

# SUPERVISION DES RÉGULATEURS PAR LOGIQUE FLOUE

par B. EWERS, J. BORDENEUVE-GUIBÉ

Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Constructions Aéronautiques (E.N.S.I.C.A)  
Département Avionique et Systèmes  
1, place Emile Blouin, 31056 Toulouse.

## Résumé

Le but de cette publication est d'exposer les potentialités de la supervision par logique floue des systèmes de commande, et d'en tirer des concepts méthodologiques. Les techniques de supervision ont un intérêt évident quand le système à contrôler est fortement non-linéaire, suite par exemple à des variations de paramètres ou à des actionneurs saturés. Nous montrons ici, grâce à deux exemples d'applications différents, comment ces méthodes peuvent effectivement être appliquées pour améliorer les performances d'un asservissement classique. Ces exemples sont tirés d'une étude conjointe entre l'Aérospatiale et l'ENSICA, ce travail ayant pour but d'évaluer les potentialités de la logique floue dans les problèmes de commande de systèmes aéronautiques.

## SUPERVISION OF CONVENTIONAL CONTROL SYSTEMS WITH FUZZY LOGIC

### Abstract

Classical control theory is based upon an analytic system design procedure using deterministic or stochastic approaches. In the past years, there has been a growing interest in using new computational and machine intelligence technologies such as rule-based systems, fuzzy logic or neural networks in process control. These approaches are often referred to as expert or qualitative control. Fuzzy logic, in particular, has been successfully applied to various industrial control problems. Generally speaking, fuzzy logic and rule-based techniques are a means of dealing with imprecision, a method of modeling human behavior, allowing to incorporate heuristic knowledge and symbolic information into process calculators. This approach becomes particularly interesting when a sufficient analytic representation of the process is too difficult or even impossible to obtain. However, although expert control is more and more accepted in the control engineering community, its place among conventional techniques has not been defined clearly. This is primarily due to the lack of a general methodology to systematically validate the global functioning and performance of systems that incorporate "intelligent components". Nevertheless, it can be observed that expert control and symbolic data processing have the potential to improve the performance of a feedback loop and to provide new functions in a control system. As a part of a research program to study the potential role of fuzzy logic for future aircraft control systems, this paper focuses on the conception of supervisory control structures for aeronautical applications using rule based expert systems and fuzzy logic theory. This concept can be used to backup or monitor a conventional control system improving its performance in the presence of a changing system environment or in extreme operating conditions. The effectiveness of this method could be successfully demonstrated by two application examples, which will be discussed in this paper.

# 1. INTRODUCTION

La logique floue ainsi que les techniques à base de règles sont maintenant considérées comme des outils ayant fait leurs preuves dans le domaine du contrôle de procédés. En commande classique, l'approche base de règles peut être utilisée pour définir des régulateurs non-linéaires, grâce à leur pouvoir de modélisation de l'opérateur humain sous forme linguistique et/ou floue. Le développement d'une loi de commande floue peut être réalisé indépendamment de tout modèle mathématique du procédé, ce qui la distingue de la plupart des contrôleurs classiques. Cette indépendance peut entraîner une robustesse accrue, mais elle entraîne également une procédure de réglage des paramètres parfois lourde, plus particulièrement dans le cas de procédés à plusieurs entrées et plusieurs sorties. Il faut ajouter à cela le fait qu'il n'existe aucune méthodologie directe de définition des paramètres du régulateur (fonctions d'appartenance, règles d'inférences), et que les performances en boucle fermée ne peuvent être quantifiées qu'a posteriori. C'est pourquoi les techniques à base de règles sont souvent opposées aux techniques classiques. Pourtant, il semble plus logique de tirer profit des avantages des deux concepts, qui peuvent être complémentaires sur plusieurs points. C'est dans cet esprit que sera abordé le problème de la commande de processus par la suite, en se basant sur un asservissement existant, et en ayant le souci de l'améliorer grâce aux techniques utilisant pleinement l'expérience et le savoir faire de l'opérateur.

Dans ce contexte, le travail présenté a pour but d'explorer les différentes méthodes de conception et d'application d'un système expert flou, et de concevoir ainsi un niveau supérieur de surveillance de la boucle de régulation. L'introduction de connaissance d'un expert humain dans un niveau supérieur de contrôle, est l'outil principal qui doit permettre la surveillance et l'ajustement du système bouclé. Cette surveillance aura pour objectif d'évaluer les changements de fonctionnement du système contrôlé, et l'ajustement se fera alors selon un critère donné (amélioration d'indices de performances par exemple). Les fonctions du superviseur étant basées sur l'utilisation de règles d'inférences floues, on aura à faire à une commande hiérarchisée à logique floue [1].

