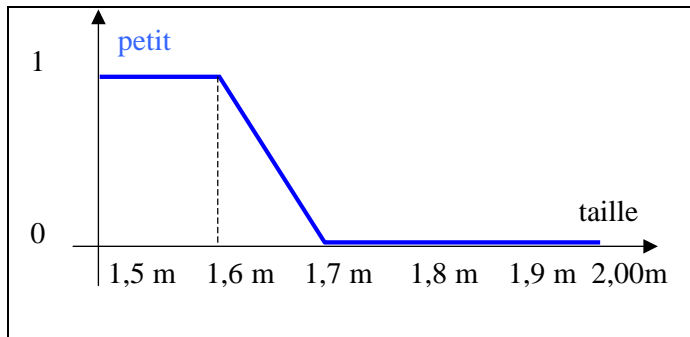
On verra qu'il est souvent nécessaire de considérer plusieurs domaines d'évolution d'une entrée ou d'une sortie.

Prenons l'exemple de la taille d'un homme :

On peut, à coup sûr, classer les hommes suivant leur taille en petit, moyen et grand, mais comment déterminer les limites entre chaque catégorie autrement qu'avec le secours de la logique floue ?

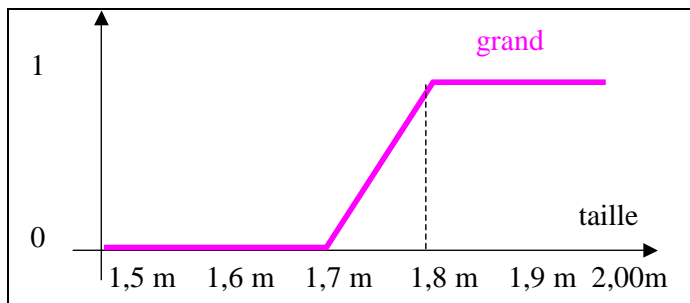
Essayons de définir la catégorie petit (en essayant de ne vexer personne !) :

Seriez-vous d'accord avec les règles générales et le diagramme d'appartenance suivants ?



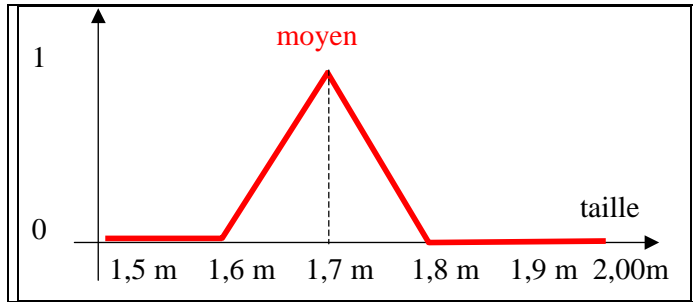
- Un homme est vraiment petit en dessous de 1 m 60.
- à 1 m 65, il n'est "qu'à moitié" petit.
- Il ne l'est plus du tout au delà de 1 m 70.

Si vous m'avez suivi jusqu'ici, vous ne pourrez qu'approuver les règles générales et le diagramme d'appartenance à l'état grand que je vous propose maintenant !



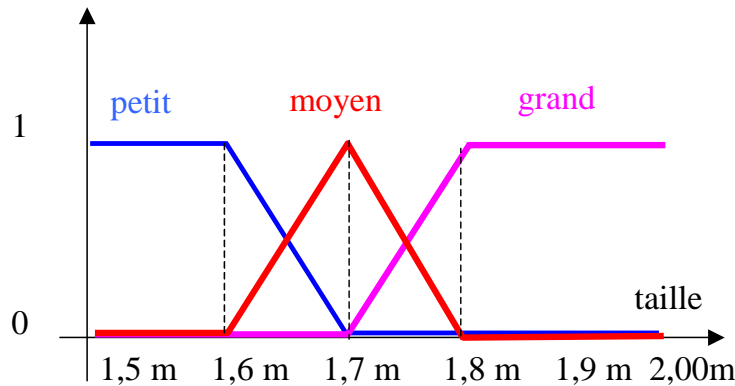
- Un homme est vraiment grand au dessus de 1 m 80.
- A 1 m 75, il n'est "qu'à moitié" grand.
- Il ne l'est plus du tout en deçà de 1 m 70.

