



HAL
open science

CONTRIBUTION DE LA MODELISATION FLOUE A LA CONCEPTION EN GENIE ELECTRIQUE

Florence Francois

► **To cite this version:**

Florence Francois. CONTRIBUTION DE LA MODELISATION FLOUE A LA CONCEPTION EN GENIE ELECTRIQUE. Energie électrique. Institut National Polytechnique Grenoble (INPG), 1994. Français. NNT: . tel-01907731

HAL Id: tel-01907731

<https://hal.science/tel-01907731>

Submitted on 29 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

présentée par

Florence FRANCOIS

pour obtenir le grade de DOCTEUR

de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

(Arrêté ministériel du 30 Mars 1992)

Spécialité Génie Electrique

**CONTRIBUTION DE LA MODELISATION FLOUE
A LA CONCEPTION EN GENIE ELECTRIQUE**

le 13 Décembre 1994

Composition du Jury :

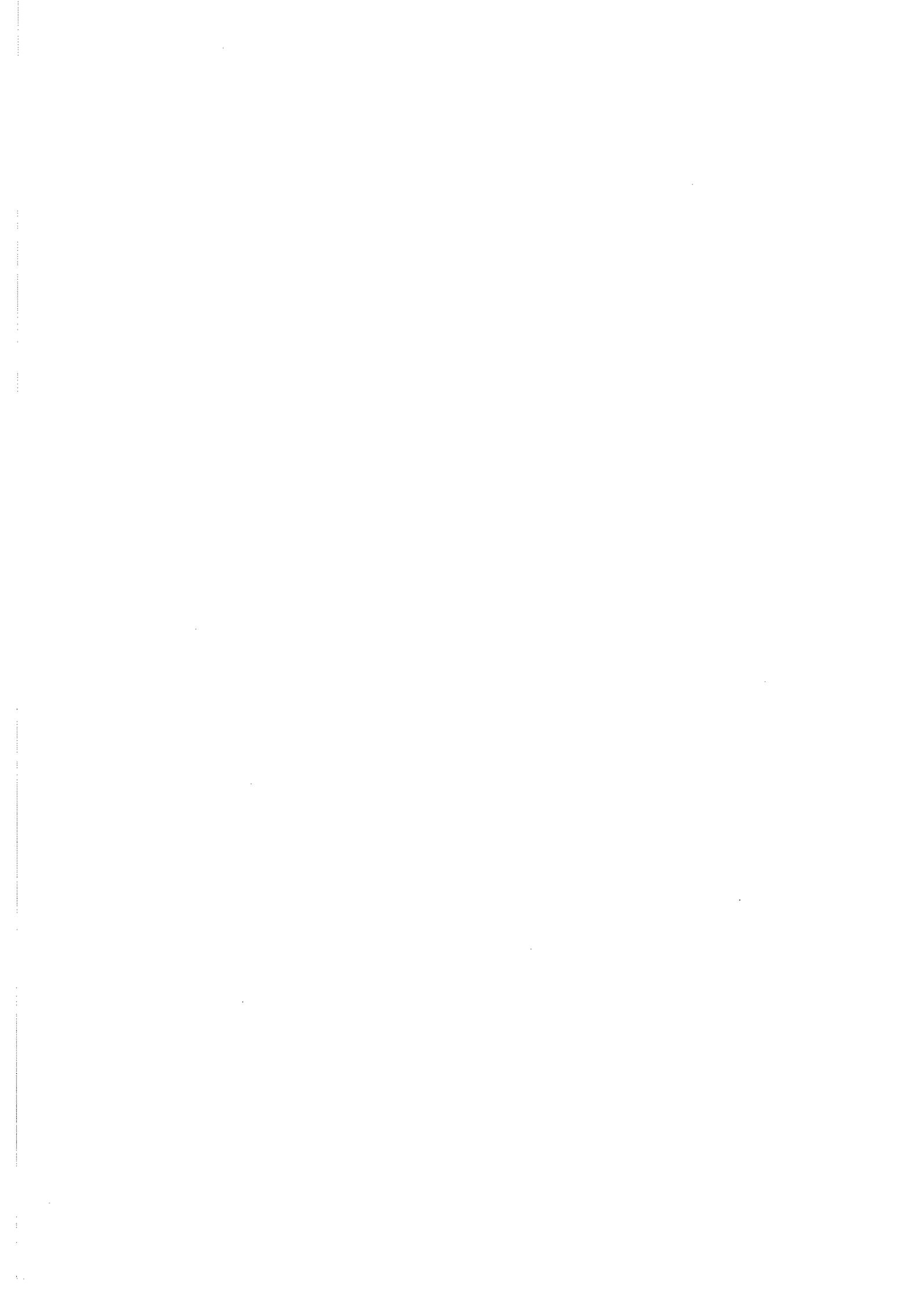
Monsieur	H. CURIEN	Président
Messieurs	B. DUBUISSON	Rapporteur
	N. GIAMBIASI	Rapporteur
	M. LALANDE	
	J.C. SABONNADIERE	
	J. BIGEON	

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble



*"Ne désespérez jamais,
faites infuser davantage !"*
Henri MICHAUX

Bonne lecture!
et en espérant que cela te
poussera à "éclaircir" davantage
le flou, en ma compagnie (bien sûr!).
Amicalement.
J.B.



Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements à :

- Monsieur le Ministre Hubert CURIEN, Président du CERN qui m'a fait l'honneur et l'amitié de présider ce jury.
- Monsieur Bernard DUBUISSON, Directeur adjoint du département du S.P.I. du CNRS et Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, qui a accepté d'être rapporteur de cette thèse.
- Monsieur Michel LALANDE, Directeur du Centre de Recherche et de Développement du groupe MOULINEX, qui a accepté de participer à ce jury.
- Monsieur Norbert GIAMBIASI, Professeur à l'Université de Marseille, qui a accepté d'être également rapporteur de cette thèse.
- Monsieur Jean-Claude SABONNADIÈRE, Professeur à l'ENSIEG et Directeur du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de cette belle aventure, pour son soutien et son amitié, et pour avoir accepté de participer à ce jury.
- Monsieur Jean BIGEON, Chargé de Recherche au CNRS, pour tout ce qu'il m'a apporté pendant ces quatre années, pour ses conseils toujours si judicieux et le punch qu'il sait insuffler à notre groupe. Merci d'avoir accepté d'encadrer cette thèse, qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.
- Messieurs Didier DUBOIS et Henri PRADE, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail et tous les encouragements et conseils qu'ils m'ont prodigués au cours de nos conversations téléphoniques.

A tous les membres de la famille I.A. pour l'ambiance magnifique qu'il y règne, à tous les "plate-formiens" et à tous les habitants de la planète L.E.G. que j'ai côtoyés de près ou de loin : Je vous remercie pour votre accueil et les bonnes années passées ensemble.

Merci à Régis DARNAULT, pour ses "bons plans" parfois tellement limites (!), pour sa générosité et sa joie de vivre, à Eric ESCANDE, pour sa pondération si rassurante et son amitié sûre et sincère, à Laurent GERBAUD, pour sa douceur, sa gentillesse et son soutien toujours présent.

Merci à deux humanistes de la plate-forme, Marie-Thérèse LOUBINOUX et Bruno MALLET, pour leur soutien constant et sûr, leur amitié.

Merci à tous mes amis, de la montagne ou de la mer, qui m'ont soutenue durant ces années de labeur ...

Enfin, je remercie mes parents, qui, à force d'Amour, d'intelligence et de confiance, ont réussi à faire de moi quelqu'un d'heureux, d'épanoui, de libre ... merci de m'avoir si bien lancée dans la vie.

SOMMAIRE

Introduction.....	1
Chapitre I : Problématique de la préconception en électrotechnique	4
A. Conception dans le processus industriel.....	6
1. Vie d'un produit industriel.....	6
2. Pluridisciplinarité de la conception.....	7
B. Analyse succincte de la phase préliminaire de conception	9
1. Aspects de la préconception	9
2. Apport des nouvelles techniques	12
3. Approche système expert.....	13
C. Problématique des connaissances imprécises et/ou incertaines dans le processus de préconception.....	14
1. Imperfection de l'information	15
a. Imprécision	16
b. Incertitude.....	16
c. Défi	16
2. Manques actuels	17
3. Conclusion.....	19

Chapitre II : Modélisation de l'imprécision et de l'incertitude 20

A. Présentation générale de différentes méthodes..... 21

1. Calcul d'erreur 21

2. Théorie des probabilités..... 22

a. Rappels 23

b. Analyse critique 24

3. Théorie des ensembles flous 27

a. Logique floue 27

b. Théorie des possibilités 30

B. Conclusion..... 31

Chapitre III : Présentation du modèle élaboré pour une conception floue 33

A. Aspects stratégiques 35

1. Stratégie globale 36

2. Etapes importantes du cycle de base..... 40

a. Agrégation 40

b. Choix de la valeur retenue et la défouification 41

B. Connaissance déductive 45

1. Différents types de connaissance déductive 45

a. Connaissance certaine à partir de données précises 45

b. Connaissance incertaine à partir de données floues ou non 46

2. Interprétation et représentation de la connaissance déductive..... 48

3. Propagation du flou 50

a. Prémisses de règle 50

b. Conclusion de règle 52

4. Calcul flou 52

5. Cas plus particuliers 53

C. Connaissance factuelle 54

1. Analyse des besoins 54

a. Généricité des données..... 54

b. Contraintes dues au dessin 56

2. Langage à objets.....	57
a. Présentation générale	57
b. Méthodologie de décomposition objets.....	59
Chapitre IV : Calcul flou.....	63
A. Présentation générale	64
1. Données	64
2. Opérations.....	65
B. Présentation des méthodes existantes les plus usuelles	65
1. Méthode par convolution sup-min	65
2. Méthode par fonctions paramétrées (L/R).....	69
3. Méthode dite α -coupée	73
C. Méthode α-coupée améliorée	75
1. Représentation des données	75
a. Type de discrétisation.....	75
b. Définitions.....	76
2. Calculs.....	78
3. Module de calculs flous	81
Chapitre V : Réalisation informatique et résultats	83
A. Connaissance factuelle	84
1. Vocabulaire	84
2. Structure générale.....	86
a. Lien inverse	87
b. Méthodes.....	87
B. Connaissance déductive	88
1. Présentation générale	88
2. Aspects spécifiques au flou.....	90
a. Evaluation de la prémisse d'une règle floue	91
b. Agrégation	91
C. Stratégie	92
1. Présentation	92

2. Méthodes stratégiques	93
D. Session et résultats	94
1. Acquisition des données primitives : le cahier des charges	95
2. Raisonnement	95
3. Résultats	96
Conclusion.....	99
Bibliographie.....	102
Annexes	109
Annexe 1 : La chambre de coupure d'un disjoncteur.....	110

- Introduction -

Depuis toujours, l'Homme ne cesse d'échafauder des plans, de concevoir, de bâtir. Grâce à ce travail incessant, autant manuel qu'intellectuel, il s'est modelé un environnement qu'il fait évoluer au gré de ses conceptions. Chaque conception satisfait un besoin mais en fait naître d'autres, rendant l'utilisateur plus exigeant et donc, obligeant le concepteur à constamment améliorer ou inventer de nouveaux produits. Cette remise en cause constante permet au concepteur d'acquérir de l'expérience et l'oblige à utiliser au mieux les ressources dont il dispose. Il devra aujourd'hui avoir recours aux techniques modernes, comme l'informatique par exemple.

Réaliser des systèmes informatiques pour aider le concepteur dans sa démarche n'est pas chose aisée, car cela nécessite de prendre en compte tout l'environnement de la conception, les liens très forts qui unissent concepteur et démarche de conception et qu'il est difficile d'appréhender.

Il faut pour cela des outils performants alliés à une analyse sérieuse de toute la démarche de conception. C'est ce que nous allons tenter de faire dans un cadre précis, celui du génie électrique. Nous nous attacherons principalement aux problèmes nés de l'imprécision des données ou de certains modèles utilisés, et de l'incertitude inhérente à la méconnaissance de certains phénomènes. Ces deux notions sont toujours présentes dans l'ensemble du processus de conception, mais sont rarement prises en compte en tant que paramètres actifs de cette conception.

Après avoir replacé la problématique de notre activité dans le cadre général de la conception et avoir justifié les options informatiques choisies (chapitre I), nous verrons comment nous pouvons pallier le problème de l'imperfection de l'information (chapitre II).

Le choix étant fait d'un système expert couplé à un langage objet pour la partie informatique et de la théorie des possibilités pour la gestion de l'imprécision et de l'incertitude, nous exposerons, au chapitre III, le système que nous avons mis en oeuvre.

Dans le chapitre IV, nous reviendrons sur un point important de notre travail, la réalisation d'une arithmétique floue.

Enfin, avant de conclure, nous présenterons, au chapitre V, l'application que nous avons réalisée sur la conception de la chambre de coupure d'un disjoncteur.

- Chapitre I -

Problématique de la préconception
en électrotechnique

De nombreux ouvrages et publications ont déjà été écrits sur la conception.

Les principaux axes de recherche concernent la façon de mettre en oeuvre un modèle formel. En effet, l'homme, pour raisonner, a besoin d'un niveau d'abstraction qu'il ne trouve pas dans le monde réel.

Il invente donc un monde formel dans lequel il pourra raisonner, échafauder des hypothèses, émettre des pistes de solutions, les remettre en cause, recommencer, etc... (cf. figure 1), jusqu'à trouver une (ou plusieurs) solution(s) satisfaisante(s) au regard de certains critères. Il pourra alors envisager un retour au monde réel, armé de la (les) solution(s) correctement élaborée(s).

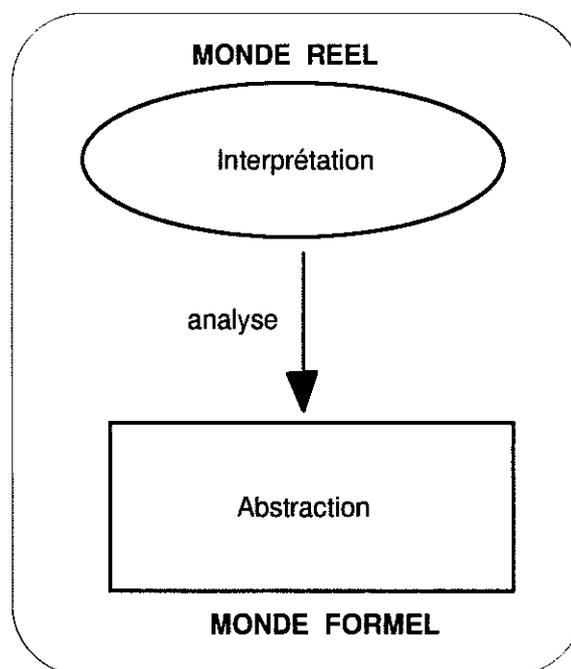


Figure 1 : Dualité Monde réel - Monde formel.

Cependant, avant de plonger dans le monde formel, il faut correctement analyser le monde réel. En conception, il faut surtout :

- 1. Etudier quelle information peut et doit être formalisée,**
- 2. Comment la formaliser.**

Ainsi, comprendre le cheminement de la pensée humaine est indispensable pour réaliser un passage correct dans le monde formel, mais aussi pour analyser les liens qui unissent le concepteur et sa conception.

Cette démarche est plus ou moins complexe selon que l'on souhaite englober plus ou moins de paramètres (autres que physiques). Par exemple, si la conception consiste seulement à dessiner un objet, le processus ne s'attachera à considérer que les aspects purement géométriques de l'objet.

Si par contre, la conception tente de formaliser plus qu'une simple entité physique, alors la démarche est bien plus complexe et nécessite de prendre en compte de nombreux autres aspects..

A. Conception dans le processus industriel

Ainsi, pour la conception d'un produit industriel par exemple, la gestation est longue et difficile. Le cheminement entre le recensement d'un besoin (industriel ou domestique) et la mise en service effective nécessite un temps non négligeable et de multiples étapes : c'est le développement du produit.

1. Vie d'un produit industriel [SAB 93]

Les deux principales étapes de la mise en oeuvre d'un produit (cf. figure 2) sont la conception et la fabrication car elles caractérisent la qualité et le coût du produit. Cependant, ces deux étapes ne constituent qu'une partie de toute la démarche de conception.

En effet :

- Le cycle de développement d'un produit débute avec le recensement d'un besoin, que ce soit par une étude de marché ou de démarchage, ou le souhait d'un client.
- La définition conceptuelle du produit conduit alors à établir le cahier des charges qui va regrouper l'ensemble des spécifications qui doivent être satisfaites par le produit.
- Ensuite, l'étape de conception proprement dite se déroule. Elle est complexe et peut elle-même être décomposée en plusieurs phases. On

peut notamment citer la mise en oeuvre d'hypothèses, la simulation, les modifications, l'établissement de la documentation de conception pour la fabrication relative au produit.

- Après le stade d'acquisition de la documentation, commence la fabrication. Dans cette phase sont gérés les problèmes de mise en oeuvre de diverses technologies, de stocks, d'ateliers etc...
- Enfin, les étapes de maintenance et de modifications interviennent une fois le produit fabriqué et mis en service.