L'objectif de la supervision floue étant finalement une adaptation d'une boucle de commande, le rapprochement avec les méthodes classiques de commande adaptative est évident. Une première différence provient de la manière d'adapter le système (adaptation heuristique dans un cas, analytique dans l'autre). Mais l'intérêt représenté par la supervision floue provient de la possibilité offerte d'agir, soit sur le régulateur, en modifiant ses paramètres, soit sur la structure même du régulateur (commutation sur un régulateur de secours en conditions extrêmes), soit encore sur la consigne (pour désaturer une commande par exemple). Ces possibilités d'adaptation découlent naturellement du principe de prise de décision par imitation de l'opérateur humain. On ne peut alors plus parler d'optimalité analytique au sens de la minimisation d'un critère, comme utilisé en commande adaptative classique. Cette non-optimalité va se traduire par une sous optimalité, c'est notamment pourquoi la précision ne sera pas l'objectif à rechercher lors de la synthèse d'un superviseur flou.

Toutefois, ce manque de précision, s'il n'est pas pénalisant pour le système de commande, sera de toute façon compensé par une plus grande insensibilité du système bouclé aux différentes perturbations. Le dernier point important réside dans la capacité du superviseur flou à traiter des informations imprécises. Cette imprécision ne se limite pas aux bruits de mesure, mais englobe l'aspect naturellement heuristique et difficilement quantifiable de certaines grandeurs influant sur le système bouclé.

Dans cette publication, nous allons d'abord exposer les différentes techniques de synthèse d'un superviseur flou. Ensuite, pour montrer les possibilités offertes par ces techniques sur des applications variées, nous étudierons deux exemples d'applications dans le domaine aéronautique :

- supervision du pilotage d'un avion cargo lors de l'arrêt de la procédure d'atterrissage. Cette procédure se traduit par un arrêt de la phase d'approche, et par une remise des gaz pour redécoller immédiatement. Cette remise des gaz peut alors amener à une saturation de la gouverne de profondeur.
- supervision du régulateur de freinage d'un avion de transport. Ce freinage a une efficacité très variable avec l'état de la piste.

## 2. SYNTHÈSE D'UN SYSTÈME DE SUPERVISION FLOUE

### 2.1. Aspects généraux

La configuration générale d'un système de commande supervisée est montrée sur la figure 1. Le superviseur peut être divisé en deux sous systèmes : l'unité de traitement des données (DPU pour *Data Processing Unit*), et l'unité de prise de décision ou de traitement de l'information (IPU pour *Information Processing Unit*).

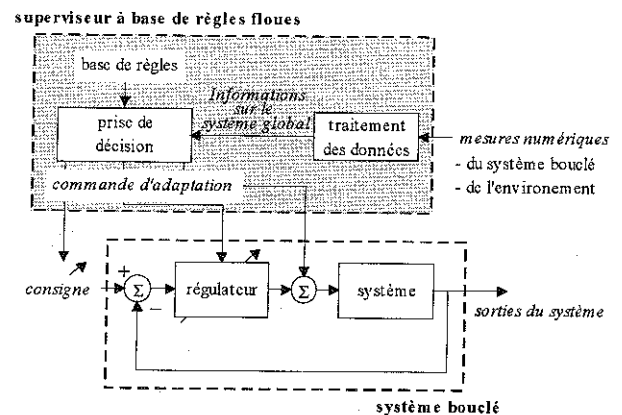


Fig. 1. - Système de supervision.

Le rôle du DPU est de générer, à partir des données d'entrées, une information utile sur le comportement dynamique du système bouclé et/ou sur la configuration actuelle de la boucle et de son environnement. Cette information sera alors traitée par l'IPU, pour générer une action corrective. Les données en entrée du superviseur peuvent être mesurées ou calculées. Les sorties du superviseur sont choisies en fonction de la tâche à réaliser. On peut citer quelques tâches classiques :

- choix de la structure de régulateur la mieux adaptée.
- réglage des paramètres du régulateur (période d'échantillonnage, gains...).
- changement de consignes.
- calcul d'une commande additionnelle, ajoutée à la sortie du régulateur.
- prise en compte et gestion de saturations.