De même pour l'état moyen.



- Un homme est tout à fait moyen à 1m 70.
- En dessous de 1m 60, il n'est pas assez grand pour être moyen.
- Au delà de 1m 80, il ne l'est plus non plus.

Si l'on superpose les 3 graphiques précédents,



On voit que les courbes se recouvrent.

Ce chevauchement est tout à fait logique, il montre que lorsque notre taille grandit nous ne passons pas brutalement d'une catégorie à une autre, mais progressivement. A l'âge de l'adolescence, notre degré d'appartenance aux groupes des petits décroît au profit de notre degré d'appartenance au groupe des moyens, et bientôt à celui des grands. Ce chevauchement sera en outre une garantie de stabilité des asservissements basés sur la logique floue.

A titre d'exercice, essayez de vous classer dans les 3 catégories, à l'aide du diagramme précédent :

exemple :

- 1 m 67 ... personne n'est parfait ! Et bien que nous dit le diagramme :

Ce n'est pas si catastrophique que cela : vous n'appartenez au groupe des petits qu'à concurrence de 25 % alors que vous êtes déjà moyen à hauteur de 75 %. Désolé, mais vous êtes exclu du groupe des grands avec un degré d'appartenance nul !

Et vous le grand dégingandé, du haut de vos 1 m 82, n'êtes vous pas trop seul dans le groupe exclusif des grands ?

Voilà donc présentée la première étape dite de **fuzzification** des variables. Elle s'applique d'ailleurs aussi bien aux variables d'entrée que de sortie. La puissance à appliquer à un moteur, par exemple, pourra faire appel à des valeurs de puissance telles que "faible, moyenne ou forte".

Les courbes d'appartenance prennent différentes formes en fonction de la nature de la grandeur à modéliser :



La fuzzyfication des variables d'entrée est une phase délicate du processus mis en oeuvre par la logique floue. Elle est souvent réalisée de manière itérative et requiert de l'expérience.

ÉTABLISSEMENT DES RÈGLES liant les sorties aux entrées

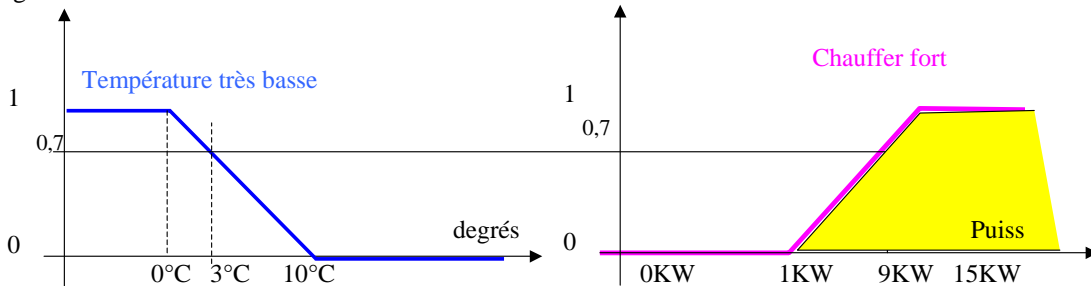
Après avoir "fuzzyfier" les variables d'entrée et de sortie, il faut établir les règles liant les entrées aux sorties. En effet, il ne faut pas perdre le but final que nous poursuivons qui consiste à chaque instant, à analyser l'état ou la valeur des entrées du système pour déterminer l'état ou la valeur de toutes les sorties.

la logique floue fonctionne suivant le principe suivant :
Plus la condition sur les entrées est vraie,
Plus l'action préconisée pour les sorties doit être respectée

Prenons l'exemple simple d'une régulation de température dont le but est de commander la puissance de chauffe à partir de la température donnée par un thermomètre. On peut imaginer la règle simple suivante :

Si la température est très basse, alors chauffer fort.