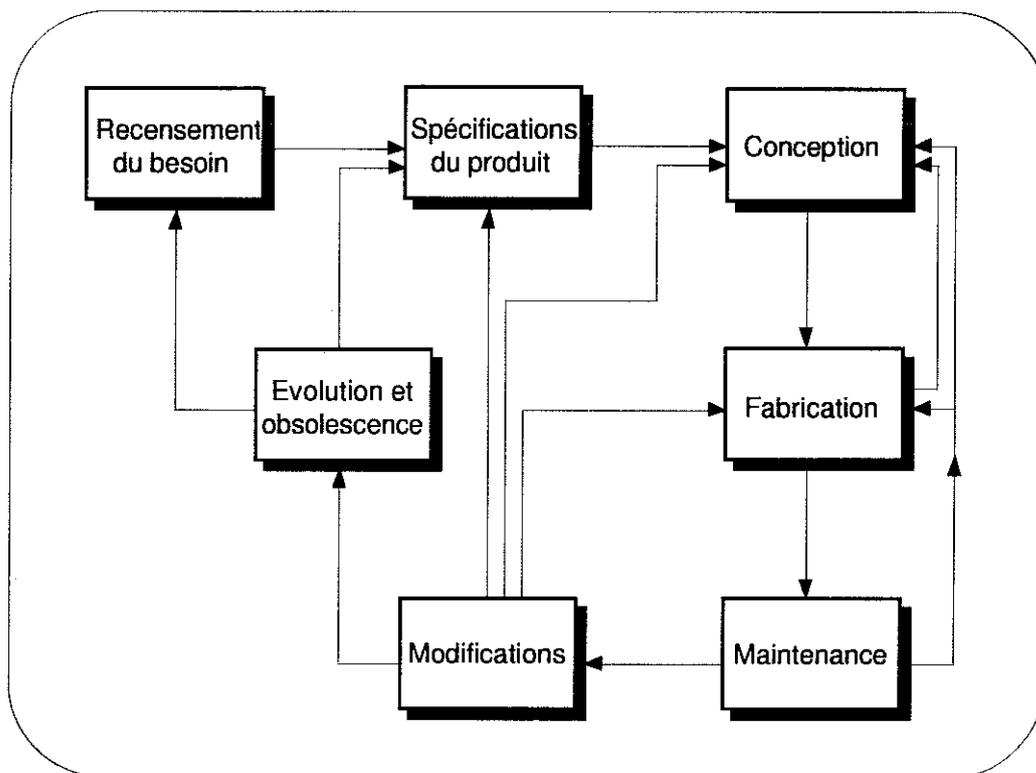


Figure 2 : Différentes étapes de la vie d'un produit industriel.

Cette démarche est répétitive car le produit évolue avec le temps tant au niveau de l'usure, que de l'obsolescence ou des besoins.

2. Pluridisciplinarité de la conception

La description des différentes phases du cycle de développement d'un produit fait clairement apparaître l'aspect pluridisciplinaire de la conception.

En effet, la conception d'un appareil électrique peut nécessiter plusieurs compétences au sein même du génie industriel. Ainsi, la conception d'une machine électrique fait appel à des connaissances d'électricité, de mécanique et de thermique mais aussi à des compétences dans d'autres domaines comme peut le montrer la figure 3. Par exemple, si l'appareil électrique à concevoir est regardé quotidiennement par l'utilisateur, un soin tout particulier sera apporté à son ergonomie.

Ainsi, l'élaboration du cahier des charges est un véritable travail d'équipe qui fait appel à plusieurs métiers, chacun intervenant dans un domaine bien spécifique, l'un étant plus porté sur l'aspect financier du projet, l'autre, plus attentif aux problèmes d'ergonomie, etc...

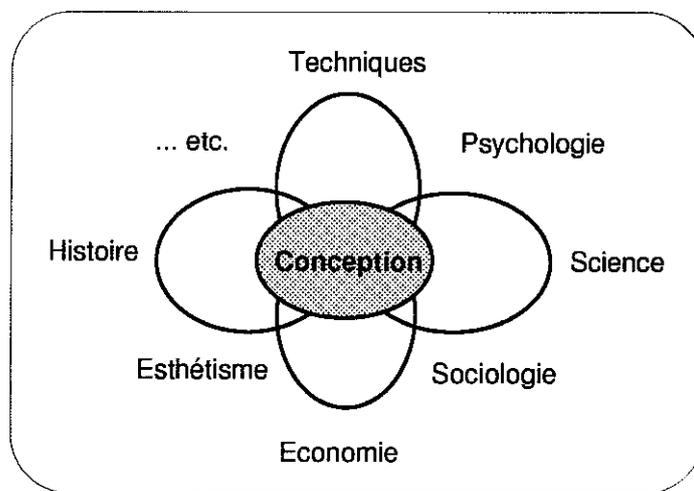


Figure 3 : Disciplines gravitant autour de la conception.

On voit déjà à travers toutes ces aspects, que le travail de conception est complexe. Plus l'ingénieur responsable de cette conception aura des outils performants, plus le processus de conception sera rapide et donnera des produits compétitifs et répondant parfaitement aux besoins.

Ces outils doivent l'aider pour la création et la mise au point du produit. Ils doivent proposer des solutions et être à même de les expliciter.

Notre problématique se situera au niveau de la préconception, dans la phase incontournable du prédimensionnement.

B. Analyse succincte de la phase préliminaire de conception

Nous appellerons préconception, la phase préliminaire de conception.

1. Aspects de la préconception

L'étape de préconception se situe en aval de la phase de compréhension du processus de conception. Elle met en oeuvre des modèles, des outils utilisables par les ingénieurs. Que ce soit en mécanique, en électrotechnique ou dans d'autres disciplines faisant appel à la conception de produits, cette démarche de préconception est souvent similaire, même si les outils sont différents (mailleurs, modeleurs, solveurs etc...) [BIG 93].

On peut aborder cette étape de diverses manières, et essayer d'en dégager 4 axes principaux :

- la conception innovante qui consiste à trouver de nouvelles structures à partir d'un cahier des charges donné,
- la conception par extrapolation où la structure du produit à concevoir ne s'écarte que de très peu d'un produit existant (cahier des charges assez semblable),
- la conception par composition qui utilise des éléments déjà conçus,
- la conception systémique qui est une approche globale dans laquelle il n'existe pas de modèle mathématique complet ou dans laquelle les modèles sont très imprécis.

Chacun de ces points est bien spécifique et ne se traitera en aucun cas de la même manière. La conception innovante, notamment, est une partie bien à part de la conception car elle fait beaucoup plus appel à la créativité qu'à l'expérience, à de nouveaux concepts plutôt qu'à des structures préexistantes. [BRU 94]

Cependant, et malgré cette diversité dans la façon d'aborder la conception, on peut tenter une description générale (figure 4) de l'approche du processus de conception dans les domaines du génie électrique [TRI 91] :

- A partir de spécifications comme les contraintes scientifiques (la valeur du champ magnétique \vec{B} doit être inférieure à 1,6 Teslas, ...), les contraintes techniques (géométrie des poinçons, normes, ...) ou les contraintes économiques (délais de livraison), le responsable-produit élabore le cahier des charges.
- Ensuite, les données extraites du cahier des charges permettent d'établir un dimensionnement approché de l'objet à concevoir. Cette étape utilise des connaissances heuristiques et/ou des calculs simples. A la fin de cette étape, la phase de génération des hypothèses permet d'évaluer une solution qui sera choisie parmi celles obtenues.
- Par la suite, une esquisse de l'objet étant faite, le concepteur utilise des outils numériques d'analyse (outils de CAO, logiciels de calculs et de simulation) qui lui permettent d'une part de contrôler le respect des spécifications et d'autre part d'optimiser partiellement certaines parties de l'objet à concevoir.
- Enfin, après diverses itérations, la vérification se fait par le test d'un prototype, ce qui peut, à nouveau, conduire à modifier certains choix initiaux.

On voit ainsi clairement que ce processus est une suite d'analyses, de tests et de modifications jusqu'à l'obtention d'une caractéristique satisfaisante.

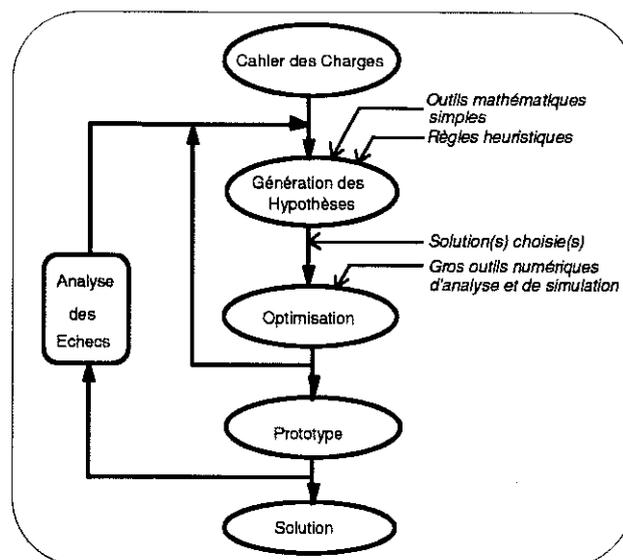


Figure 4 : Approche générale du processus de conception en électrotechnique.

Le rôle principal d'un tel système (appelé système de CAO dès qu'une partie de ces étapes est intégrée dans un programme informatique) est de gérer toutes les informations relatives à la conception et à la démarche de production, c'est-à-dire d'amener les bonnes informations aux bons endroits [ZHU 91].

Généralement, quand on veut résoudre un problème de conception, on essaie de le décomposer en autant de sous-problèmes que possible, pour arriver à des problèmes plus simples et donc plus faciles à résoudre (hypothèse de décomposabilité). Or, souvent, les problèmes de conception sont difficilement décomposables en raison des liens qui existent entre les différentes parties (hypothèse de non décomposabilité) [TRI 91] [ABE 88].

De ce fait, on s'aperçoit de plus en plus de la nécessité, dans la démarche de préconception, de tenir compte non seulement des contraintes essentiellement physiques (fournies dans le cahier des charges par exemple) mais aussi du contexte d'utilisation du produit dans sa période de conception/fabrication et dans son environnement futur (problèmes d'évolution du produit notamment).

Ainsi, on arrive à la conclusion que plus la démarche de conception évolue, plus on a besoin d'outils performants, flexibles, évolutifs, "intelligents" :

- Performants pour permettre d'intégrer un ou plusieurs modèles de conception, les contraintes technologiques, techniques, et normatives.
- Evolutifs et flexibles pour que ces connaissances puissent être exploitées, enrichies et complétées par les différents intervenants ou "métiers" tout au long du processus de conception, en se présentant dans un langage compréhensible par les interfaces homme/machine des standards du marché informatique, et tout en permettant un contrôle de cohérence des manipulations successives.
- "Intelligents" pour être capables d'aider le concepteur dans sa prise de décision, pendant la phase d'explication et dans la génération d'hypothèses judicieuses.

On tend alors naturellement vers des systèmes, certes plus gros, mais surtout plus performants et qui permettent réellement d'aider le concepteur. Pour concevoir de tels systèmes, les techniques d'algorithmiques classiques telles que l'itération, la récursivité, etc..., ne suffisent plus.

Il faut donc se tourner vers de nouvelles approches informatiques.

2. Apport des nouvelles techniques

Plusieurs possibilités s'offrent à l'étude de la conception : [TSA 91]

- la recherche opérationnelle,
- les algorithmes génétiques [SAN 92],
- les réseaux neuronaux,
- l'intelligence artificielle et les systèmes experts [DOR 89],
- etc...

Nous avons choisi l'intelligence artificielle et les vastes possibilités des systèmes à base de connaissance parce que :

- d'une part, les problèmes de conception sont faits, comme nous l'avons déjà dit, de sous-problèmes fortement imbriqués,
- d'autre part, une grande partie de la démarche de conception consiste en la prise de décisions (choix de telle ou telle valeur ou choix de telle ou telle stratégie de résolution). Plus les outils seront capables de mettre judicieusement en valeur ces décisions, plus celles-ci seront faciles à prendre pour le concepteur.
- enfin, la conception fait appel à un grand nombre de connaissances : il faut donc être capable de les gérer.

Il apparaît alors clairement, qu'en couplant la puissance des systèmes experts et la possibilité de structuration d'un langage orienté objets, par exemple, on peut obtenir des outils très bien adaptés à la conduite du processus de conception.

La différence la plus importante entre un système classique de conception et un système "intelligent" **d'aide** à la conception réside dans la structure du logiciel. La séparation entre la connaissance déclarative (le savoir) et la connaissance procédurale (le savoir-faire) est explicite dans un système expert, avec un aspect déclaratif fort, alors qu'elle est incrustée et noyée dans le code pour un système classique.

Cela rend le système plus "intelligent" car :

- plus à même de réagir,
- plus facile à faire évoluer,
- plus à même de prendre les bonnes décisions,
- plus efficace

3. Approche système expert

Il existe plusieurs types de systèmes experts dont celui représenté sur la figure 5.

D'un point de vue technique, le moteur d'inférence choisit, à un instant donné, dans la base des règles, une règle à exécuter (à déclencher). Le choix de cette règle est donné par la stratégie du système.

Cette règle, pour être exécutée, a besoin d'un certain nombre de données qui seront tirées de la base des faits.

L'exécution de la règle amènera une conclusion qui pourrait être, par exemple, de rajouter une nouvelle donnée à la base des faits.

Ensuite, une nouvelle règle sera sélectionnée, appliquée et ainsi de suite jusqu'à ne plus avoir de règles à déclencher ou de faits à considérer.

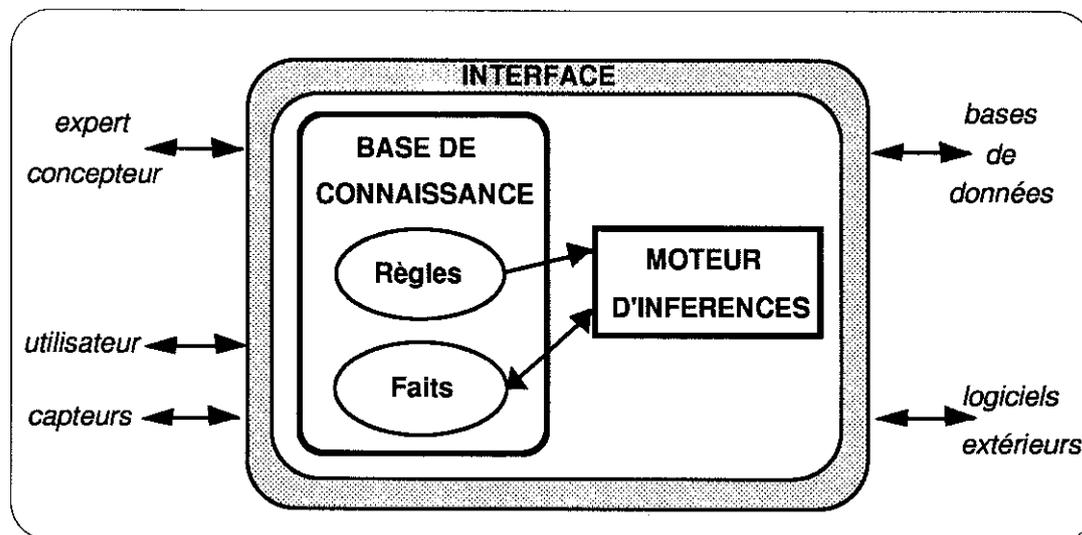


Figure 5 : Architecture d'un système de production. [HAT 91]

Comme nous l'avons déjà dit, un des intérêts des systèmes experts est de dissocier le savoir du savoir-faire de l'expert.

Le savoir représente toutes les données du problème et est représenté, dans un système expert, par la **connaissance factuelle**.

Le savoir-faire regroupe toutes les méthodes, toutes les règles de conception que peut utiliser l'expert. Il est traduit par la **connaissance déductive et stratégique**.

La connaissance déductive regroupe toutes les règles de calculs, d'optimisation, d'estimation, etc... Elle fait appel et elle agit sur les données de la connaissance factuelle.

Quant à la **connaissance stratégique**, elle pourvoit au bon déroulement du système : c'est-à-dire qu'elle regroupe l'ensemble des règles qui contrôlent le raisonnement (mode d'exécution des règles de la connaissance déductive, ordre de déclenchement de ces mêmes règles, etc...).

Même si ce processus est assez répétitif, cela étant principalement dû aux rétroactions imposées par la prédétermination de la plupart des grandeurs géométriques ou physiques, la génération en parallèle des hypothèses permet de prendre en compte l'aspect combinatoire du processus de conception, et offre ainsi à l'utilisateur un choix beaucoup plus large entre plusieurs solutions.

Cependant, dans certaines applications électrotechniques, le concepteur manipule des connaissances scientifiques empiriques entachées d'imprécision, voire incomplètes. On aborde, alors, le problème du manque d'information ou de la méconnaissance de certains phénomènes physiques (par exemple, l'arc électrique et la foudre).

Nous allons essayer d'analyser comment gérer ces lacunes et proposer un modèle conceptuel qui intègre cette notion de manque de connaissances.

C. Problématique des connaissances imprécises et/ou incertaines dans le processus de préconception

Pour réaliser le type de système présenté précédemment, un rapprochement avec les sciences cognitives semble nécessaire afin de mieux analyser et traduire le savoir-faire des experts, et de mieux comprendre et intégrer les besoins réels de l'utilisateur de ces systèmes.

Tout cela conjugué, on essaie de mieux comprendre, de mieux analyser **pour mieux concevoir**.

Cette étape passe notamment par la qualité de l'expression orale ou écrite, mais aussi et surtout par **la meilleure prise en compte de la nature** des informations rencontrées.

1. Imperfection de l'information

L'imperfection de la connaissance est notamment due à la richesse du langage naturel qui dans un seul mot peut regrouper beaucoup d'informations sous-entendues qui seront interprétées différemment selon le vécu de l'individu qui reçoit l'information.

Par exemple, l'imprécision contenue dans l'adjectif "*grand*" fera appel à une référence différente selon l'individu. Cependant, nous pensons que plus le mot utilisé sera pris dans le langage courant, plus il aura de chance d'avoir une signification large, et plus il sera imprécis.

Du point de vue du langage naturel, on peut citer trois catégories de vocables :

- les termes concernant plus particulièrement l'imprécision : des adjectifs comme "*grand*", "*beaucoup*", des adverbes comme "*approximativement*" etc...
- les termes concernant plutôt l'incertitude : "*souvent*", "*probablement*" etc...
- les autres : "*plus ... plus ...*" [DUB 92a].

La nécessité d'essayer de pallier l'imperfection de l'information provient de deux principaux facteurs : les progrès de l'électronique et l'avènement de l'informatique dans tous les bureaux d'études.

En effet, ces deux facteurs ont permis de mettre l'accent sur l'importance d'une "bonne mesure" (ceci grâce à une meilleure électronique dans les capteurs ou les appareils de mesure), et sur les problèmes de limitation de modèles (que fait-on quand on ne sait pas mettre en équation un problème ou que l'on est confronté à un phénomène physique mal connu ?).

Ces deux aspects de l'imperfection de l'information nous conduisent à prendre en compte deux concepts forts : **l'imprécision et l'incertitude**. Ces deux concepts sont parfois, voire souvent, étroitement liés, car l'imprécision est l'une des causes de l'incertitude.

a. Imprécision

L'imprécision est la notion à laquelle nous sommes le plus confrontés. Une information est considérée comme imprécise si elle s'avère incomplète, insuffisante pour l'usage qu'on voudrait en faire. C'est une notion qui dépend du contexte, c'est-à-dire qu'une information considérée comme précise dans un contexte peut ne plus l'être dans un autre contexte.