## 2.2. Informations sur le système bouclé

Nous avons déjà vu que l'adaptation du système bouclé devient nécessaire quand surviennent des changements de paramètres ou d'environnement. C'est pourquoi, la première étape de la synthèse du superviseur doit consister en une définition des performances désirées, et en une analyse de la corrélation entre les performances du système et les phénomènes perturbants.

Avant de formuler les règles d'inférence du superviseur, l'expert doit choisir l'information qu'il juge nécessaire pour définir une action corrective sur le système bouclé. Cette information est donc évaluée par le DPU, que l'on peut en fait considérer comme un observateur, au sens large, des propriétés de l'asservissement. Cette phase d'observation peut bien entendu comporter une phase analytique, et toute autre processus d'évaluation plus heuristique (classification par réseaux neuronaux, estimation floue, etc).

Les informations les plus couramment utilisées sont relatives, à des indices de performances, à une comparaison avec un modèle de référence, ou encore à une identification en ligne.

### 2.2.1. Indices de performances

Les indices de performance sont la plupart du temps reliés à la réponse temporelle et à la précision en régime permanent. Les grandeurs classiques à mesurer peuvent être :

- le facteur d'amortissement,
- la pulsation propre équivalente,
- l'erreur statique,
- le temps de montée, etc.

Ces grandeurs peuvent alors être traitées par le DPU, ceci de plusieurs manières [1].

D'autre part, la physique du problème peut amener l'expert à prendre en compte des variables qui ne sont pas quantifiées dans la boucle de réglage. On peut citer par exemple la consommation de carburant, la nervosité d'une variable de commande ou d'un état, l'efficacité d'un freinage, etc. Il est clair que ces grandeurs sont plus ou moins directement reliées aux indices de performances vus auparavant, mais elles sont souvent plus « parlantes » pour l'utilisateur, et donc plus utilisées. La possibilité offerte par la supervision, d'intégrer et de traiter de tels indices, va être un avantage important par rapport aux techniques adaptatives classiques.

### 2.2.2. Modèle de référence

Le concept de modèle de référence est largement utilisé en commande adaptative. Le principe repose sur la minimisation de l'erreur entre la sortie du processus à

commander et celle d'un modèle de référence en boucle fermée. En commande supervisée, le critère de minimisation n'est pas explicitement spécifié. On considère plutôt que les règles d'inférence expertes se chargent de la minimisation. Bien entendu, il ne faut attendre aucune optimalité de cette méthode, mais simplement l'assurance d'une convergence.

### 2.2.3. Identification du système

L'identification du modèle du procédé à commander est un outil important en commande adaptative indirecte. Dans le cas de la supervision floue, bien qu'il soit possible d'utiliser la même technique, on se contente souvent d'une estimation grossière de certaines grandeurs représentatives du système bouclé. Dans ce cas, la précision avec laquelle sont estimées ces grandeurs doit être choisie au préalable par l'expert.

## 2.3. Processus de prise de décision

La tâche de l'IPU est de prendre une décision en utilisant, dans notre cas, la théorie de la logique floue. L'IPU est donc défini comme un système expert flou qui comporte, un certain nombre de règles, un ensemble d'expressions symboliques (ensembles flous) qui seront utilisées dans la base de règles, et un algorithme d'inférence.

On remarquera cependant que l'IPU n'est pas limité à la logique floue, mais peut comprendre toute autre technique de prise de décision. Généralement, la mise en place de l'IPU se fait en plusieurs étapes :

- 1) détermination du type d'action qui devra être prise par le superviseur.
- 2) choix des variables du système bouclé qui devront être adaptées.
- 3) détermination des informations d'entrées nécessaires pour définir les règles expertes.
- 4) définition de la base de connaissance et de l'algorithme de prise de décision.

Les deux premières étapes dépendent du système étudié. La troisième étape concerne le DPU. La dernière étape fait appel à la technique de la logique floue.