Avant de voir comment va s'appliquer cette règle, il faut fuzzyfier l'entrée et la sortie du système, ce qui donne les deux diagrammes suivants :



La température est jugée : vraiment "très basse" en dessous de 0 degré C, pas du tout "très basse" au dessus de 10 degrés, et à 50 % "très basse" à 5 degrés. De même, la chauffe est jugée : "forte" au delà de 10 Kw, plus du tout "forte" en deçà de 1 Kw.

Dans ce cas, la puissance de chauffe est facile à déterminer en fonction de la température. Sur le diagramme à été tracé le cas d'une température de 3 degrés. Cette température donne un degré d'appartenance à l'état "température très basse" de 0,7. Si l'on prolonge ce degré d'appartenance jusqu'au diagramme de droite, il découpe dans le domaine des puissances de chauffe allant de 1 à 15 Kw une zone trapézoïdale (grisé) dans laquelle doit être choisie la puissance à appliquer.

Il y a plusieurs méthodes pour la déterminer précisément, la plus courante étant l'abscisse du centre de gravité du trapèze, ce qui donne environ 9 Kw dans notre exemple.

COMPOSITION DES DEGRES D'APPARTENANCE

Dans la pratique, les règles font appel à des conditions d'entrée plus complexes mettant en oeuvre des conditions logiques du type, « **ou** », « **et** » ou « **non** ».

Reprenons la première règle de notre exemple de conduite automobile :

si le feu est rouge, si ma vitesse est faible et si le feu est loin, alors je maintiens ma vitesse.

Pour que je maintienne ma vitesse, il faut que 3 conditions soient remplies. Et là se pose un problème : pour un état donné des entrées chaque condition va être remplie avec un certain degré d'appartenance.

Comment doit-on composer ces différents degrés d'appartenance pour en attribuer un à la condition globale ?

Il existe plusieurs lois de composition, mais la plus couramment utilisé est la suivante :

- Quand des conditions sont liées par une **logique "ou"**, on considère le degré d'appartenance **maximum** parmi les conditions d'entrée.

- Quand des conditions sont liées par une **logique "et"**, on considère le degré d'appartenance **minimum** parmi les conditions d'entrée.

En reprenant notre exemple, si le feu est bien rouge (degré d'appartenance = 1), si la vitesse est considérée comme faible à 70 %, et si le feu est jugé lointain à 30 %, on attribue le degré d'appartenance 0,3 (minimum des 3 valeurs 1, 0,7 et 0,3) à la condition globale.

Pour illustrer la logique **"ou"**, on pourrait imaginer, non sans malice, la règle suivante :

Si cet article vous ennue (à 30 %) **"ou"** si, devant votre fenêtre, passe une fille très belle (ou un beau gosse !) (à 70 %) alors vous zappez ... à 70 %).

COMBINAISON DES RÈGLES liant les sorties aux entrées

Au cours des épisodes précédents, nous avons vu la "fuzzyfication" des entrées et des sorties, l'établissement des règles liant les entrées aux sorties.

Il nous reste un dernier problème à résoudre :

Pour un état donné des entrées, plusieurs règles peuvent être validées simultanément et fournir des consignes différentes pour les sorties.

Il faut donc disposer d'une méthode de COMPOSITION DES RÈGLES" pour obtenir la valeur finale des sorties.

**Il s'agit en fait d'appliquer le principe suivant déjà énoncé :
Plus la condition d'une règle sur les entrées est vraie,
Plus l'action préconisée pour les sorties doit être respectée**

La composition des règles doit tenir compte de toutes les règles qui sont validées au prorata de leur degré de validité.