L'imprécision peut provenir du fait que le concepteur ne sait pas exactement quelle valeur sera utilisée pour chaque paramètre de conception [OTT 91][WOO 91]. Elle concerne donc le choix de différentes alternatives. Il faut déjà remarquer que cette imprécision doit diminuer pendant le processus de conception (les valeurs étant définies au fur et à mesure).

b. Incertitude

L'incertitude d'une proposition se caractérise par la difficulté, voire l'impossibilité, de calculer le degré de vérité de cette proposition, c'est-à-dire l'incapacité à dire si la proposition est vraie ou fausse.

L'incertitude peut aussi naître de la présence d'informations contradictoires qui empêchent de prendre une décision.

Elle se traduit par des mots comme "*probablement*", "*il est possible*" ...

c. Défi

Ainsi, nous pouvons penser que si nous arrivons à mieux modéliser l'imprécision et l'incertitude, il nous sera sûrement possible :

- de mieux gérer l'imperfection des modèles physiques,
- de prendre en compte l'imprécision des données,
- d'avoir une approche plus globale des phénomènes physiques mal connus et donc mal analysés,
- d'avoir une meilleure approche du langage (des experts, par exemple) :
 - ♦ pour ne plus modéliser que des connaissances duales (vraies ou fausses),
 - ♦ pour agrandir le vocabulaire utilisé (grand, beaucoup, souvent, etc...).

2. Manques actuels

Dans le champ de l'électrotechnique, les ingénieurs possèdent, avec les années d'expériences, des connaissances de leur domaine qu'il est difficile de codifier à cause de leur nature heuristique et empirique (la connaissance d'un individu est par essence heuristique). Il y a beaucoup de savoir-faire que les experts accumulent, tout au long de leur carrière, et qui demeure mal formalisé.

Nous pouvons citer quelques exemples de méthodes d'experts dans différents domaines de l'électrotechnique comme :

- en diagnostic : [AHR 93]
~~ Si la tension entre les points 13 et 14 est **normale** alors le transformateur du circuit de contrôle est **OK** ~~
- en conception : [GEN 91]
pour la conception d'un contacteur électromagnétique
~~ Pour l'ouverture des contacteurs, on peut jouer sur l'entrefer anti-rémanant afin de diminuer la force produite par l'électroaimant lorsqu'il est fermé. Les experts tolèrent une valeur allant **jusqu'à environ 10%** de la course totale ~~ (problème d'usure).
- en commande :
~~ Si le rendement est **trop faible** alors il faut **diminuer** la densité de courant ~~.
- etc ...

Or, actuellement, pour prendre en compte l'imperfection de cette connaissance, on réalise des itérations jusqu'à ce que l'on obtienne une valeur satisfaisante. Par exemple, dans la règle suivante :

~~ Si le contacteur ne s'ouvre pas et si l'entrefer anti-rémanant est inférieur à l'entrefer anti-rémanant maximum alors **augmenter un peu** l'entrefer ~~

la partie conclusion sera traduite, dans une représentation classique, par :

~~ alors augmenter l'entrefer de 0,1 mm ~~.

On peut aussi considérer la notion à modéliser comme étant vraie sur un intervalle de valeurs comme sur l'exemple suivant, pour la conception des Association-Machine-Convertisseur-Commande : [GER 93]

-- Si la vitesse est **très faible** et la puissance **très forte** alors le convertisseur de l'alimentation de l'Association-Machine-Convertisseur-Commande est un cycloconvertisseur.--

En réalité, on traduira cette notion de puissance qualitative par la figure 6 :

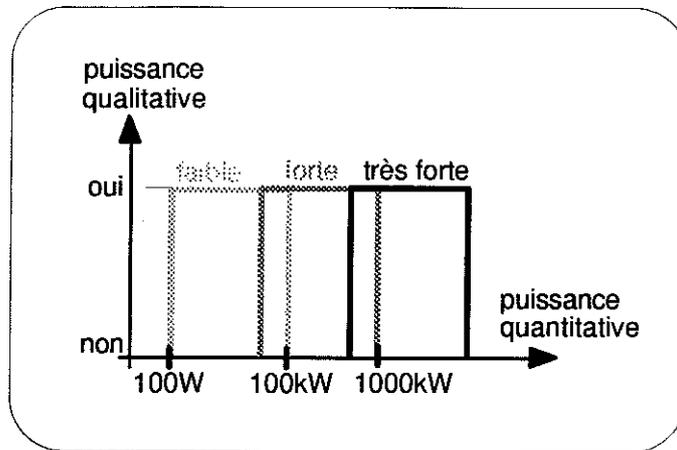


Figure 6 : Equivalence Puissance qualitative - Puissance quantitative.

Dans tous les cas, cette modélisation est très imparfaite. Dans le premier cas, la solution proposée est trop lourde s'il y a beaucoup de paramètres de ce type à calculer. Dans le deuxième exemple, la solution est trop brutale; en effet, dès que l'on sort de l'intervalle choisi, la proposition est fautive : c'est une solution trop radicale.

Les palliatifs cités ici ne suffisent donc pas. En fait, il manque un facteur prépondérant pour mieux formaliser ces problèmes : la **notion de préférence**.

En effet, si l'on arrive à quantifier cette notion de préférence, il n'est plus nécessaire de travailler à partir d'un intervalle de valeurs (cf. figure 7) mais il est possible de privilégier plusieurs valeurs (cf. figure 8).

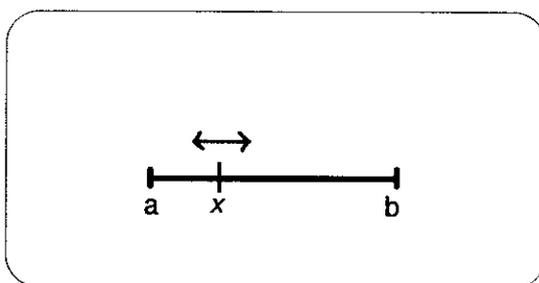


Figure 7 : Raisonnement sur 1 dimension.

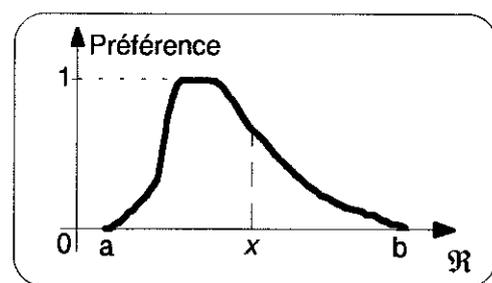


Figure 8 : Raisonnement sur 2 dimensions.

3. Conclusion

Au niveau de la préconception on rencontre un certain nombre de problèmes déjà abordés, à savoir :

- des connaissances imprécises,
- des connaissances incertaines,
- des connaissances mêlant les deux.

Cependant, au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (L.E.G.), certains travaux ont déjà été réalisés sur la conception et ont débouché sur des logiciels. Ces logiciels fonctionnent et cela sans l'apport de techniques adaptées à la modélisation de l'imprécis ou de l'incertain, car ce sont des problèmes à base de peu d'heuristique.

Mais, en présence de beaucoup d'heuristique (donc d'informations entachées de subjectivité), ou une méconnaissance du phénomène physique, comme c'est le cas dans la modélisation de la chambre de coupure d'un disjoncteur, il est impératif d'utiliser d'autres techniques.

Les impératifs inhérents à l'acquisition puis à l'analyse de la connaissance auprès d'experts, nous ont conduit à mettre en oeuvre des systèmes experts pour expliciter les méthodes utilisées par les experts sous la forme de règles de production et pour traiter la quantité importante de leurs connaissances.

Le fait de travailler avec un système expert procure les avantages déjà cités (cf. § I.B.2.), mais apporte aussi un certain nombre de contraintes qui ont permis d'affiner le modèle que nous avons mis en oeuvre.

Pour faire ce que l'on va appeler de la **conception floue**, c'est-à-dire de la conception fondée sur des informations incomplètes, imprécises, ou incertaines, on peut déjà penser que le modèle qui permettra de traiter l'imperfection des connaissances devra, non seulement gérer les problèmes liés aux données (problèmes de l'acquisition et de modélisation des connaissances), mais aussi il devra permettre des calculs sur ces données.

Enfin, en plus de l'incertitude sur les données, le concepteur est confronté à la résolution de nombreux conflits afin d'aboutir à une "bonne" solution. Cet aspect là est différent de l'incertitude propre à la détermination des valeurs des données. Il est résolu par la spécification d'une stratégie de conception. Notre modèle devra donc aussi intégrer des règles imparfaites qui agiront sur des données elles-mêmes imparfaites.

- Chapitre II -

Modélisation de l'imprécision
et de l'incertitude

L'objectif n'est pas de présenter de façon exhaustive toutes les modélisations qui pourraient permettre de répondre aux problèmes de l'imperfection de la connaissance.

Nous avons décidé d'aborder trois axes principaux : le calcul d'erreur, les probabilités, la théorie des possibilités.

Ces trois axes n'ont pas été choisis au hasard. En effet, le calcul d'erreur est un palliatif très souvent utilisé dans le domaine du génie électrique pour essayer de donner un peu de souplesse aux résultats mesurés ou calculés.

Quant aux probabilités, c'est généralement la première idée qui vient à l'esprit quand on pense aux problèmes liés aux phénomènes aléatoires : cela vient sûrement de la culture mathématique acquise tout au long de la scolarité (quel scientifique n'a jamais été confronté à un problème de probabilité ?).

Enfin, la théorie des possibilités qui, bien qu'étant moins connue à l'heure actuelle, car beaucoup plus jeune, semble parfaitement répondre à notre problématique.

A. Présentation générale de différentes méthodes

1. Calcul d'erreur

Le calcul d'erreur est une technique incontournable dès que l'on approche l'expérimentation en général.

En effet, que ce soit pour une mesure ou pour une estimation, il est rare que la valeur obtenue soit parfaitement précise. Ceci peut être dû à la précision du capteur, l'étalonnage de l'appareil de mesure, etc...

Le principe est assez simple, on récupère une valeur à laquelle on attribue une variation calculée en fonction de l'erreur potentielle estimée. On obtient un intervalle qui représente typiquement un ensemble d'informations imprécises qui sont autant d'alternatives. C'est cet intervalle qui traduit l'imprécision.

On obtient ainsi des valeurs du type : $x \pm r$ (par exemple, $3,5 \pm 10\%$.) où x est la valeur médiane et r représente le rayon (l'incertitude).

Ce formalisme permet néanmoins d'effectuer des calculs sur ces valeurs. En effet, le calcul d'incertitude permet la détermination de l'incertitude d'une grandeur calculée à partir d'autres grandeurs estimées ou mesurées.

Soit $x = f(a, b, c, \dots)$ et $\Delta x, \Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots$ les incertitudes absolues de chaque variable, alors $\Delta x = \left| \frac{\partial f}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial f}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial f}{\partial c} \right| \Delta c + \dots$

où, $\frac{\partial f}{\partial a}$ est la différentielle de la fonction f divisée par la différentielle de la variable a .

On voit nettement ici que dans tous les cas, l'incertitude liée à l'imprécision de chaque variable croît toujours : on est dans le cas le plus pessimiste.

Il semblerait donc que le calcul d'erreur puisse répondre au moins à une des lacunes actuelles, à savoir l'imprécision liée aux variables. Cependant, il apparaît au moins deux inconvénients majeurs :

- Tout d'abord, le fait de ne pouvoir exprimer cette imprécision que par deux paramètres : la valeur médiane et la variation autour de ce point médian. Comme le montre la figure 9, on pourrait avoir envie de représenter autre chose que des intervalles symétriques.

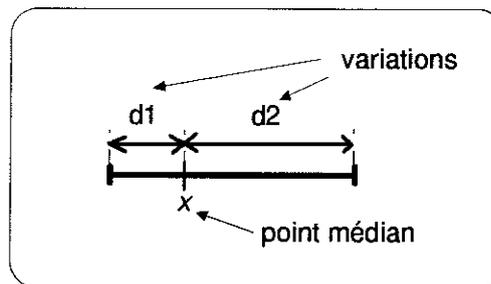


Figure 9 : Intervalle de valeurs non symétrique.

- D'autre part, une autre limitation de ce formalisme est que l'on ne peut traduire la préférence d'une ou de plusieurs valeurs par rapport à d'autres. Cette limitation est importante car dans les méthodes empiriques de conception, cette dimension supplémentaire est souvent rencontrée.

2. Théorie des probabilités

Nous allons maintenant, ici, non pas présenter la théorie des probabilités mais uniquement les notions qui permettront de mieux comprendre les choix que nous avons faits.

Les jeux de hasard sont à l'origine du calcul des probabilités. Les fréquences observées ont conduit à l'étude des grands ensembles qui sont eux-mêmes analysés par la statistique.

Le calcul des probabilités est la branche des Mathématiques qui traite des phénomènes aléatoires, c'est-à-dire des phénomènes dont la répétition, dans les mêmes conditions, conduit à des résultats différents, imprévisibles.

Il existe trois grands types d'intervention du calcul des probabilités :

- maîtriser l'incertitude : comment à travers différents résultats de mesure on peut déterminer la valeur la plus probable,
- modéliser le phénomène aléatoire,
- prouver que tel phénomène aléatoire présente telle qualité.

a. Rappels

Un événement est un résultat possible d'une expérience aléatoire. On appelle Ω l'ensemble des résultats possibles. L'ensemble vide (\emptyset) est un événement impossible.

Deux événements sont **incompatibles** s'ils ne peuvent se réaliser en même temps.

Deux événements sont **indépendants** si la réalisation de l'un n'a aucune influence sur la réalisation de l'autre.

Si Ω est fini et $P(\Omega)$ est l'ensemble des parties de Ω alors, on appelle **probabilité** une application de $P(\Omega)$ dans \mathfrak{R} telle que si A est un élément de $P(\Omega)$, la probabilité notée $p(A)$ vérifie :

- $0 \leq p(A) \leq 1$
- $p(\Omega) = 1$

De plus, on a :

- $p(\emptyset) = 0$
- si $A \subset B$ alors $p(A) \leq p(B)$ (où \subset traduit l'inclusion ensembliste)
- si $\neg A$ est le complémentaire de A dans Ω , alors $p(\neg A) = 1 - p(A)$

Théorème des probabilités totales :

- $p(A \cup B) = p(A) + p(B) - p(A \cap B)$ (où \cup traduit l'union ensembliste)

si A et B sont incompatibles c'est-à-dire si $A \cap B = \emptyset$ alors $p(A \cup B) = p(A) + p(B)$

(où \cap traduit l'intersection ensembliste).

- $p(A \cap B) = p(A) * p(B/A)$

où $p(B/A)$ est la probabilité conditionnelle de B c'est-à-dire la probabilité que B se réalise si A est réalisé.

Si A et B sont indépendants alors $p(A \cap B) = p(A) * p(B)$

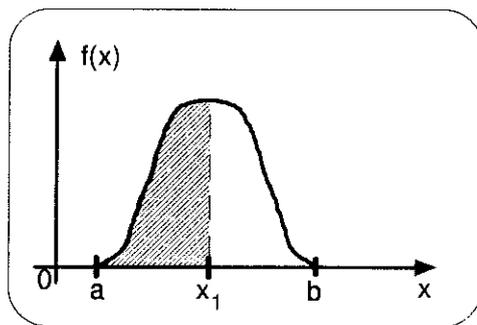
Théorème de BAYES :

- $$p(A_i / B) = \frac{p(A_i) \times p(B / A_i)}{\sum_{j=1}^n p(A_j) \times p(B / A_j)}$$

On appelle fonction de répartition de la variable aléatoire X la fonction $F(x) = \text{prob}[X < x]$.

Si Ω n'est pas fini, la variable aléatoire X peut être continue. Dans ce cas, si la fonction de répartition est continue et dérivable, la dérivée de $F(x)$ s'appelle la **densité de probabilité** :

si X est continue sur $[a, b]$, $F(x) = \int_a^{x_1} f(x) dx = p(a \leq X < x_1)$ avec $F(a) = 0$ et $F(b) = 1$.



Comme on a posé $F(a) = 0$, on a donc $\int_a^{x_1} f(x) dx = p(X < x_1)$.

Figure 10 : Densité de probabilité $f(x)$.

b. Analyse critique

Le calcul des probabilités va essayer d'affecter à un événement A, sous-ensemble d'un référentiel U, un degré qui traduira la mesure de probabilité.

Tout d'abord, on peut déjà noter qu'en aucun cas, on ne remet en cause l'événement A dans sa définition. On affecte ce degré sur une relation mais pas sur A même.

D'autre part, on pourrait être tenté de modéliser la notion de préférence par une distribution de probabilités comme le montre la figure 10 où, plus x tend vers x_1 , plus la confiance en X grandit.

Cependant, dans ce cas, le sens que l'on veut donner à la préférence est mal traduit par une distribution de probabilités comme le montre l'exemple, relatif à la chambre de coupure d'un disjoncteur (cf. Annexe I) :

~~ La piste supérieure d'arc doit être réalisée dans un matériau bon conducteur et résistant à l'arc. Les cuivres écrouis ou recuits conviennent généralement bien. On peut utiliser aussi des alliages spéciaux plus résistants à l'arc (cuivre au tellure ou cupro-tungstène) qui sont aussi plus chers et plus résistifs ... ~~

On traduit cette règle par des degrés (compris entre 0 et 1) affectés aux quatre possibilités de conducteurs comme le montre la figure 11.

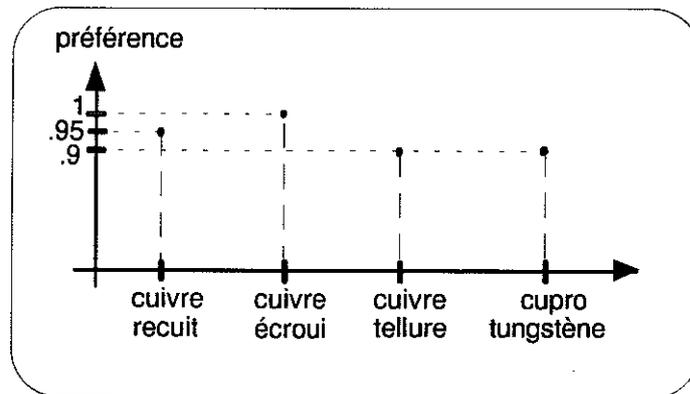


Figure 11 : Choix du matériau de la piste supérieure d'arc.