## 2.4. Système à base de règles floues

La description suivante des systèmes à base de règles floues (SF) sera nécessairement brève et générale. Un traitement du sujet plus complet peut se trouver dans [2] par exemple. Un SF peut être considéré comme un système expert basé sur le concept du *raisonnement flou*. Dans un SF, la base de connaissance est représentée par des règles de type SI-ALORS. La plupart des applications en commande, utilisent des SF à entrées et sorties numériques. Afin d'évaluer une base des règles floues, il est d'abord nécessaire de transformer l'entrée numérique en une valeur symbolique ou bien linguistique, qui sera traitée par une logique de décision dans une unité d'inférence. Enfin, le résultat de cette inférence doit être retransformé en une sortie numérique. En s'inspirant de la littérature anglophone, ces étapes sont appelées respectivement la *fuzzification*, l'*inférence* et la *defuzzification*. Ceci est le

schéma de calcul classique, qu'on trouve aujourd'hui dans la plupart des contrôleurs à base de la logique floue. On note ici, qu'il est également possible d'utiliser des SF à entrées symboliques, permettant de prendre en compte une certaine imprécision ou incertitude sur l'entrée.

Pour définir un SF, il est d'abord nécessaire de choisir les variables d'entrée et de sortie, et de convenir pour ces variables d'un vocabulaire, c'est-à-dire de labels linguistiques. C'est le principe des *variables linguistiques*, qui associe à des variables physiques des valeurs linguistiques. Typiquement, on choisit des valeurs comme *négatif grand (NG)*, *positif petit (PP)*, etc. Ces labels linguistiques sont représentés par des *ensembles flous* définis par leur fonction d'appartenance. Ces dernières associent un degré d'appartenance entre 0 (non appartenance) et 1 (appartenance totale) à l'ensemble des valeurs numériques admissibles (univers de discours). Le choix de la fonction d'appartenance est arbitraire. Souvent on utilise la courbe en cloche ou une fonction trapézoïdale. La figure 2 montre un exemple de fonctions d'appartenance pour la seconde application, qui sera vue plus loin. Les valeurs linguistiques définies pour les variables d'entrée et de sortie peuvent être utilisées pour formuler la base de règles du SF. Une règle typique utilisée dans le superviseur du système de freinage (voir seconde application), sera par exemple :

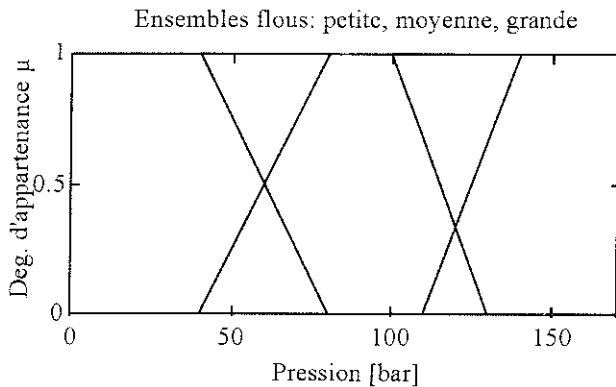


Fig. 2. - Fonction d'appartenance.

SI pression est grand ET écart en vitesse est négatif grand  
ALORS variation de la sortie est négative grande.

Dans le cas général, une règle dans un SF à multi-entrées et mono-sortie, avec  $n$  prémisses  $P_i^j$ , se présente sous la forme :

$$\text{Règle}^{(j)} : \text{SI}( P_1^j \text{ et } P_2^j \text{ et } \dots \text{ et } P_n^j ) \text{ ALORS } Y^j$$

La partie SI est appelée l'antécédent, et la partie ALORS est appelée la conséquence. Les prémisses  $P_i^j$  et la conséquence  $Y^j$  sont des expressions linguistiques de la forme : « $x_i$  est  $a_i$ » et « $y$  est  $b$ » respectivement. Les  $x_i$  sont les variables (linguistiques) d'entrée,  $y$  est la variable de sortie,  $a_i$  et  $b$  sont des labels linguistiques. Les règles du SF définissent donc une relation fonctionnelle entre les entrées et la sortie. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer des règles floues. Ces méthodes sont basées sur la traduction de l'implication  $A \rightarrow B$  en une relation floue. L'algorithme qui a été utilisé dans les

applications suivantes est basé sur la *fuzzification singleton*, la composition *max-min*, l'inférence *minimum*, et la defuzzification d'après la méthode du centre de gravité, aussi connue comme méthode de Mamdani.

### 3. APPLICATION À L'ARRÊT DE LA PROCÉDURE D'ATTERRISSAGE

Cet exemple concerne une procédure particulière relative à l'atterrissage automatique d'un avion cargo de type AIRBUS [3]. Pour ce type d'appareil, la combinaison de deux facteurs peut amener à une saturation de la gouverne de profondeur  $\delta_m$ . Le premier de ces facteurs est la position verticale du centre de gravité, naturellement importante pour un avion cargo. Le second est l'assiette  $\Theta$  de l'avion. On peut montrer, d'après la mécanique du vol, que la combinaison d'un centrage haut, et d'une assiette importante, diminue la stabilité de l'avion, et nécessite un braquage de gouverne d'autant plus important pour recouvrer la stabilité [3].