Il existe au moins 3 types de composition des règles :

- La TECHNIQUE DU MAXIMUM
- La TECHNIQUE DE LA MOYENNE PONDÉRÉE
- La TECHNIQUE DU CENTRE DE GRAVITÉ

LA **TECHNIQUE DU MAXIMUM** est la plus simple : elle consiste à ne considérer, pour chaque sortie, que la règle présentant le maximum de validité

Cette règle, simple voire simpliste, ignore les règles secondaires qui peuvent néanmoins être importantes pour le fonctionnement et la stabilité du système. Elle est peu employée.

LA **TECHNIQUE DE LA MOYENNE PONDÉRÉE** est plus évoluée. Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne des valeurs préconisées par chaque règle, pondérées par leurs degrés respectifs de validité.

Exemple : soit deux règles donnant les valeurs de consignes suivantes :

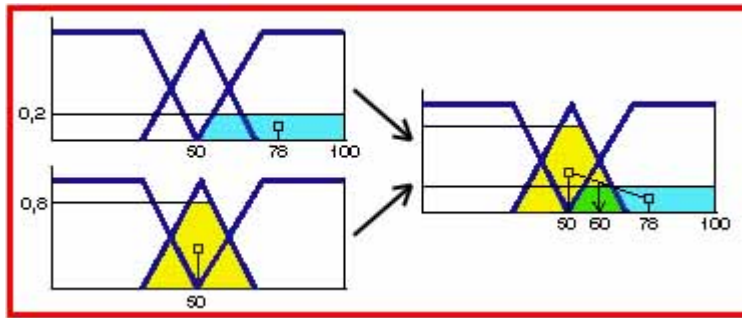
- règle 1 : valeur intermédiaire (50) avec une validité de 0,8,
- règle 2 : valeur forte (78) avec une validité de 0,2,

On prend comme valeur de sortie : $[(50 \times 0,8) + (78 \times 0,2)] / (0,8 + 0,2) = 56$.

Cette méthode, également simple à mettre en oeuvre, présente néanmoins certaines ambiguïté sur la valeur de sortie.

LA **TECHNIQUE DU CENTRE DE GRAVITÉ** est plus performante : elle consiste à tracer, sur un même diagramme, les différentes zones trapézoïdales correspondant à chacune des règles, et à calculer le centre de gravité de la zone consolidée.

Exemple : soit le diagramme suivant donnant la consigne des 2 règles précédentes et la consigne finale obtenue :



La première consigne correspond à la zone bleue, la seconde à la zone jaune, qui se recouvre partiellement sur la zone verte.

Le centre de gravité de l'ensemble des deux zones donne une consigne de 60. Cette méthode, de loin la plus coûteuse en puissance de calcul, rallie aujourd'hui tous les suffrages et donne les meilleurs résultats.

La puissance des processeurs disponibles aujourd'hui, dont certains dédiés à la logique floue, ne pose plus de problème pour l'implémentation de cette technique.

CONCLUSION

Dans quels cas la logique floue s'avère-t-elle plus efficace que les méthodes traditionnelles ?

- Pour les systèmes **complexes** dans lesquels la **modélisation** est **difficile**, voire impossible,
- Pour les systèmes **contrôlés** par des experts **humains**,
- Pour les systèmes ayant de nombreuses entrées/sorties continues ou discontinues et des **réponses non linéaires**,
- Quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou de règles de contrôle du système,
- Dans tous les domaines où un "**flou**" persiste, notamment dans le domaine de **l'économie**, des **sciences naturelles** et des **sciences humaines**.

La logique floue a déjà fait ses preuves dans les domaines d'applications suivants

- Gestion de projet,
- Modélisation de prix, analyse démographique des marchés
- Analyse de rentabilité pour l'achat de compagnies,
- Détection de fraude à la protection sociale, identification de criminels
- Gestion des aspirateurs, des systèmes de ventilation et de régulation thermique,
- Pilotage d'un système d'autofocus d'appareil photos,
- Système d'approche d'une station orbitale pour la navette spatiale américaine,
- Lecture automatique, reconnaissance de caractères,
- Traitements d'images,