Le schéma de la figure 11 traduit à quel point il est préférable de prendre tel ou tel conducteur pour la piste supérieure d'arc.

Par contre, si la préférence est représentée par un calcul de probabilités, non seulement on ne peut pas garder les degrés de préférence donnés par les experts car leur somme ($0.95 + 1 + 0.9 + 0.9 = 3.75$) n'est pas égale à 1 (ce qui est contraire au calcul de probabilités), mais une fois retranscrits (si on y arrive), les degrés, ainsi calculés, n'auraient pas du tout la même signification.

En effet, ces degrés traduiront la chance que l'on a, pour ce qui est du choix des conducteurs, d'avoir tel ou tel matériau conducteur. Or ce n'est pas du tout l'interprétation de la notion de préférence que l'on veut modéliser.

Une autre limitation du calcul des probabilités va nous diriger un peu plus vers une autre voie : c'est l'impossibilité de traduire l'ignorance.

En effet, du fait de **l'équiprobabilité et de la somme des degrés de probabilités égale à 1**, on ne peut pas traduire correctement l'ignorance.

Par exemple, si l'on n'a aucun critère de choix possible entre deux valeurs A et B d'un paramètre (un nombre de spires par exemple), en probabilité, on traduira ces choix par l'équiprobabilité $p(A) = p(B) = 1/2$, ce qui n'est pas entièrement satisfaisant sur deux points principaux :

- D'une part, dans la mesure où l'on ne connaît rien de la valeur de A ni de B, on doit donner la préférence maximale à chaque alternative, ce qui n'est pas le cas en probabilité (le maximum est $1/2$).
- D'autre part, si une nouvelle valeur C est envisagée, l'arrivée de cette valeur va totalement perturber le degré de préférence des valeurs déjà présentes ($p(A) = p(B) = p(C) = 1/3$). Ce ne devrait pas être le cas, puisque l'apport de cette nouvelle valeur n'a, en aucun cas, modifié le fait que l'on ignore la valeur des différents paramètres (sinon, cela veut dire que l'on a une information supplémentaire, ce qui enlève une partie de l'ignorance).

En fait, l'équiprobabilité exprime plutôt le hasard, l'égalité des chances, l'incertitude devant le choix d'une alternative et non pas l'ignorance.

Nous avons beaucoup insisté sur le problème de la valeur des degrés de préférence, car ils ont une importance majeure dans tout le raisonnement de conception et l'enchaînement des règles comme nous le verrons plus loin.

Enfin, comme nous l'avons déjà dit, une de nos préoccupations majeures pour choisir un modèle, a été sa capacité d'effectuer des calculs plus ou moins complexes. Or, ici, on touche au point le plus délicat des probabilités. En effet, bien qu'il soit possible d'effectuer des calculs même complexes (travaux largement développés dans [WOO 90]), ils sont beaucoup trop coûteux en temps et en analyses pour être satisfaisants dans notre cadre (système expert). De plus, ils nécessitent un réajustement, car la valeur en ordonnée obtenue est constamment supérieure à 1 (cela entraîne des difficultés, notamment pour comparer différentes données).

Nous avons été amenés à nous tourner vers d'autres méthodes plus adaptées à nos problèmes.

3. Théorie des ensembles flous

Les bases de la représentation nuancée des connaissances sont dues au professeur Lofti ZADEH. Il est, en effet, le père de la théorie des sous-ensembles flous qui a été le point de départ en 1965 de la plupart des théories actuelles sur les problèmes d'incertitude, d'imprécision ou d'incomplétude de l'information [ZAD 73].

L'origine des ensembles flous est liée à l'inadéquation entre la dualité vrai/faux, héritée de la logique d'Aristote, et la notion de classe manipulée par les individus qui raisonnent en langages naturels. La représentation mentale de la réalité est souvent trop éloignée des modèles mathématiques courants.

Pour donner un exemple de limitation de la logique classique, on peut citer ce paradoxe :

~~ Si un tas de sable est petit, lui ajouter un grain de sable le laisse petit. Un tas de sable où il n'y a qu'un grain est petit. Donc tout tas de sable est petit. ~~

Ici, le paradoxe est dû au fait que l'on modélise de façon "tout ou rien" le prédicat petit.

Les ensembles flous concernent d'abord et avant tout le problème de la gradualité des classes manipulées par l'esprit humain.

Le souci de représenter des connaissances qualitatives et subjectives a aussi conduit à faire évoluer les sous-ensembles flous vers d'autres théories.

Les deux théories que nous allons aborder et qui sont certainement les plus attractives actuellement, sont la logique floue et la théorie des possibilités.

a. Logique floue

Les années 90 ont vu l'explosion de la logique floue (fuzzy logic en anglais). En effet, l'expansion de la logique floue est liée en grande partie à toute l'évolution technologique que les années 80 ont apportée. Cette forme de logique s'est particulièrement bien développée au Japon où, en plus de l'effet de mode, elle a réellement fait ses preuves. En effet, que ce soit dans la machine à laver, dans la mise au point d'un appareil photo ou encore dans la conduite d'un hélicoptère pour éteindre les

incendies de forêt, les exemples où l'on voit les mots magiques "fuzzy logic" sont de plus en plus nombreux [TAK 85].

En logique floue, le facteur vague est contenu, très souvent, dans les règles. Elles traduisent des fonctions mal connues ou mal définies.

Cette logique a un domaine d'application privilégié : la commande de processus. Cependant, elle prend des sens très divers selon qu'elle est appliquée ou théorique.

On peut distinguer trois principaux types de domaines :

- les logiques multivaluées où l'on modélise des degrés de vérité entre 0 et 1 [KAU 87].
- une logique où les valeurs de vérité sont elles-mêmes floues [KAU 88].
- la logique utilisée en commande floue [MAM 74][AUR 91][KIC 76].

Dans ce dernier cas, les règles floues sont des connaissances vagues, généralement des prédicats comme *grand*, *chaud* etc... [BOU 90] En pratique, on code numériquement la description d'un comportement et, à **partir de mesures précises**, on interpole un résultat. C'est pourquoi, on assimile ce raisonnement à un raisonnement dit "interpolatif".

Voici un exemple très simple de commande floue (cf. figure 13):

Soient les deux règles suivantes :

(R1) : *Si le débit est faible et la température chaude alors augmenter beaucoup le débit.*

(R2) : *Si le débit est moyen alors augmenter moyennement le débit.*

D'une part, on prédéfinit les prédicats comme le montre la figure 12.

D'autre part, on choisit une méthode pour associer les prédicats, c'est-à-dire les conjonction et disjonction ET et OU. Il est courant de prendre la fonction MINIMUM pour ET et MAXIMUM pour OU.

Enfin, on choisit la méthode qui fera l'amalgame des règles, par exemple la fonction MINIMUM.

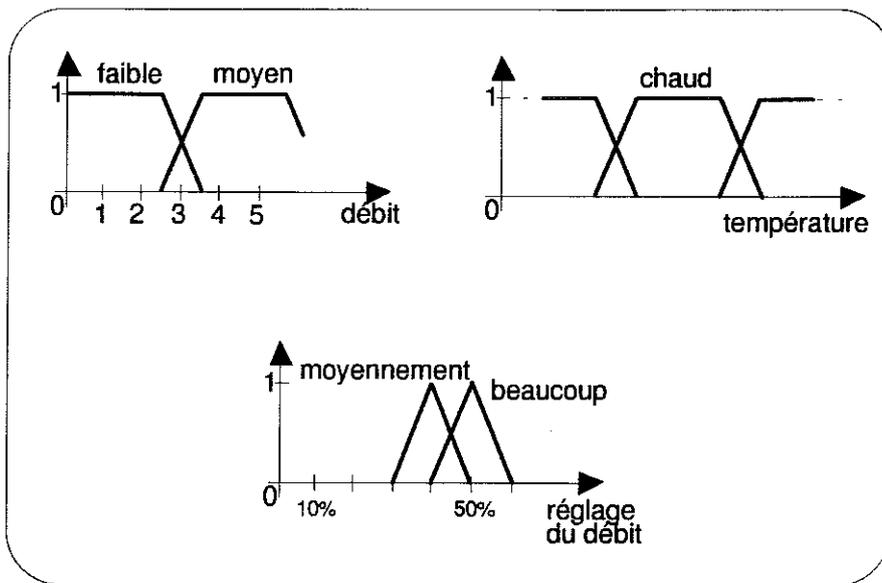


Figure 12 : Définition des prédicats.

On obtient pour une valeur de débit $d = 2,75 \text{ m}^3/\text{h}$ et une température T_0 :

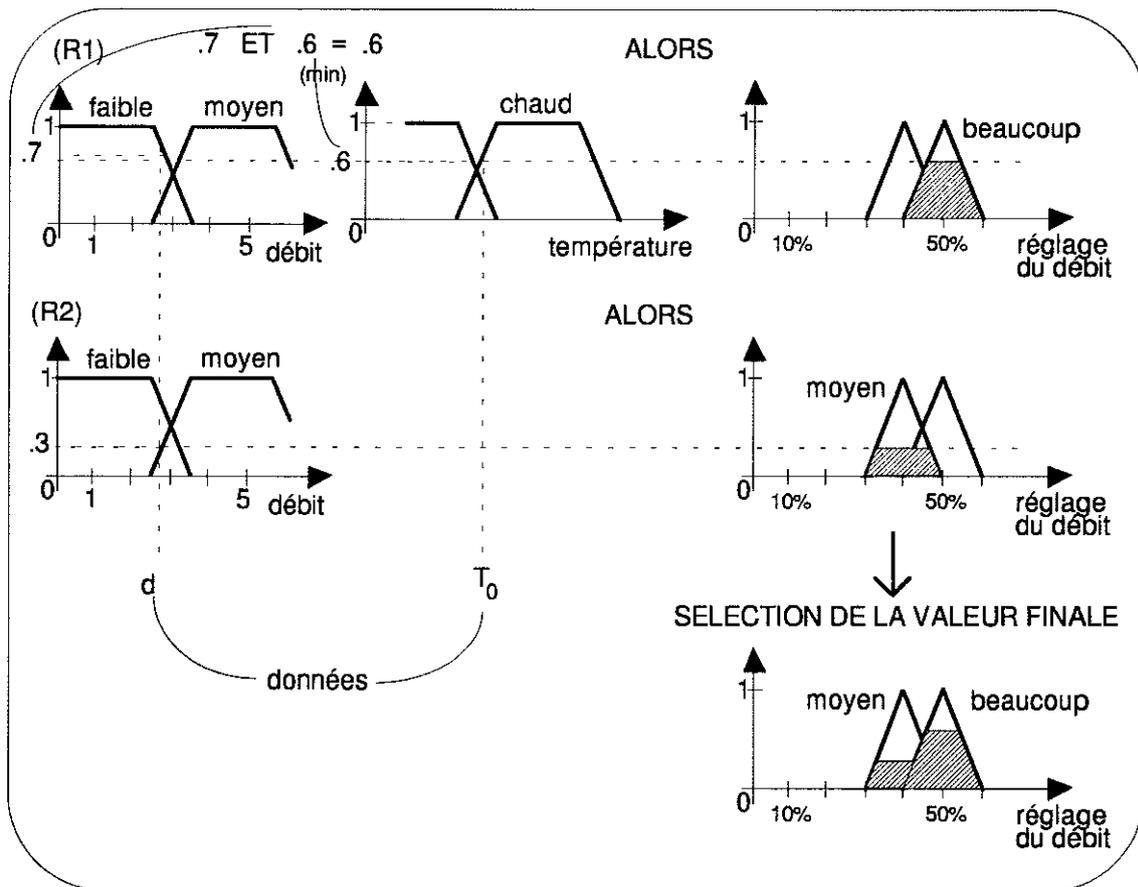


Figure 13 : Exemple de résolution.

La dernière étape consiste, donc, à choisir une valeur discrète dans la zone hachurée. Il existe des méthodes pour ce choix, que nous verrons plus loin. Cette étape répond au joli nom de déflouification (defuzzyfication en anglais)[PET 93].

Or, dans le cadre de la conception, nous ne recherchons pas à interpoler une fonction mal connue, nous voulons pouvoir faire du raisonnement incertain sur des valeurs elles-mêmes vagues. C'est la raison pour laquelle la logique floue ne nous satisfait pas.

b. Théorie des possibilités [DUB 88]

La théorie des possibilités est, elle aussi, issue de la théorie des sous-ensembles flous. Elle est principalement fondée sur deux concepts : la mesure de **possibilité** (Π) et la mesure de **nécessité** (N). Voici les quelques notions qui peuvent introduire cette théorie : soit p une proposition,

- $\Pi(p) = 0$ traduit qu'il est impossible que p soit vraie.
- $N(p) = 1$ traduit que p est certainement vraie.
- Contrairement aux probabilités, une proposition (p), ou un fait, n'est pas lié à son contraire ($\neg p$) par la même relation. En fait, $\forall p, \Pi(p) = 1 - N(\neg p)$; on peut notamment en déduire que " p est impossible veut aussi dire $\neg p$ est certainement vrai".
- Grâce à ces deux notions, on arrive à traduire l'ignorance totale de p . On a alors $\Pi(p) = \Pi(\neg p) = 1$ (p est possible et $\neg p$ est tout aussi possible).

A partir de ces deux mesures, on obtient une distribution de possibilités dont les limites sont la fonction d'appartenance μ . La figure 14 résume ces quelques notions :

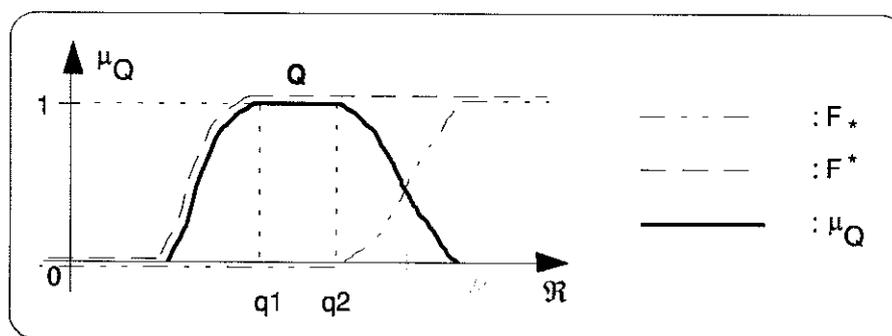


Figure 14 : Donnée floue.

On définit F^* et F_* comme suit :

$$\forall u \in \mathfrak{R}, F^*(u) = \Pi((-\infty, u]) = \sup\{\mu_Q(r) / r \leq u\} \text{ et}$$

$$\forall u \in \mathfrak{R}, F_*(u) = N((-\infty, u]) = \inf\{1 - \mu_Q(r) / r > u\}$$

De plus, on appelle **noyau** la partie haute de l'ensemble flou, c'est-à-dire l'ensemble noté $\text{noy}(Q)$ tel que $\text{noy}(Q) = \{\omega \in \mathfrak{R} / \mu_Q(\omega) = 1\}$ (dans le cas où l'on est en présence d'un ensemble flou numérique) et on appellera support de Q , l'ensemble noté $S(Q)$ tel que $S(Q) = \{\omega \in \mathfrak{R} / \mu_Q(\omega) > 0\}$

Grâce à cette théorie, on peut modéliser le **caractère flou des données**. Mais aussi, elle nous permet, à l'aide des deux concepts Π et N précités, de représenter **l'incertitude d'une proposition**.

B. Conclusion

Nous avons donc choisi la théorie des possibilités pour résoudre nos problèmes. Elle apporte, en effet, un grand nombre de réponses à nos contraintes :

- Elle va nous permettre de modéliser l'imprécision de nos variables comme sur l'exemple suivant où la fonction d'appartenance μ de la largeur de la piste supérieure d'arc (LPS) traduira l'adéquation de LPS à l'ensemble des valeurs représentées sur la figure 15.

~~ valeurs typiques LPS : "Typiquement les valeurs utilisées pour la largeur de piste supérieure d'arc sont comprises entre 10 et 20mm. Des valeurs trop faibles risquent d'induire le débordement de l'arc par rapport à la piste. Des valeurs trop fortes limitent la possibilité d'obtenir une valeur convenable de l'induction dans la zone d'accrochage de l'arc. Les limites observées semblent se situer autour de 5 a 30mm." ~~

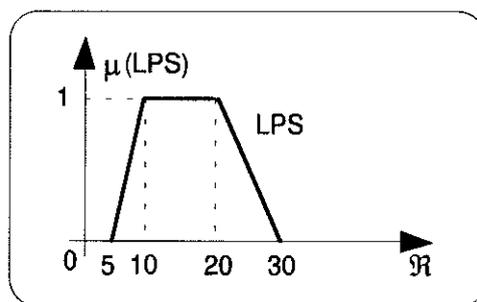


Figure 15 : Valeurs typiques de LPS.

- On pourra, aussi, dans la mesure où cette théorie le permet, effectuer des calculs sur les données numériques floues ainsi modélisées. Ce qui était aussi possible avec la théorie des probabilités, mais dont les calculs sont longs et pénibles à mettre en oeuvre.
- Les données symboliques entachées d'incertitude (figure 11) seront elles-mêmes représentées suivant le même formalisme. Cela permet, notamment, de traduire au plus juste les choix stratégiques des experts.
- Sur chaque type de variables, on pourra représenter l'ignorance sans affecter les autres variables.
- Enfin, en ce qui concerne les règles, il sera possible de modéliser non seulement l'incertitude des propositions des experts, mais aussi de hiérarchiser les règles quand ce sera nécessaire (ordre de priorité).

- Chapitre III -

Présentation du modèle élaboré
pour une conception floue

Le but d'un système permettant de faire de la conception floue est de dimensionner un appareil électrique, comme par exemple un disjoncteur, afin de pouvoir le fabriquer, malgré l'incomplétude des données. Nous allons développer le modèle qui nous permet de représenter ce système.

A la fin du processus de conception, on doit pouvoir disposer, pour chaque "paramètre", ou variable, qui caractérise l'objet à concevoir, de valeurs complètement définies et précises.

Ces valeurs caractéristiques, comme par exemple la hauteur de la piste supérieure d'arc, seront utilisées pour fabriquer la chambre de coupure du disjoncteur (cf Annexe I).