Ceci peut jouer un rôle important lors de la procédure d'urgence qui consiste à rompre la procédure d'atterrissage automatique (présence d'un obstacle sur la piste par exemple), et à redécoller immédiatement. Lors de cette manœuvre, le pilote doit utiliser toute la puissance des moteurs, afin que l'avion reprenne de la vitesse et remonte. Lorsque l'avion commence à prendre de l'altitude, l'incidence augmente et varie de façon contraire à l'augmentation de la vitesse (pour un avion naturellement stable), jusqu'au point où cette dernière commence à chuter. La poussée  $\pi$  étant maximale et donc fixe, la vitesse de l'avion sera pilotée par le braquage de la gouverne de profondeur. Selon la position du centre de gravité par rapport au foyer de l'avion, le braquage nécessaire pour maintenir la vitesse peut devenir important, voir atteindre sa valeur maximale possible (de l'ordre de  $15^\circ$ ). Il peut s'en suivre une perte de gouvernabilité.

La procédure normale pour éviter la saturation de la gouverne est de réduire la poussée lorsque la gouverne s'approche de la saturation. Cependant, un pilote n'est pas habitué à réduire la poussée lorsque la vitesse diminue (puisqu'il associe une réduction de poussée à une perte de vitesse). C'est à ce niveau que peut intervenir le superviseur. Son rôle sera donc de réduire la poussée, ceci en prenant en compte plusieurs critères :

- la réduction de la poussée doit être assez importante pour éviter la saturation de la gouverne, mais relativement limitée, afin que la poussée disponible resté la plus grande possible.
- le superviseur devra agir avant que la gouverne ne sature, ceci pour éviter une réduction brusque de la poussée (et donc une perte de pente rapide).
- l'assiette maximale de l'avion pendant la manœuvre est fixée à  $20^\circ$  (au delà l'avion peut devenir instable, surtout si la position verticale du centre de gravité est importante). Dans le cas où cette limite est atteinte, la réduction de la poussée doit être accompagnée d'une augmentation de la vitesse commandée.

Le fonctionnement du superviseur est basé sur la comparaison entre le comportement de l'avion et un

modèle de référence, qui fournit  $\Theta_{mod}$ ,  $\delta_{mod}$ , et  $q_{mod}$  ( $q_{mod} = d\Theta_{mod}/dt$ ). Plus précisément, le superviseur a trois entrées [4] :

- l'écart entre l'assiette mesurée en vol et celle du modèle  $e_1 = \Theta - \Theta_{mod}$ .
- la variation de l'écart  $\Delta e_1 = q - q_{mod}$ .
- l'écart entre le braquage commandé en vol et celui du modèle  $e_2 = \delta_m - \delta_{mod}$ .

Les sorties sont au nombre de deux :

- la variation de poussée  $\Delta\pi$ .
- la variation de vitesse commandée  $\Delta V_{com}$ .

Les fonctions d'appartenance sont de type triangulaire avec trois ou cinq valeurs suivant les variables. Les règles d'inférences (une douzaine) ont été définies à partir des principes suivants donnés par les experts (le pilote et l'ingénieur automatique) :

- 1) réduire la poussée si le braquage commandé dépasse la valeur issue du modèle.
- 2) réduire la poussée si l'assiette dépasse la valeur issue du modèle et si le braquage est près de sa limite.
- 3) augmenter la vitesse commandée si l'assiette dépasse la valeur issue du modèle et si le braquage est supérieur à sa limite.
- 4) ne rien faire si l'assiette et le braquage sont inférieurs à leur valeur limite.
- 5) ne rien faire si l'écart d'assiette reste constant.

Les résultats de simulation avec et sans superviseur, sont montrés sur la figure 3. Pour cette simulation, le centre de gravité a été « placé » à sa position verticale maximale, et à sa position horizontale la plus arrière. On peut observer que sans supervision, l'avion étant instable, on aboutit à une saturation de la gouverne, alors qu'avec le superviseur, cette situation est évitée.