Dans un problème de conception (floue ou non) [BRA 89] [GEN 91] [TRI 91] [ZHU 91] [GER 93], il faut résoudre notamment les problèmes suivants :

- gérer convenablement la quantité souvent très grande d'informations nécessaires à la mise en oeuvre du système de conception. Cela signifie qu'il faut pouvoir manipuler et faire évoluer les données.
- arriver à traduire correctement (dans un formalisme et un langage adaptés) les méthodes de conception des experts. Ceci se fait en liens étroits avec la modélisation des données.
- formaliser et automatiser un déroulement du processus de conception : mettre au point une stratégie. Cela conduit à maîtriser les méthodes de travail de l'expert. Cette phase est réalisée en tenant compte des règles sur lesquelles le déroulement du processus de conception doit s'appuyer.

Des liens solides existent entre ces trois parties qui constituent le système expert. Ces liens sont très importants car d'eux dépendent la qualité et l'efficacité du système.

Cependant, la prise en compte de ces liens va à l'encontre du principe de généralité du système informatique. En effet, si la représentation des données est liée à la représentation des règles, qui elle-même est liée aux problèmes de stratégie, cela signifie qu'il est difficile de n'appliquer qu'une seule de ces trois parties à un autre problème de conception : soit on choisit le modèle dans son ensemble, soit on redéfinit, tout ou presque, en fonction des besoins propres de la nouvelle application.

Compte tenu de la définition des systèmes experts (cf. I.B.3), nous devons élaborer un formalisme de règles (car l'automatisation du déroulement du processus doit se faire de la façon la plus générale possible), un formalisme de calculs (car il faut effectuer des calculs flous pour dimensionner un appareil électrique), un modèle de données (car il faut manipuler toutes les données de la même façon).

On classe alors la connaissance en trois groupes : la connaissance factuelle, la connaissance déductive et la connaissance stratégique. Ces trois aspects du système seront illustrés par des exemples extraits de la conception de la chambre de coupure d'un disjoncteur. C'est sur cette application que nous avons mis en oeuvre tous ces principes.

Nous allons, tout d'abord, évoquer le problème de la stratégie. En fonction de ce que l'on veut faire (la stratégie), nous définirons le comment-faire (les règles) et à partir de quoi le faire (les données).

A. Aspects stratégiques

Derrière la notion de stratégie, on trouve l'ensemble du déroulement du raisonnement, c'est-à-dire toute la connaissance qui va gérer le contrôle des règles. Elle représente une partie du savoir-faire de l'expert et elle essaie, en quelque sorte, de piloter ses méthodes de travail.

La connaissance stratégique va ainsi permettre le choix de la règle à exécuter à un instant donné.

Pour définir une stratégie de résolution, il faut avant tout bien maîtriser les tenants et les aboutissants.

Dans un problème de conception (floue ou non), le but final est d'arriver à définir parfaitement toutes les caractéristiques nécessaires à la réalisation de l'objet, à partir de la définition d'un cahier des charges et en utilisant, tout ou partie de la connaissance disponible.

1. Stratégie globale

De la manière dont nous avons défini le but à atteindre dans un problème de conception, on pourrait croire que le cheminement, durant ce processus, consiste à partir du but final, à décomposer ce but final en sous-buts, à tenter de satisfaire ces sous-buts jusqu'à atteindre le but initial : la définition du cahier des charges (cf. figure 16); c'est-à-dire raisonner en chaînage arrière.

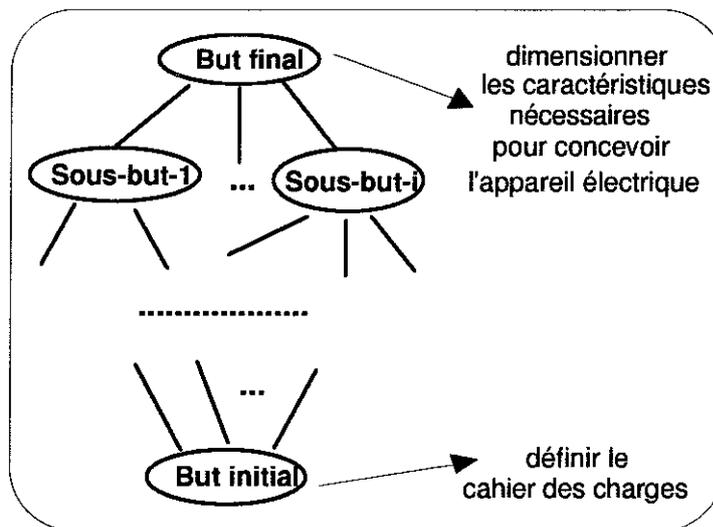


Figure 16 : Stratégie de chaînage arrière.

Or c'est l'inverse, on fait du chaînage avant, c'est-à-dire que l'on débute le processus par la définition du cahier des charges, puis chaque étape successive engendre ou modifie une valeur: on est dans un **système piloté par les données**.

En conception floue, pour atteindre le but que l'on s'est fixé, on va progresser, comme le montre l'exemple de la figure 17, d'un état où les données n'ont pas de valeur déterminée vers un état où elles seront complètement définies, en passant par un stade où elles seront floues. Plus précisément, on va progresser du flou vers le moins flou, puis le discret.

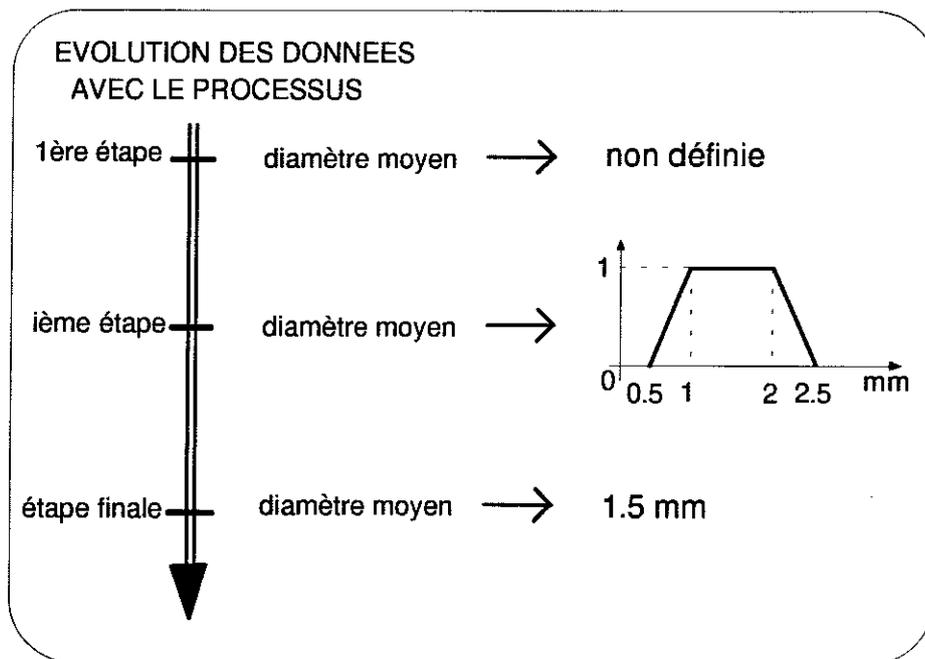


Figure 17 : Evolution des données au cours du processus de conception floue.

Or les données évoluent quand on leur affecte une valeur ou quand on modifie leur valeur existante.

Chaque affectation ou modification de valeur est obtenue par l'application d'une règle de conception. Or, pour appliquer une règle, il faut d'abord la sélectionner parmi toutes les autres règles de conception. Cette sélection s'effectue en fonction de l'état du système, donc de l'ensemble des données. Pour nous, l'état du système, à un instant donné, est l'image, à cet instant, des variables, des données du système. Il en résulte une limitation de notre système, dans la mesure où l'on ne réagit jamais aux règles déjà appliquées mais uniquement aux valeurs des données.

En effet, une règle de conception peut faire appel à un certain nombre de données pour la réalisation de cette règle. Il faut donc impérativement que les données nécessaires pour l'exécution de la règle aient déjà des valeurs affectées.

Nous allons donc, d'abord, travailler sur une connaissance qui n'est pas sûre, c'est-à-dire les règles floues (cf. §III.B pour une description plus détaillée des différentes règles rencontrées). Ces règles ont tendance à élargir le domaine de valeurs des paramètres (car la notion de flou implique celle d'intervalle des valeurs possibles).

Il semble logique de procéder ainsi, car nous estimons que l'indécision conduit un individu, lorsqu'il doit effectuer un choix, à essayer d'abord de collecter le plus grand

nombre d'informations avant d'effectuer le choix définitif. Ainsi, nous pensons qu'il est plus naturel d'élargir le domaine des possibilités avant de le restreindre.

En effet, si l'on choisit une valeur a priori, donc de façon plus aléatoire que précédemment, on risque de trouver, plus en avant dans le raisonnement, une autre règle, ou contrainte, qui contredira ce choix. On serait alors amené à modifier ce choix et donc à recommencer le processus. L'exemple de la figure 18 illustre cette situation : après l'application des méthodes M_i et M_j , une valeur est élue (X_1) par la méthode M_j . Or, la méthode M_k qui travaille aussi sur la donnée P apporte une modification de l'ensemble flou des valeurs possibles pour P . Il faut donc appliquer à nouveau la méthode M_j afin de réélire une nouvelle valeur, X_2 en l'occurrence, pour prendre en compte l'apport d'information engendré par M_k .

C'est exactement ce que l'on veut éviter, car on retomberait ainsi dans les systèmes classiques de conception (génération d'hypothèses, vérification et rebouclage si problème) mais, en outre, avec des données incertaines et imprécises. On amplifierait alors la complexité du système de façon importante et inutile.

Si, au contraire, on effectue le choix au dernier moment, on est sûr d'intégrer le plus d'informations possible concernant la donnée en question.

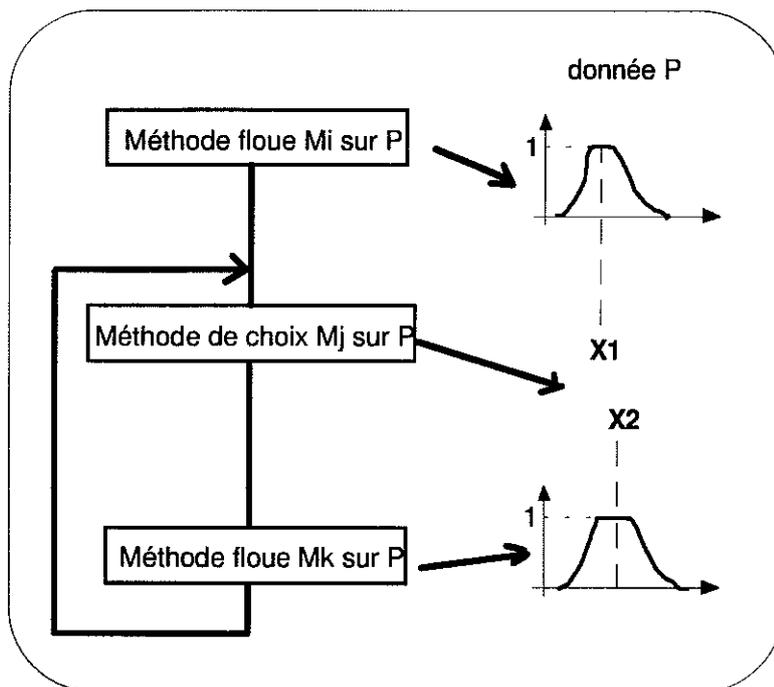


Figure 18 : Cycle de méthodes.

En prenant en compte ce type de règles, on englobe l'essentiel des règles de conception floue.

Une fois ce stade passé, toutes les règles floues ont été prises en compte.

On peut alors utiliser les règles précises et certaines (non floues) qui, une fois déclenchées, conduiront à des critères de choix permettant d'obtenir les valeurs discrètes à partir desquelles on pourra fabriquer l'objet.

Ces règles peuvent être des contraintes géométriques dures, inviolables. Elles lient plusieurs données de façon forte ce qui implique que le choix de celles-ci soit effectué le plus tard possible au cours du processus de conception, afin d'avoir sur elles le plus d'informations possible.

Le processus de discrétisation s'appelle la déflouification. Nous reviendrons plus loin sur ce processus.

Toute cette démarche nous conduit à regrouper les règles en deux catégories distinctes : les règles floues et les règles dures.

Les règles floues sont des règles de conception qui ne sont pas sûres auxquelles il faut adjoindre celles qui sont imprécises. Elles comprennent des calculs flous, des estimations floues, etc...

Les règles dures sont par opposition précises, incontournables, par exemple, des contraintes géométriques, des calculs précis, etc...

Notre cycle de stratégie est succinctement résumé sur la figure 19.

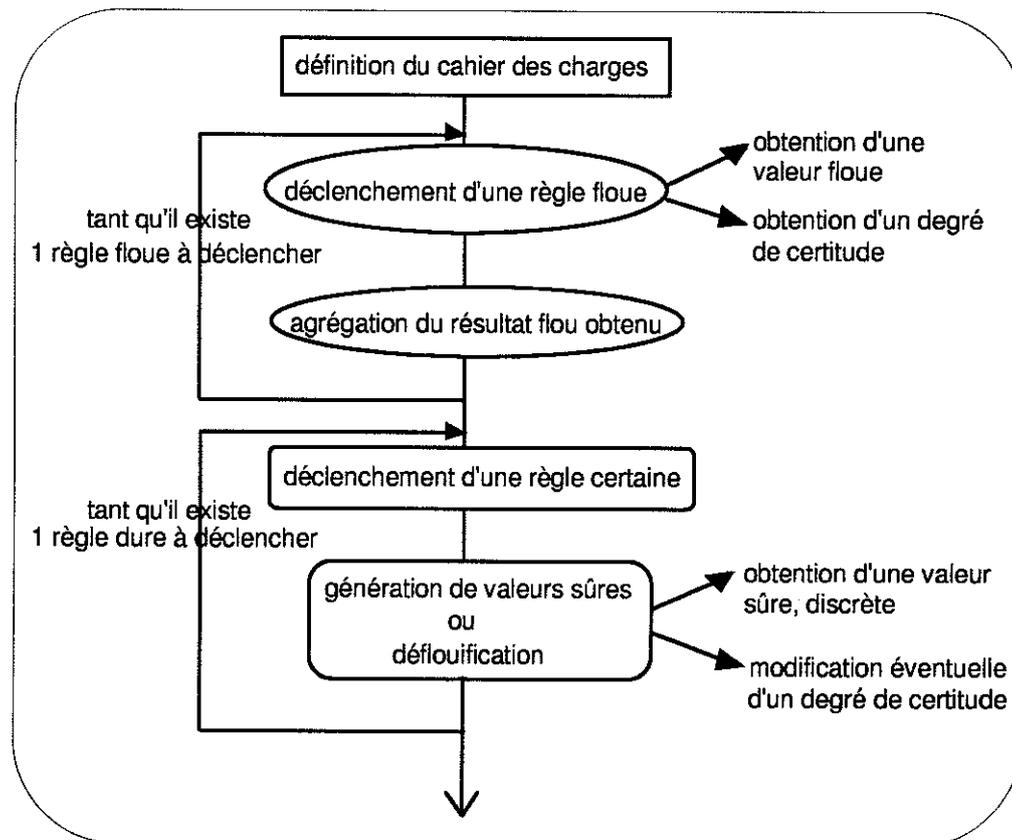


Figure 19 : La stratégie choisie.

Actuellement, la stratégie de résolution s'appuie sur le graphe de dépendance des données du système (exemple figure 20). Elle est élaborée partiellement de manière dynamique.

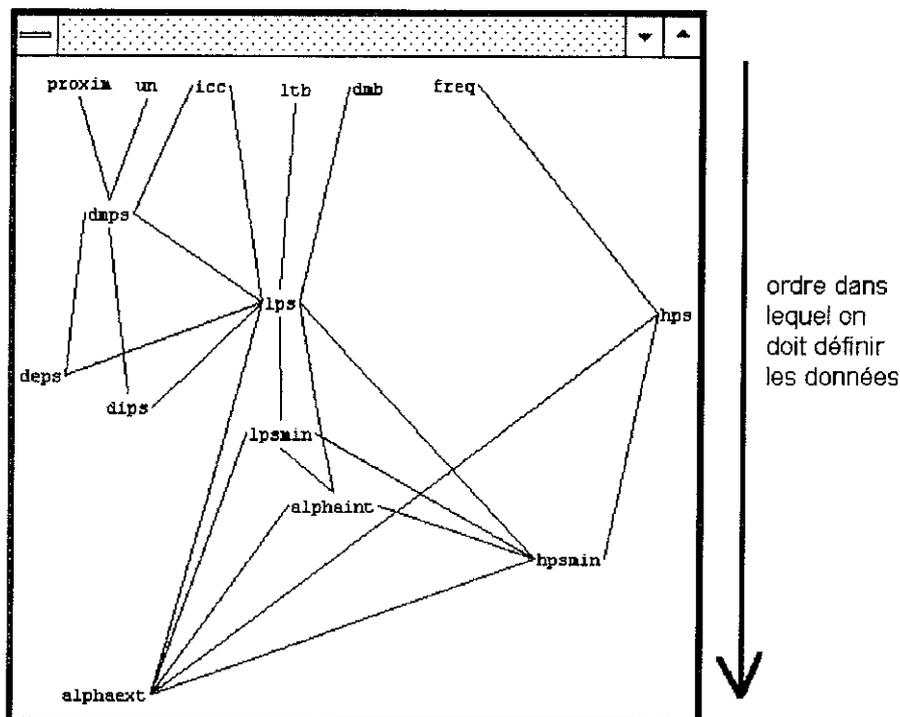


Figure 20 : Exemple de graphe de dépendance des données de la piste supérieure d'arc.

2. Etapes importantes du cycle de base

a. Agrégation

Durant le raisonnement, il peut arriver que plusieurs règles de conception concourent vers une même caractéristique à définir. Il faut donc faire une synthèse des différentes possibilités : c'est ce qu'on appelle l'agrégation (cf figure 21).

L'agrégation consiste à analyser les différentes propositions fournies par chaque méthode, pour une même caractéristique. Chaque proposition est une quantité floue.

Si l'intersection des deux quantités floues est vide, cela signifie que les deux règles n'ont rien en commun (ce qui est rare), il faut donc engendrer deux solutions qui évolueront séparément, en parallèle. Il serait cependant préférable de faire intervenir ici l'expert pour trancher et choisir une solution. Ce cas n'a pas été rencontré dans notre application et c'est la raison pour laquelle il n'a pas été implanté.