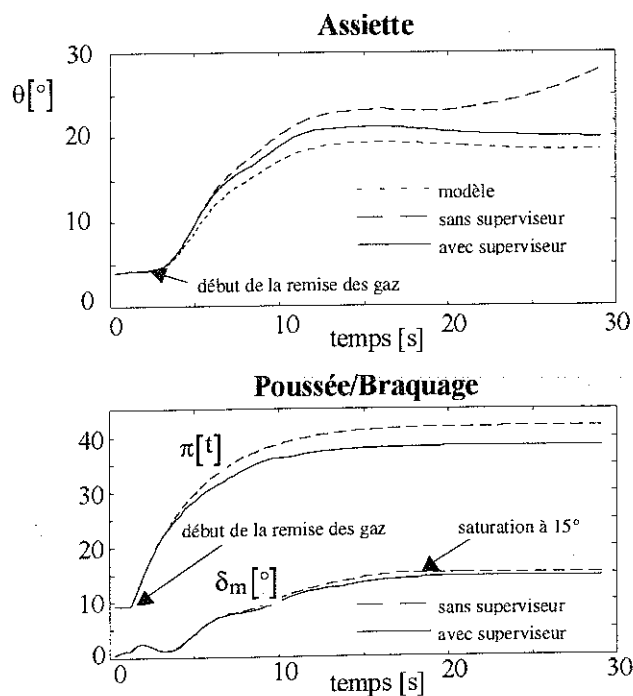


Fig. 3. - Remise des gaz.

#### 4. APPLICATION AU FREINAGE DES AVIONS DE TRANSPORT

Le freinage de l'A320/321 est contrôlé numériquement par un système anti-dérapage (ABS). Son rôle est d'éviter un blocage des roues et d'assurer un freinage performant, notamment une distance de freinage réduite [5] [6]. Les paramètres du régulateur sont « optimisés » par expérience, mais ne peuvent donner satisfaction pour toutes les natures de piste d'atterrissage rencontrées. Le problème principal provient de la non-linéarité forte de la relation entre la force de freinage (liée à l'état de la piste), et le couple appliqué aux freins.

Un paramètre important pendant le freinage est le **coefficient d'adhérence**  $\mu$  : il dépend principalement de l'état de surface de la piste. Un autre paramètre est le **glissement**  $g$ , défini comme la différence entre la vitesse de l'avion et celle des roues. On peut alors tracer la caractéristique de l'adhérence en fonction du glissement  $\mu(g)$ . La figure 4 donne plusieurs exemples de courbes obtenues sur des pistes différentes. Toutes les courbes partent de  $\mu = 0$  et  $g = 0$ , pour arriver à un maximum. Au delà, le coefficient d'adhérence diminue.

Lorsque le pilote déclenche un freinage après avoir touché le sol, la pression de freinage augmente, et le point de fonctionnement sur la caractéristique  $\mu(g)$  se déplace depuis l'origine vers son maximum. Le glissement continue d'augmenter, et dépasse le maximum de la courbe au bout d'un certain temps. Le gradient de la caractéristique devient alors négatif, amenant à une instabilité, d'où blocage (glissement de 100%). Celui-ci est détecté par une décélération brusque de la roue. Le système ABS relâche alors très rapidement la pression de freinage, ramenant le point de fonctionnement à l'origine de la caractéristique. Ce cycle se reproduit alors, et on peut ainsi compter jusqu'à une dizaine de blocages-déblocages durant un freinage.

Le régulateur ABS est réglé pour conserver le glissement constant (la consigne de glissement se situe aux alentours de 12%). Ce choix est le résultat du compromis entre le non blocage des roues ( $\frac{\partial\mu}{\partial g} > 0$ ), et  $\mu$  maximum (freinage « optimal »). Pour des pistes humides ou verglacées, cette consigne se trouve sur la partie stable de la caractéristique, et près du maximum. Par contre,

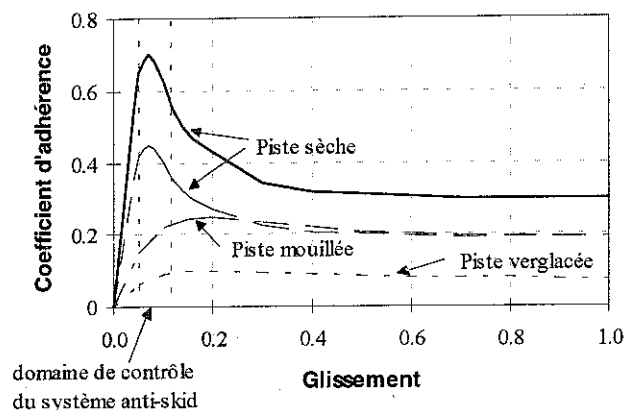


Fig. 4. - Coefficient d'adhérence.

pour une piste sèche, ce point se trouve sur le côté instable, et conduit donc au comportement cyclique évoqué précédemment.