Dans l'autre cas, l'intersection des deux quantités floues n'est pas vide. On regroupe alors les deux solutions en une seule quantité floue.

Cette quantité floue aura un certain degré de confiance qui sera le minimum des deux degrés respectifs propres à chacune des règles de conception.

L'intersection des deux quantités floues proposées regroupent des valeurs fortes, qu'il semble naturel de valoriser (renforcer leur poids) puisqu'elles ont été accréditées par les deux méthodes.

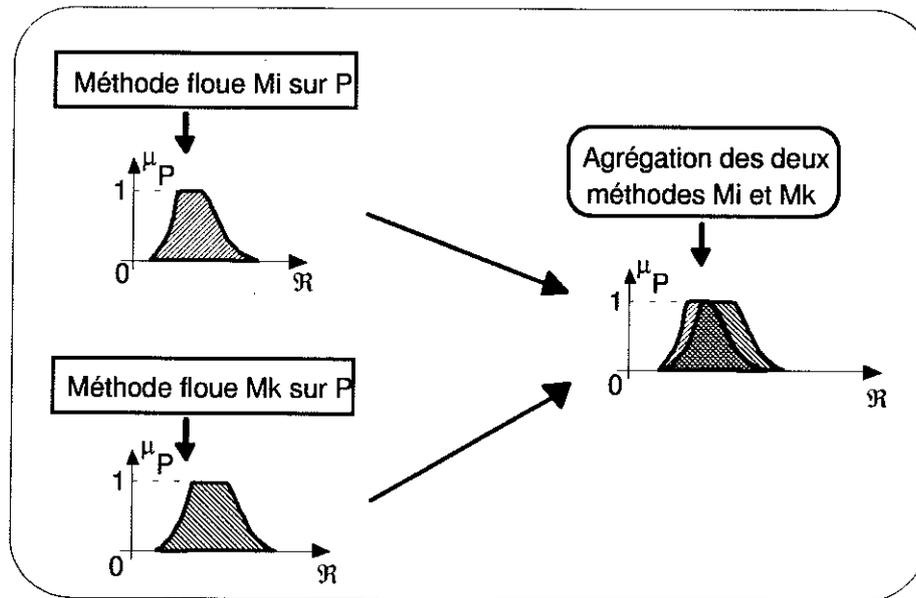


Figure 21 : Agrégation de règles de conception.

b. Choix de la valeur retenue et défouification

Après un examen attentif des règles floues, l'ensemble des données regroupe toutes les connaissances floues qu'il faut prendre en compte.

Il faut donc maintenant attribuer une valeur discrète à chacune des données. Ceci est réalisé selon les deux principes suivants :

- soit il existe une règle dure qui permet, à l'aide, par exemple, d'une contrainte géométrique, de fixer cette valeur, alors on va chercher à déclencher cette règle,
- soit une telle règle n'existe pas; il faut alors défouifier.

Il est beaucoup plus rassurant de pouvoir attribuer une telle valeur au moyen d'une règle dure. Cependant, tous les paramètres ne sont pas partie prenante d'une contrainte dure : on peut très bien avoir une règle de conception qui donne comme résultat un nombre flou et il se peut qu'il n'y ait pas d'autre règle intervenant sur cette

donnée jusqu'à la fin du processus. Dans ce cas, il faut malgré tout attribuer une valeur : cette sélection s'effectue dans la phase de déflouification.

Il existe plusieurs méthodes de déflouification [LEE 90][ZHA 91b][VER 93], chacune a des avantages et des inconvénients. Voici les trois méthodes principalement utilisées et illustrées sur la figure 22 :

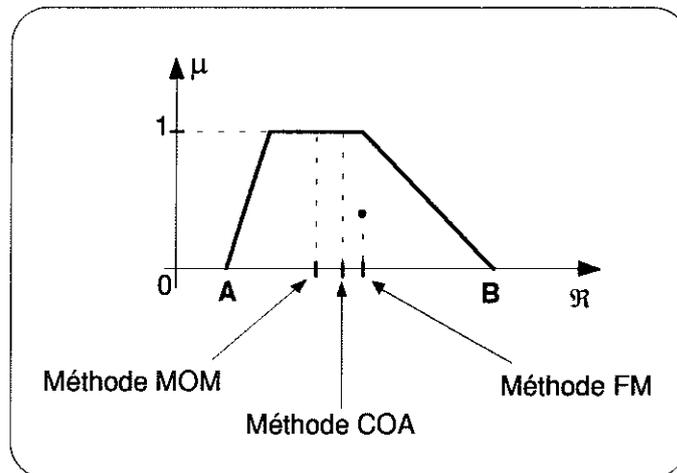


Figure 22 : Méthodes de déflouification.

- la méthode dite MOM (Mean-Of-Maxima) sélectionne la moyenne des maxima.
- la méthode dite COA (Center-Of-Area) sélectionne l'abscisse qui coupe l'aire en deux parties égales. Si Q représente cette abscisse et si A et B sont les deux extrémités de la quantité floue, alors on a :

$$\int_A^Q \mu(u) du = \int_Q^B \mu(u) du$$

- la méthode dite FM (Fuzzy Mean) sélectionne le centre de gravité. Si Q représente cette abscisse et si A et B sont les deux extrémités de la quantité floue, alors on a :

$$Q = \frac{\int_A^B u \mu(u) du}{\int_A^B \mu(u) du}$$

Remarque : Dans notre cas, la méthode dite des Maxima, décrite par [LEE 90] et fréquemment utilisée par les automaticiens, revient à la méthode MOM. Ces deux méthodes sont différentes quand on est en présence de deux ensembles flous dont les noyaux (cf. §II.A.3.b) ne sont pas de même hauteur. Ce n'est pas le cas ici.

Chaque méthode présente plus ou moins d'intérêt. On peut distinguer, d'un côté, la méthode MOM, de l'autre les méthodes COA et FM.

La méthode MOM est relativement facile à mettre en oeuvre dans la mesure où elle sélectionne le point le plus haut de la quantité floue ou, s'il n'est pas unique, elle retient la moyenne des deux extrémités. Cependant, elle a au moins deux limites :

- tout d'abord, cette méthode de déflouification ne tient absolument pas compte de l'ensemble de la quantité floue mais seulement des points les plus hauts.
- ensuite, si la quantité floue est complexe comme le montre l'exemple de la figure 23, alors cette méthode peut conduire à une valeur qui n'était pas vraiment susceptible d'être choisie.

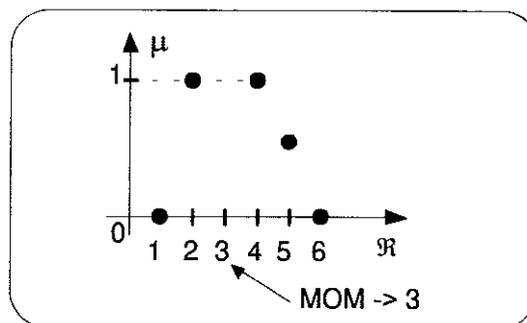


Figure 23 : Quantité floue amenant un problème de déflouification par MOM.

Les méthodes COA et FM concernent toutes les deux, par contre, l'ensemble de la quantité floue et non plus seulement la partie haute. Elles semblent donc utiliser plus d'informations que la précédente.

Cependant, là encore, un certain nombre de problèmes peuvent survenir :

- ces méthodes nécessitent beaucoup plus de calculs que la méthode MOM (calculs fondés sur les aires).
- mais surtout, il se peut que le résultat d'une de ces deux méthodes ne soit pas compris dans la partie haute de la quantité floue comme le montre l'exemple de la figure 24. Ici, le résultat de la méthode FM n'a pas un degré d'appartenance égal à 1. Si l'on conserve malgré tout ce résultat, cela signifie que l'on ne prend pas une des valeurs sur lesquelles on avait le plus de confiance...

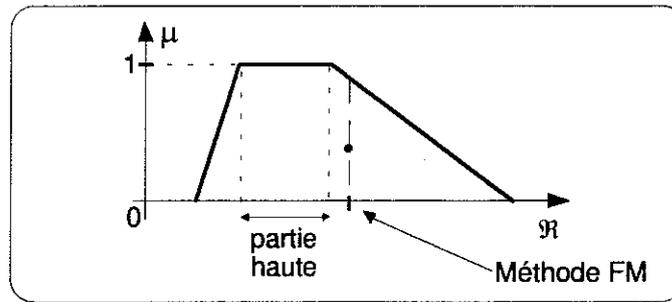


Figure 24 : Quantité floue amenant un problème de déflouification par FM.

Cette situation peut se produire si l'on a une règle dure qui nécessite de prendre une valeur hors de la zone haute de la quantité floue, mais dans ce cas là, c'est la physique (la règle dure) qui l'impose et non le "hasard" comme avec une des méthodes COA ou FM.

Par exemple, une règle dure comme : $PDEPI = PDMPI + EPI$, où les trois données sont des caractéristiques de la piste inférieure d'arc, peut aboutir à un résultat qui ne soit pas dans la partie haute du nombre flou représentant $PDEPI$. Cependant, cette valeur sera conservée car les deux paramètres $PDMPI$ et EPI donnent toute satisfaction.

La solution que nous avons adoptée consiste à proposer à l'utilisateur du système de choisir soit la méthode MOM soit la méthode FM (la méthode COA nous semblant moins intéressante).

Cependant, si ce choix ne résout pas tous les problèmes présentés on pourra, sans trop de difficulté, automatiser le changement de méthode lorsque celle utilisée ne fournira pas une valeur dans la partie haute.

Comme on vient de l'exposer, une stratégie de résolution est nécessaire au bon fonctionnement d'un système. Mais, pour pouvoir automatiser cette stratégie, quelles que soient les règles sur lesquelles elle agit (règles floues, règles dures, etc...), il faut nécessairement trouver un formalisme adapté à tous ces types de règles. C'est ce qui va faire l'objet de la problématique de la connaissance déductive.

B. Connaissance déductive

La connaissance déductive représente l'autre partie du savoir-faire de l'expert : la partie qui va modéliser le raisonnement, engendrer l'évolution des données.

Pour formaliser ce type de connaissance, on peut notamment utiliser les règles de production du type *si Condition alors Conclusion*. Ce formalisme est simple mais efficace.

Cependant, nous serons amenés à faire quelques aménagements pour prendre en compte l'aspect flou, tout en gardant les points forts de la théorie logique.

1. Différents types de connaissance déductive

Tout d'abord, si nous analysons la connaissance déductive que l'on peut rencontrer dans le processus de conception, nous nous apercevons que nous sommes confrontés principalement à deux types bien différents de connaissance déductive : l'une sera "certaine" (comme peut l'être une formule mathématique), l'autre sera soit imprécise, soit incertaine, soit les deux.

Dans tous les cas, les méthodes de conception comportent un degré de confiance (ou certitude).

a. Connaissance certaine à partir de données précises

Ici, les règles sont sûres, fiables. Elles ont toutes un degré de confiance maximum c'est-à-dire égal à 1. La connaissance certaine regroupe tous les faits bien établis et définitifs comme par exemple :

A1. des formules mathématiques ou des lois physiques à base d'égalités strictes qui rendent la loi vraie ou fausse, à l'exclusion de toute imprécision ou incertitude, comme :

$$\sim\sim \text{le calcul du rendement: } \eta = \frac{\text{PuissanceAbsorbée} - \sum \text{Pertes}}{\text{PuissanceAbsorbée}} \sim\sim$$

A2. des contraintes géométriques qui doivent **absolument** être respectées si l'on veut pouvoir fabriquer le produit, comme :

$$\sim\sim \text{Section} = \text{hauteur} \times \text{largeur}. \sim\sim$$

$\sim\sim$ la largeur totale du bobinage doit être inférieure à la différence entre le diamètre moyen du bobinage et le diamètre du noyau du circuit magnétique. $\sim\sim$

A3. des règles de fabrication, des normes qu'il faut **impérativement** respecter comme :

~~ les valeurs normalisées des angles de chanfrein varient par pas de 5 degrés. ~~

A4. des programmes de simulation, des outils d'analyse, qui même s'ils ne sont pas aussi précis qu'une contrainte géométrique ou une équation mathématique, ne peuvent être ni remis en cause, ni modifiés pour prendre des quantités floues en compte. Nous sommes donc obligés, en présence de ce type de programme, de fournir en entrée des valeurs discrètes et non floues.

Dans les quatre cas ci-dessus, trois d'entre eux (A1., A2., A4.) nécessitent de travailler sur des quantités discrètes.

Quant au cas A3., ces règles font appel indifféremment à des quantités floues ou des valeurs discrètes. En fait, comme on le verra dans le paragraphe sur la connaissance factuelle, ce cas sera interprété comme une contrainte sur les valeurs de la donnée (l'angle par exemple).

L'ensemble de cette connaissance certaine formera ce que l'on va appeler des **règles dures**. C'est-à-dire qu'il est impératif de respecter ce type de règles : ces règles sont certaines et inviolables.

Mais ce type de connaissance n'est pas fréquent dans la conception des dispositifs industriels propres au génie électrique.

b. Connaissance incertaine à partir de données floues ou non

L'autre type de connaissance, que l'on rencontre le plus souvent dans un système de conception floue, est la connaissance incertaine.

Là encore, il existe plusieurs types de faits : soit des faits qui vont engendrer des quantités floues, soit des valeurs précises à partir de données précises ou floues.

A5. des avis d'experts :

~~ Pour le choix du matériau de la piste supérieure d'arc, il vaut mieux prendre du cuivre-écroui, sinon du cuivre-recuit, sinon du cuivre-tellure ou du cupro-tungstène. ~~

A6. des choix approximatifs qui sont à peu près l'équivalent des méthodes d'estimation dans les systèmes sans flou [TRI 91] (avec la génération d'hypothèses en moins).

~~ L'épaisseur interne minimale de la piste supérieure d'arc est généralement comprise entre le quart et la moitié de l'épaisseur totale avec un optimum vers le tiers de cette dernière. ~~

Ces avis représentent en fait une tendance, ils sont entachés d'incertitude et d'imprécision dans la façon dont ils sont formulés.

A7. des valeurs typiques (ou abaques) :

~~ Connaissant la tension nominale et le courant de court-circuit, choisir le diamètre moyen de la piste supérieure d'arc dans les tables. ~~

Elles sont très semblables aux choix approximatifs mais ne proviennent pas de la même source.

A8. des calculs simples :

~~ La piste supérieure d'arc peut être assimilée à un anneau de court-circuit qui s'oppose au passage du champ magnétique. Des calculs par ordinateurs semblent montrer que du point de vue magnétique ET mécanique, l'optimum se situe entre 75% et 110% de l'épaisseur de peau du matériau de la piste et à la fréquence de fonctionnement. Toutefois les valeurs comprises entre 35% et 120% de l'épaisseur de peau restent acceptables. Il n'est pas conseillé de sortir de la fourchette comprise entre 7% et 175% de l'épaisseur de peau. ~~

Ici, après avoir calculé l'épaisseur de peau, il faut l'affecter, sachant qu'elle est floue... Ce sont en fait des phases de calculs numériques sont entachés d'incertitude (on n'est pas très sûr que les variables obéissent à

ces calculs). Très souvent, d'ailleurs, après le calcul, l'affectation n'est pas franche, elle est nuancée comme le montre l'exemple ci-dessus.

A9. des calculs conditionnels (règles de production) :

~~ si $0 < a_{int} < 90$ alors

$\max(0, hps - (lps - lpsmin) * \text{tg}(a_{int})) \leq hpsmin < hps.$ ~~

Là encore, ces règles ne sont pas sûres. Mais de plus, la partie test de déclenchement de la règle peut être elle-même floue.

Avec ce deuxième lot de règles, on balaye un domaine beaucoup plus vaste.

Tout d'abord, toutes ces méthodes de conception ne sont pas "sûres". Elles sont toutes données avec un degré de certitude, compris entre 0 et 1, qui indique la confiance de l'expert en chaque règle.

D'autre part, les règles A5. et A6. ne font appel à aucune condition et engendrent deux quantités floues, l'une symbolique (A5.), l'autre numérique (A6.), alors que les autres méthodes, A7., A8. et A9., font appel soit à des tests sur l'existence de valeurs (A7.), soit à des conditions sur les valeurs mêmes des données nécessaires à l'exécution de la règle.

On voit, au travers de tous ces exemples, qu'il existe beaucoup de diversités au sein des règles de conception floue. Nous allons, malgré tout, tenter de dégager un même formalisme pour toutes ces méthodes.

2. Interprétation et représentation de la connaissance déductive

Toute cette connaissance est représentée par des règles.

Or, comme nous l'avons déjà dit, pour gérer plus aisément le système (c'est-à-dire avoir une stratégie assez compacte) et pour permettre des possibilités plus importantes d'évolution du système, nous avons cherché un formalisme général pour toutes les règles présentées plus haut.

Si l'on essaie de récapituler tous les types de règles rencontrés, on dénombre :

- des règles avec des données non floues et :
 - ◆ des conclusions certaines : exemples A1., A2., A4.

- ◆ des conclusions incertaines : exemple A7.
- des règles avec des données floues et :
 - ◆ des conclusions incertaines : exemple A9.
 - ◆ des conclusions floues et incertaines: exemples A6., A8.

Nous avons des règles qui ont toutes un degré de certitude. Nous pensons que ce degré de certitude exprime le doute que peut avoir l'expert quant à la fiabilité de la conclusion obtenue par application de la règle. En quelque sorte, nous pensons qu'il permet aussi à l'expert de classer ces règles par ordre de préférence (même si ce n'est pas le but premier, nous pensons qu'il est sous-jacent). Il semble en effet tout à fait naturel, s'il faut effectuer un choix, de privilégier une règle dont le facteur confiance est plus grand.

Ainsi, ce n'est pas la valeur même qui s'en trouvera changée mais la confiance en cette valeur.

Remarque : En ce qui concerne le formalisme de la certitude des règles, on se raccroche à la notion de contraintes floues flexibles de [DUB 92] et [DUB 93] qui a été développée et qui permet de garder un cadre formel pour le raisonnement car :

- d'une part, le degré qui traduit la confiance que l'on a en la règle rejoint le concept de degré de nécessité développé dans [DUB 93]. En effet, plus le facteur confiance est grand (proche de 1), plus il semble naturel de tenir compte de cette règle, plus elle devient nécessaire au bon fonctionnement du système.
- d'autre part, dans notre domaine, le degré de possibilité tel qu'il est défini dans [DUB 93] est toujours égal à 1. En effet, cela s'explique par le fait que nous ne sommes pas dans un domaine de prospective où souvent les aboutissants ne sont pas toujours connus (par exemple, la recherche pétrolière). Dans notre domaine, on sait, malgré l'incomplétude de l'information, exactement vers quoi on tend : la fabrication d'un appareil électrique. Or toutes les règles qui concourent à cette conception sont susceptibles d'être utilisées. C'est la raison pour laquelle elles ont toutes un degré de possibilité égal 1. Il n'a donc pas été nécessaire d'implanter un tel degré.