Dans ce contexte, le rôle de la supervision va être d'adapter la valeur du glissement de consigne, en fonction de l'état de la piste. Concrètement, le superviseur calculera un facteur correctif qui sera ajouté à la consigne de glissement initiale de l'ABS. Il ne comporte pas de DPU explicite, la sortie étant directement évaluée à partir des entrées mesurées. En fait, l'estimation de l'état de la piste est implicitement réalisé dans la base de règles de l'IPU.

Le superviseur a trois entrées :

- la pression de freinage  $P$
- l'écart entre la vitesse de référence et la vitesse roue  $\Delta v$
- la variation de cet écart  $\Delta \dot{v}$

La sortie est la variation de la consigne de glissement  $\Delta \dot{g}$ . La base de règles est issue d'une stratégie d'adaptation définie par les experts du système de freinage. Ses principes sont les suivants :

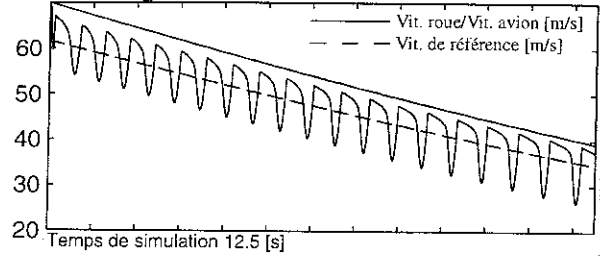
- 1) réduire la consigne rapidement quand un blocage est détecté. Le point de fonctionnement se trouve alors sur la partie instable de la caractéristique.
- 2) augmenter la consigne légèrement quand le système est stabilisé. On cherche à se rapprocher du maximum de la caractéristique.
- 3) augmenter la consigne rapidement quand le système est stable et quand l'adhérence est faible. Cela permet d'augmenter le glissement sur une piste mouillée ou verglacée.
- 4) ne rien faire sinon.

Les simulations ont été faites en prenant le modèle non-linéaire complet du système de freinage, et en considérant une piste humide. La figure 5 (dessus) montre les résultats d'une simulation sans superviseur, c'est-à-dire représentative de la situation réelle actuelle. On peut constater le comportement cyclique du phénomène de blocage. La figure 5 (dessous) donne les résultats de la simulation avec superviseur. Il apparaît clairement, qu'après avoir détecté le premier blocage de la roue, le superviseur ordonne une diminution du glissement de consigne jusqu'à 5%, d'où stabilité. A partir de là, le superviseur augmente progressivement cette consigne, pour se rapprocher de la valeur maximale d'adhérence. Le nombre de blocages est alors considérablement réduit, la distance de freinage également, et la valeur moyenne du coefficient d'adhérence est améliorée. Des simulations effectuées sur des pistes à conditions changeantes (la piste passe d'un état sec à un état mouillé par exemple), ont également permis de constater une amélioration notable des performances du freinage automatique de l'avion.

## 5. CONCLUSION

L'objectif du travail présenté dans cet article était de montrer l'utilité du concept de supervision des régulateurs par logique floue. L'idée génératrice est de tirer partie des avantages des méthodes floues, pour améliorer les performances d'un asservissement existant. D'un point de vue pratique, cette idée s'oppose au contrôle

### Freinage, ABS actuel



### Freinage, ABS supervisé

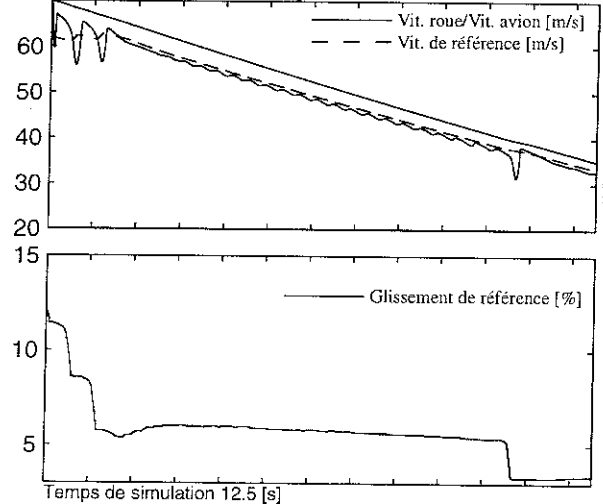


Fig. 5. - Comportement anisotrope.

flou classique par le fait qu'ici, la boucle de contrôle n'est pas modifiée, mais seulement supervisée. Cette distinction peut s'avérer très importante en ce qui concerne les applications industrielles.