Certaines des règles rencontrées n'ont pas de partie condition. Malgré tout, nous avons choisi le formalisme des règles de production. Nous avons été obligé de modifier certains aspects des règles de production classiques.

3. Propagation du flou

La propagation du flou se fait de plusieurs façons.

Tout d'abord, il y a la confiance même que l'on a dans la règle (pour ce qui est des règles floues). Ensuite, il y a le flou que portent les données avant et après la règle.

Une règle de production est de la forme :

Si *Condition* alors *Conclusion*.

Or, contrairement à la résolution classique, l'évaluation de la prémisse *Condition* ne sera pas seulement soit vraie, soit fausse, mais pourra aussi être nuancée. En conséquence, la *Conclusion* sera plus ou moins vraie (degré de véracité).

a. Prémises de règle [TUR 84]

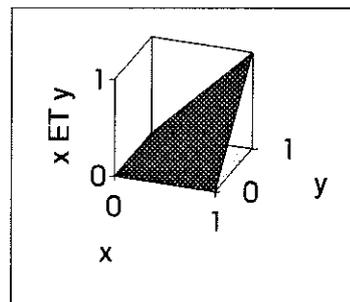
Dans les règles de notre système, la partie condition des règles peut utiliser des données floues comme sur l'exemple A9.

De plus, nous n'avons pas, comme dans un système expert classique, la prémisse égale à 0 ou à 1. L'évaluation de la prémisse donne un résultat nuancé compris entre 0 et 1 et qui indique le degré de véracité de la règle.

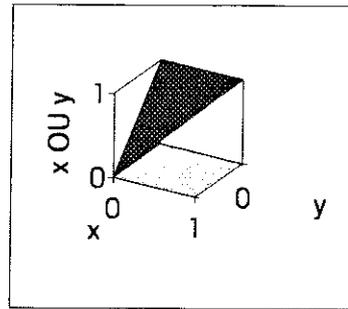
Nous avons donc dû :

- d'une part, créer des prédicats flous (comme *plus-petit-que*) [DUB 83a] [CHA 93] qui prennent en compte des données floues et expriment un degré de véracité.
- d'autre part, modifier les connecteurs logiques, ET et OU. En effet, ces deux connecteurs, dans la logique binaire, ont les résultats suivant :

ET	0	1
0	0	0
1	0	1



OU	0	1
0	0	1
1	1	1



Cependant, dès que l'on cherche à mettre en relation plusieurs propositions floues, il faut impérativement modifier ces connecteurs logiques : ce principe est bien connu des automaticiens.

Bien des solutions existent, chacune ayant des avantages et des inconvénients. On peut notamment, modéliser ET par la fonction Minimum ou par des fonctions paramétrées qui permettent de représenter des tendances plus ou moins pessimistes.

Dans notre cas, nous avons choisi la fonction MINIMUM pour ET et la fonction MAXIMUM pour OU. Cependant, dans notre application, il n'existe que peu de règles faisant appel à ces connecteurs (ce choix n'étant pas primordial pour notre application).

Nous avons choisi ces deux fonctions Minimum et Maximum car, elles sont les plus proches de la notion de ET, et de OU.

En effet, comme le montre la figure 25, les courbes de Minimum d'une part et de ET d'autre part ont les mêmes tendances.

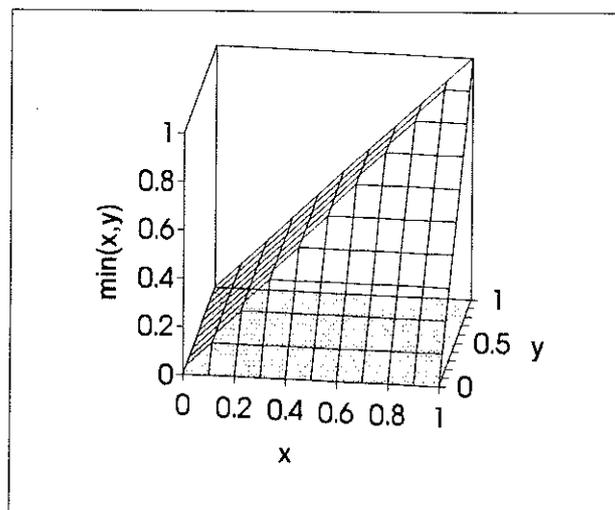


Figure 25 : Représentation de la fonction Minimum.

b. Conclusion de règle [LEB]

La propagation du flou dans la partie conclusion d'une règle floue se fait naturellement par l'affectation d'une valeur floue. Cette valeur peut résulter de calculs effectués sur des données (elles-mêmes floues), d'une estimation (affectation d'une valeur floue), etc...

Dans tous les cas, à la fin de l'exécution de la règle, cette nouvelle valeur est imprégnée de l'historique du raisonnement et donc regroupe un amalgame des degrés successifs de confiance.

De plus, en fonction du résultat de l'évaluation des prémisses (s'il y a une partie condition dans la règle), le facteur confiance de la valeur floue affectée dans la conclusion de la règle en sera modifié. En effet, cette valeur sera d'autant plus entachée d'incertitude si la prémisse de la règle donnant cette valeur n'est pas certaine.

4. Calcul flou

Une grande partie des règles de conception fait appel à des calculs simples. Ce sont des opérations classiques comme les quatre opérations, mais aussi d'autres opérateurs tels que la fonction exponentielle, les fonctions trigonométriques, etc...

Par exemple, on effectuera des calculs comme :

$$\frac{1,4 * 10^{-7} * i_{cc} * \sqrt{2}}{\Pi * dmps} \text{ ou encore } \frac{(15,069 * \log(\frac{i_{cc}}{1000} * \sqrt{2}) - 2,238)^2}{2 * 10^6 * dmps}$$

Les opérandes sont, la plupart du temps, des quantités floues. Cela nécessite donc de développer un ensemble d'opérations et de fonctions floues.

Nous développerons, dans le chapitre suivant, tout ce qui concerne l'arithmétique floue que nous avons mise au point.

Cependant, le fait d'être amené à effectuer un certain nombre de calculs flous, nous a conduit à définir une structure de données adaptée, comme nous le verrons dans la représentation des connaissances factuelles, afin de prendre en compte les choix effectués dans ce type de calculs.

On peut déjà remarquer l'existence d'un lien entre règles de calculs d'une part, et données d'autre part.

5. Cas plus particuliers

Dans le précédent classement des règles en fonction de leurs données et de leur conclusion, nous avons volontairement laissé de côté deux exemples, A3. et A5., c'est-à-dire les cas concernant respectivement les normes et les avis d'experts.

L'exemple cité au cas A3. concerne, en fait, une contrainte sur une valeur, cela sans spécifier si cette contrainte s'applique sur une quantité floue ou une valeur discrète. C'est pourquoi, dans l'ignorance, nous avons choisi de l'utiliser dans les règles dures alors qu'elle pourrait très bien l'être dans les règles floues. En fait, en l'appliquant avec les règles dures, cela permet plus facilement de revenir en arrière si cette contrainte devait être abandonnée.

L'exemple du cas A5. présente lui aussi un aspect particulier. En effet, dans tous les autres exemples, nous avons été confrontés à des données numériques (qui constituent la plus grande majorité des données). Cependant, il y a aussi des règles qui portent sur des données symboliques. Ainsi, le choix du matériau de la piste supérieure d'arc peut être représenté comme l'indique la figure 26.

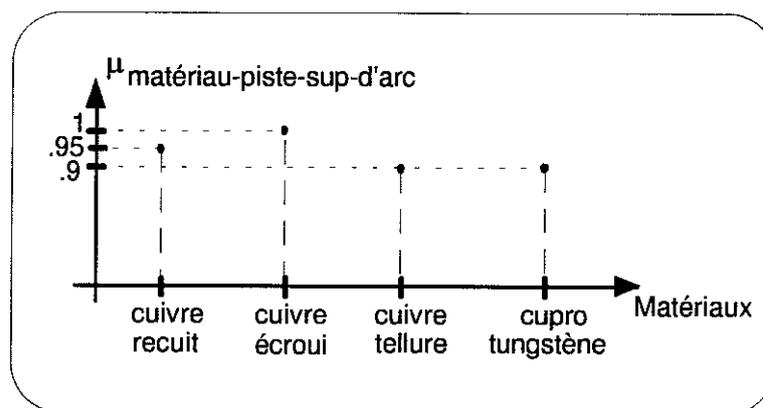


Figure 26 : Choix du matériau de la piste supérieure d'arc

Le choix du matériau de la piste supérieure d'arc, permet d'accéder aux propriétés du matériau choisi, comme par exemple sa masse volumique qui servira dans des calculs d'autres paramètres de cette piste. Or, il semble tout à fait anormal d'étendre le coefficient de certitude du matériau (par exemple 0.95 si l'on prend du cuivre recuit) à la masse volumique du matériau. En effet, une fois le matériau choisi, la masse volumique est une valeur discrète, précise et parfaitement définie.

C'est la raison pour laquelle, cette règle, et celles qui sont semblables, sera traitée à part. En fait, elle sera considérée comme un aspect stratégique. Son degré de certitude sera intégré à l'ensemble de la piste supérieure d'arc et donc à la solution générale.

De même que la connaissance déductive était liée à la stratégie, la connaissance factuelle est liée à la connaissance déductive. En effet, les données utilisées par la connaissance déductive doivent être homogènes dans leur représentation pour permettre une utilisation facile et générique. En effet, le but est d'utiliser toutes les règles de **façon identique**, bien qu'elles soient différentes.

Nous avons donc besoin d'un moule, d'une structure fixe, pour représenter toutes les données nécessaires au calcul de notre appareil électrique, ici la chambre de coupure d'un disjoncteur.

C. Connaissance factuelle

La connaissance factuelle, par opposition aux deux autres types de connaissance déjà présentés, englobe le savoir de l'expert. Elle représente l'ensemble des données que l'on va manipuler à l'aide des règles notamment.

Des exemples de connaissance factuelle peuvent être : la hauteur totale de la piste inférieure d'arc, le matériau choisi, le nombre de spires du bobinage, etc...

L'ensemble des données qui caractérisent l'objet à concevoir est souvent conséquent. Par exemple, pour la conception d'une machine asynchrone, cela nécessite de prendre en compte plus de 400 caractéristiques. Ceci est très lourd à gérer si l'on ne fait pas appel à des techniques adéquates. On doit ainsi structurer les données à l'aide d'un langage adapté : par exemple, un langage orienté objets.

1. Analyse des besoins

Nous allons, avant tout, définir les besoins que nous avons mis en exergue dans ce chapitre. Ils se définissent en deux points principaux :

- d'une part, la nécessité de modéliser toutes les données utilisées pour dimensionner l'objet à concevoir,
- d'autre part, la nécessité de dessiner l'objet à concevoir.

a. Généricité des données

Nous avons vu qu'il est nécessaire pour la stratégie, d'avoir les règles les plus homogènes possibles, en vue d'un traitement générique. Or, cela entraîne, en ce qui concerne les données, d'avoir aussi un formalisme le plus général possible. On touche ici à la notion de **moule**, de structure figée, pour la représentation des données. Ce moule, nous pouvons l'acquérir grâce aux langages orientés objets.

Il faut donc définir très précisément la connaissance que l'on veut structurer (arranger et hiérarchiser) et la manière dont on va la structurer.

Les données sur lesquelles les règles sont utilisées, doivent être décrites. Chaque donnée, appelée aussi paramètre, doit contenir un certain nombre d'informations comme :

- des informations concernant le flou :
 - ♦ une information sur la valeur floue du paramètre
 - ♦ une information sur le degré de certitude de la valeur floue du paramètre
 - ♦ etc ...
- des informations propres au paramètre en tant qu'entité physique (qu'il soit flou ou non) :
 - ♦ le nom du paramètre
 - ♦ l'unité du paramètre s'il y a lieu
 - ♦ etc ...
- des informations propres au système mais concernant le paramètre :
 - ♦ le type du paramètre
 - ♦ l'historique du paramètre permettant de retracer facilement son évolution au cours du raisonnement
 - ♦ etc ...

Par cette approche, il est intéressant de remarquer que la description de nos besoins nous oriente vers un ensemble de paramètres qui ont tous le même moule mais sans liens hiérarchiques entre eux.

b. Contraintes dues au dessin

Le fait de devoir dessiner l'objet va nous obliger à définir parfaitement tous les paramètres rencontrés. En effet, pour tracer une bobine, il faut savoir qu'elle est **composée** d'un conducteur et d'un isolant notamment. Pour tracer la piste supérieure d'arc, il faut pouvoir accéder facilement à toutes ses caractéristiques.

Tout d'abord, une brève analyse des données nous en montre la diversité. Et il n'est pas aisé de les regrouper dans une même classe.

Le type de données rencontrées dans notre application est principalement numérique (réels positifs et négatifs, entiers). Voici trois exemples, pour illustrer ce type de données :

- le nombre de spires du même bobinage est un entier positif,
- le diamètre moyen du bobinage est un réel positif,
- l'angle de chanfrein intérieur de la piste supérieure d'arc a un domaine restreint et est pris par "pas de 5 degrés".

Mais les paramètres peuvent aussi être de type symbolique comme par exemple :

- le type de matériau de la piste supérieure d'arc,
- le type de technologie du bobinage,
- la classe thermique des isolants du bobinage.

D'autre part, certaines données concernent des aspects uniquement structurels comme la hauteur de la piste inférieure d'arc, ou de nature fonctionnelle comme l'isolation, ou des aspects divers que l'on peut appeler caractéristiques ou modèles comme par exemple la résistance du conducteur.

Tous ces points soulevés nous conduisent forcément à poser la question suivante : comment faire une "bonne" décomposition ? car même s'il n'existe pas de décomposition unique, il y a des pièges qu'il faut éviter.

2. Langage à objets

a. Présentation générale

Nous allons brièvement présenter les quelques notions nécessaires à la bonne compréhension de notre modèle. Pour plus de précisions, on peut consulter [MEY 90] ou [NGU 91].

Les concepts de base d'un langage à objets sont les suivants : notions de classes, d'attributs, d'instances, de composition, de sous-classes (héritage).

Détaillons les rapidement :

- la classe : (cf. figure 27)

la notion de classe (appelée parfois catégorie) rejoint la notion de moule. C'est-à-dire, c'est l'ensemble de tous les éléments qui ont une même structure et un même comportement.

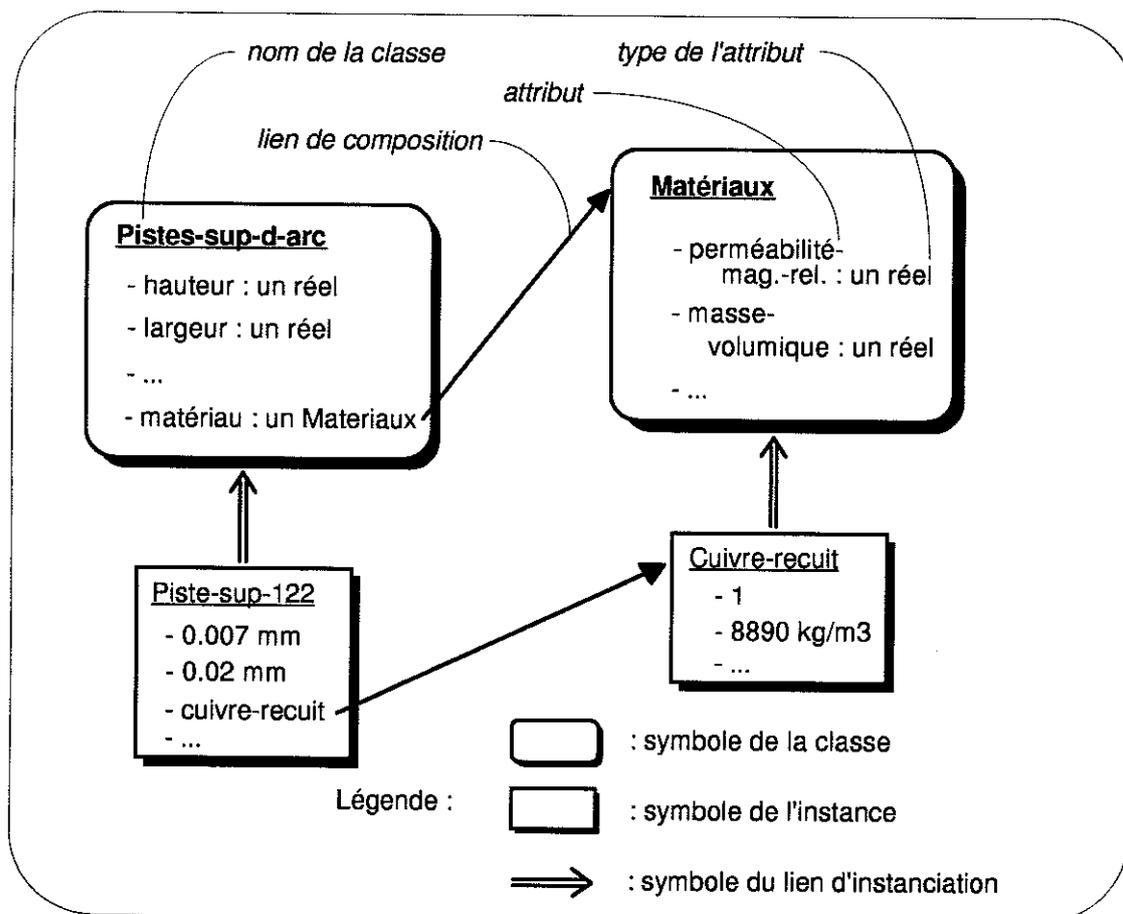


Figure 27 : Exemple de classe et d'instance.