D'une manière générale on peut constater que la logique floue doit être considérée comme un outil permettant d'intégrer des informations et des connaissances qualitatives dans un calculateur embarqué. Ainsi, ce type de données est susceptible d'offrir des nouvelles fonctions pour la conception des systèmes de commande futurs.

Nous avons montré, à travers deux exemples, comment ce concept peut effectivement être appliqué à des problèmes aéronautiques concrets. Dans chaque cas, la synthèse du superviseur a été faite en essayant de minimiser la charge de calcul. Nous avons ainsi pu montrer que les performances peuvent être améliorées de manière sensible, ceci en intégrant la connaissance d'un utilisateur de manière très simple. Concrètement, en ce qui concerne la supervision du freinage de l'A320, le superviseur est actuellement implanté dans un calculateur ABS et testé sur simulateur de vol, pour validation. D'un point de vue plus théorique, une étude est en cours, pour étendre la fonction du superviseur à l'interaction entre le pilotage au sol et le régulateur ABS.

## RÉFÉRENCES

- [1] MORANT F., MARTINEZ M., PICO J. Supervised adaptive control, publié dans *Application of artificial intelligence in process control*, Pergamon Press, 1993.

- [2] OFTA (Observatoire Français des Techniques Avancées) Logique Floue, Série Arago, Masson, 1994.
- [3] EWERS B. Applicabilité de la logique floue à la commande automatique du vol, *Diplomarbeit*, ENSICA, Juillet 1993.
- [4] EWERS B., BORDENEUVE-GUIBÉ J., IRVOAS J. Intelligent supervision of an automatic flight control system, *IMACS International Symposium on Signal Processing, Robotics and Neural Networks*, Villeneuve d'Ascq, Avril 1994.
- [5] KIENCKE U. Real time estimation of adhesion characteristic between tyres and road, *Proc. of the 12th IFAC Triennial World Congress*, Sidney, 1993.
- [6] LOEW J. Supervision d'un système d'anti-dérapage d'un avion de type A320/321, *Projet de Fin d'Etudes*, ENSICA, Juin 1995.
- [7] ÅSTRÖM K.J., ANTON J.J., ARZEN K.E. Expert control, *Automatica*, 1986, 22, 277-286.
- [8] MATSUMOTO N. et al. Expert Antiskid System, *Proc. of the IECON*, 1987, 810-816.
- [9] MENDEL J.M. Fuzzy logic systems for engineering : a tutorial, *Proc of the I.E.E.E.*, 1995, 83, 345-377.
- [10] WANG L.X. Adaptive fuzzy systems and control : design and stability analysis, *Prentice-Hall*, Eaglewood Clifs, NJ, 1994.
- [11] STEINBERG M. Potential role of neural networks and fuzzy logic in flight control design and development, *Proc. of the AIAA Aerospace Design Conference*, Irvine, Ca, 1992.
- [12] EWERS B., BORDENEUVE-GUIBÉ J., GARCIA JP., PIQUIN J. Expert supervision of an anti-skid control system of a commercial aircraft, *Proc. of the IEEE Conference on Control Applications*, Dearborn, MI, USA, Septembre 1996.
- [13] EWERS B., BORDENEUVE-GUIBÉ J., GARCIA JP., Piquin J. Expert supervision of conventional control systems, *Proc. of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, New Orleans, USA, Septembre 1996.
- [14] AGUILAR-MARTIN J., Qualitative Control, Diagnostics and Supervision of Complex Processes. *Mathematics and Computers in Simulation*, n°36, 1994, pp. 115-127.
- [15] BOUCHON-MEUNIER B., La Logique Floue, Collection «que sais-je?», *Presses Universitaires de France* Paris, France, 1994.
- [16] DUBOIS D., PRADE H., Fuzzy Sets and Systems : Theorie and Applications. New York, *Academic Press*, 1980.
- [17] MAUER G., A Fuzzy Logic Controller for an ABS Braking System. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 3, n°4, November 1995, pp. 381-388.