- l'attribut : (cf. figure 27)
pour définir la structure et les propriétés des éléments de la classe, on utilise des attributs (appelés aussi champ) qui explicitent ces propriétés. Les attributs ont, eux-mêmes, un certain nombre de caractéristiques; notamment, ils ont un nom, un type, etc...
- l'instance : (cf. figure 27)
une instance représente un élément particulier de l'ensemble défini par la classe. Le processus d'instanciation correspond à l'affectation de valeurs aux attributs de la classe qui définit cet ensemble.
- la composition : (cf. figure 27)
lorsqu'un objet référence (au travers d'un de ses attributs) un sous-élément, on dira qu'il existe un lien de composition entre les deux.
- la sous-classe (notion d'héritage) : (cf. figure 28)
pour définir le comportement spécifique d'un sous-ensemble des éléments d'une classe, on utilise le concept de sous-classe. Toutes les instances attachées à une sous-classe possèdent le comportement, les propriétés de la classe mère en plus du comportement spécifique de la sous-classe. On parle d'héritage des propriétés de la classe mère vers la classe fille.

Ayant vu les principales notions des langages objets, nous allons maintenant détailler la décomposition que nous avons choisie.

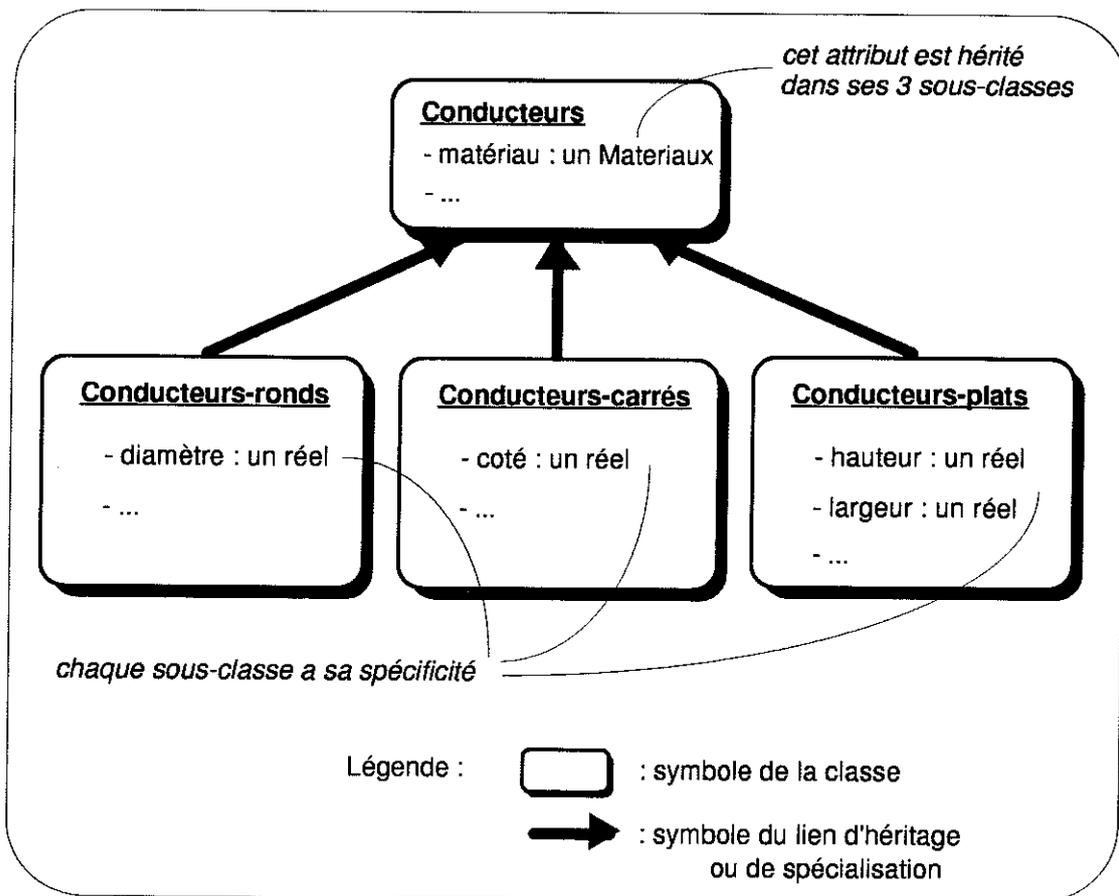


Figure 28 : Notion d'héritage.

b. Méthodologie de décomposition objets

Il faut malgré cette diversité regrouper ces paramètres. Il faut que chaque paramètre possède la même structure comme nous l'avons déjà dit, mais il faut aussi le rattacher à un objet physique (celui qu'il définit ou caractérise). Cette tâche est facilitée par la donnée du graphe de l'objet à concevoir par les experts (cf. figure 29).

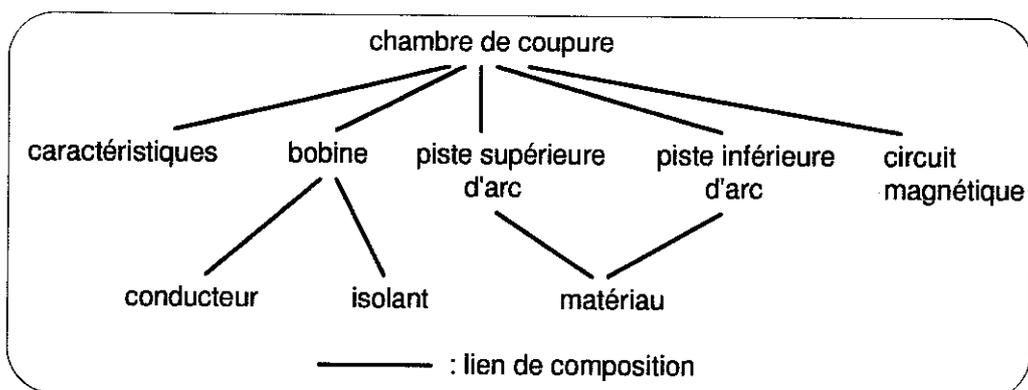


Figure 29 : Vue simplifiée du graphe de l'objet à concevoir.

Cependant, ce graphe ne peut être traduit directement avec les liens d'héritage et les classes. En effet, par exemple, le lien de composition décrit sur la figure 29, doit être interprété comme un attribut.

Voici quelques règles de méthodologie qui éviteront de trop grosses erreurs [FRA 94]:

- La notion de composition doit être exprimée par la création d'un attribut. On ne parle de composition qu'entre objets comme le montre l'exemple de la figure 30. Il faut remarquer qu'il n'y a aucune hiérarchie entre les deux classes (elles sont au même niveau) ce qui n'était pas le cas sur la vue simplifiée de la figure 29.

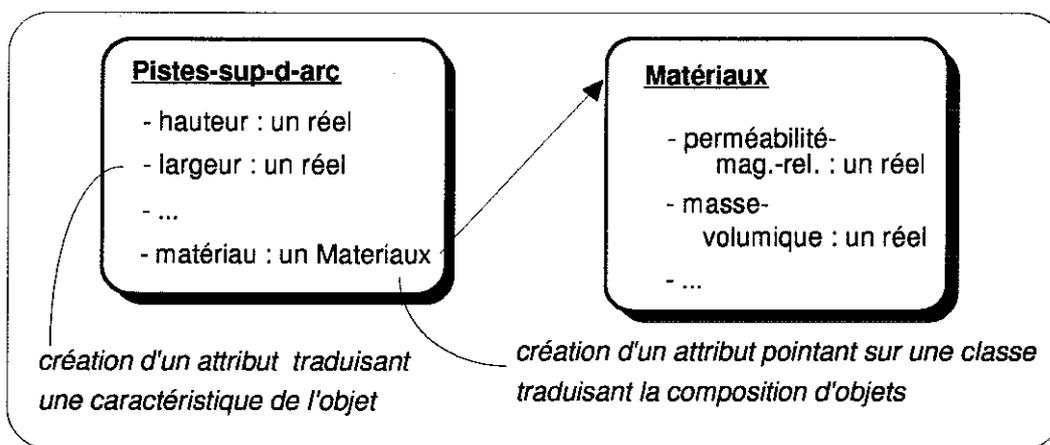


Figure 30 : Traduction du lien de composition.

- Chaque constituant d'un élément physique est traduit par la création d'un attribut. (cf. figure 30)
- La notion de spécialisation se traduit par la création d'une classe. L'exemple de la figure 31, montre cette notion.
- Dans le cas où les sous-classes ne peuvent être utilisées en même temps, il faut le signifier par la mise en oeuvre du lien de disjonction (cf. figure 31).
- La connaissance indépendante de l'application, mais propre au domaine comme les données sur les matériaux, doit aussi être structurée de la même manière. La seule différence est que cette base de données sera figée durant tout le processus de conception (ces instances étant créés au début du processus).

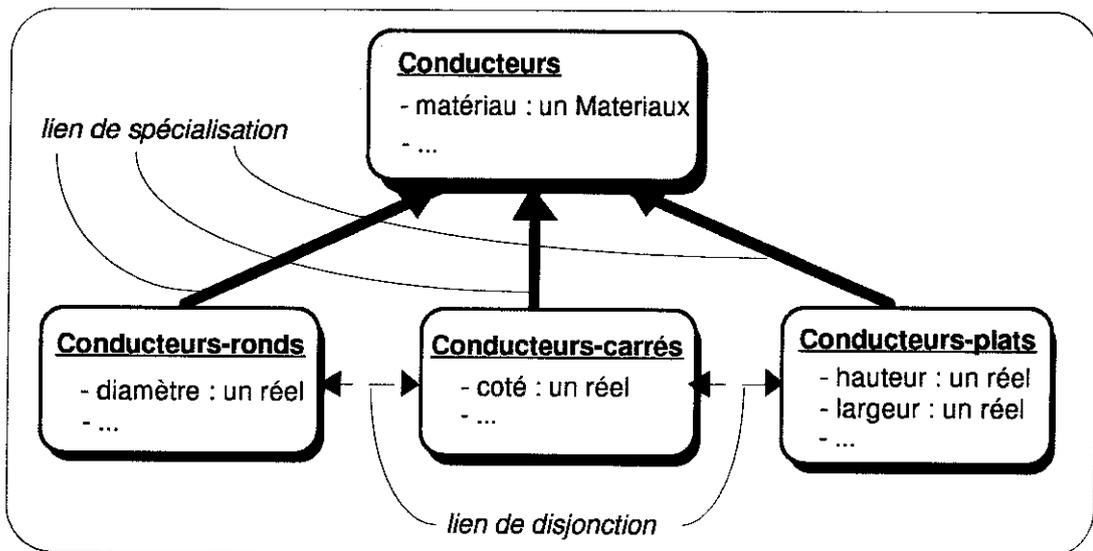


Figure 31 : Traduction de la spécialisation.

- Le dernier point sur lequel nous voulons revenir est le problème de l'arrêt d'une décomposition en sous éléments. En effet, c'est un problème qui se présente lors de chaque décomposition en objets. Nous pensons que les deux critères de **réutilisation** et de **définition de comportement** doivent guider notre choix.

On doit s'interroger pour savoir jusqu'où il faut pousser la décomposition, ce qui revient en fait à déterminer la raison de la création d'une classe. En effet, comme le montre la figure 32b, on aurait pu intégrer tous les attributs qui caractérisent le matériau dans la classe représentant la piste supérieure d'arc plutôt que de créer deux classes (cf. figure 32a).

Or si, dans le cas présenté figure 32, on ne crée pas une classe pour le matériau, on sera obligé de dupliquer les attributs relatifs au matériau pour la piste inférieure d'arc et pour le bobinage qui font tous appel à un matériau. D'autre part, cela signifie que l'on peut avoir plusieurs informations identiques, par exemple, si la piste supérieure d'arc et la piste inférieure d'arc utilisent le même matériau, ce qui est souvent le cas. Ce sera très difficile à gérer au niveau des valeurs, des liens, etc...

Nous pensons donc que le critère de réutilisation est fondamental pour la création des classes. Cependant, le critère de définition de comportement est aussi important. En effet, si un ensemble de caractéristiques ont le même comportement et si ces caractéristiques sont utilisées pour ce comportement, alors il semble bien qu'une classe soit créée.

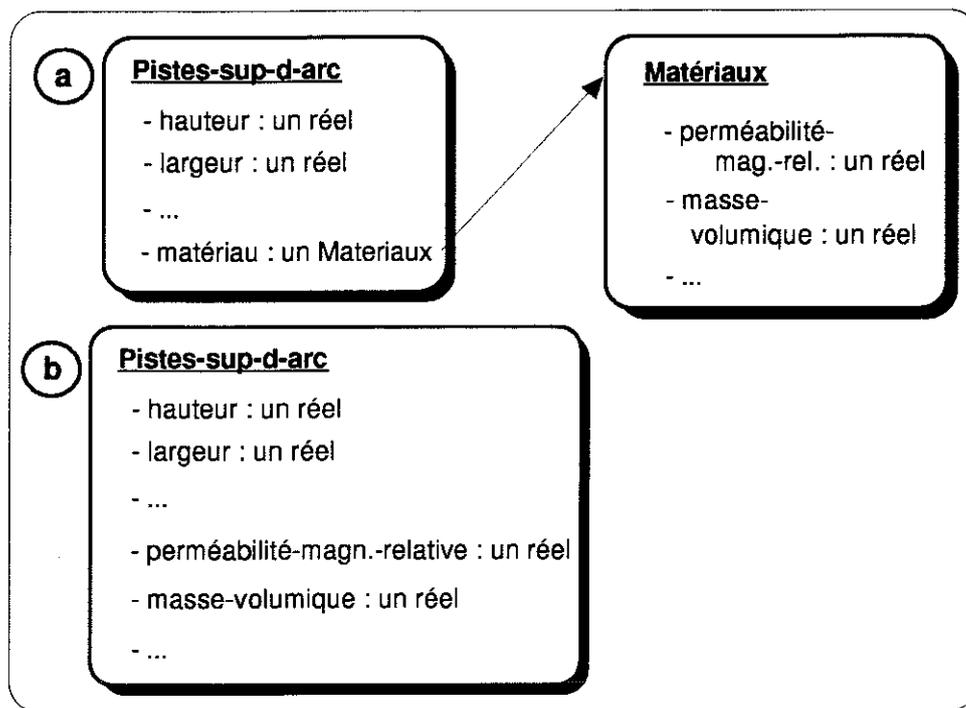


Figure 32 : Problème de l'arrêt de la décomposition.

- Il resterait encore un certain nombre d'aspects à développer comme par exemple tout ce qui concerne les points de vue et les modèles très présents dans la conception des machines asynchrones. Cependant, comme nous n'avons pas rencontré ces aspects là dans notre application, nous ne les développerons pas [GSI 93].

Cette méthodologie interviendra notamment dans la décomposition objets choisie qui est utilisée pour le module de calcul que nous développons au chapitre suivant.

- Chapitre IV -

Calcul flou

Comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, une grande partie des règles de conception est fondée sur des calculs.

Ces calculs portent soit sur des valeurs discrètes, soit sur des quantités floues.

Toujours dans un souci de généralité, nous avons mis au point une arithmétique floue qui prend en compte ces deux formes de calculs, **indépendamment** de leur type.

Nous avons été conduits à faire certains choix du fait de l'intégration de cette arithmétique floue dans notre système expert.

La définition de cette arithmétique utilise des opérandes flous et des opérateurs ou fonctions flous.

Les choix d'un modèle de données floues et d'un modèle de calculs correspondant sont entièrement liés. En effet, si l'on définit le même formalisme pour les deux modèles, on gagne en efficacité et en généralité.

C'est la raison pour laquelle nous ne dissociérons pas les données et les calculs dans la recherche d'un formalisme.

A. Présentation générale

Nous allons détailler les problèmes auxquels nous avons été confrontés lors de la conception de la chambre de coupure du disjoncteur. Cependant, de par l'expérience déjà acquise dans notre laboratoire, nous avons pu prendre en compte d'autres problèmes présents dans la conception de divers appareils comme le transformateur, le contacteur etc., et ainsi rendre notre calcul flou le plus général possible dans le domaine du génie électrique.

1. Données

Les valeurs des données, ou paramètres, sont dépendantes de l'expérience des experts. Ces paramètres ne sont ni aléatoires ni stochastiques, ils sont issus d'heuristiques.

Le type de données concerné par le calcul est numérique, aussi bien entier que réel.

Voici des exemples de données floues :

- le diamètre moyen du bobinage prend ses valeurs dans \mathfrak{R}_+ .
- le nombre de spires du bobinage prend ses valeurs dans l'ensemble des entiers,
- l'angle de chanfrein intérieur de la piste supérieure d'arc a un domaine restreint $[0^\circ, 360^\circ]$ et doit être pris par pas de 5 degrés.

2. Opérations

Dans le processus de conception, en électrotechnique, la plupart des données sont numériques et de ce fait, manipuler ces données consiste, très souvent, à effectuer des opérations algébriques (élémentaires ou non).

Nous avons donc étudié comment faire les calculs en fonction des besoins réels de notre domaine, le génie électrique. Nous devons effectuer non seulement des opérations élémentaires comme les 4 opérations binaires (+, -, *, /) et les opérations unaires correspondantes (opposé, inverse), mais aussi des fonctions trigonométriques ou autres (exponentielles, logarithmiques, etc...).

Par exemple, on est amené à évaluer des expressions du type :

$$\frac{1,4 * 10^{-7} * i_{cc} * \sqrt{2}}{\pi * dmps} \text{ ou encore } \frac{(15,069 * \log(\frac{i_{cc}}{1000} * \sqrt{2}) - 2,238)^2}{2 * 10^6 * dmps}$$

Nous allons tout d'abord présenter quelques méthodes connues de calculs.

B. Présentation des méthodes existantes les plus usuelles

1. Méthode par convolution sup-min [DUB 88][HAR 92][MAR]

Une quantité floue Q est un ensemble flou sur les réels, c'est-à-dire une application μ_Q de \mathfrak{R} dans $[0, 1]$. μ_Q sera vue comme une **distribution de possibilité sur les valeurs que peut prendre une variable**. On supposera que μ_Q est normalisée, à savoir qu'il existe $x \in \mathfrak{R}$ tel que $\mu_Q(x) = 1$.

On définit des propriétés et définitions pour les quantités floues (cf. figure 33):

- on appelle noyau l'ensemble des $x \in \mathfrak{R}$ tels que $\mu_Q(x) = 1$. Tout nombre appartenant au noyau est appelé valeur modale.

- on appelle support de la quantité floue Q , l'ensemble des $x \in \mathfrak{R}$ tels que $\mu_Q(x) > 0$.

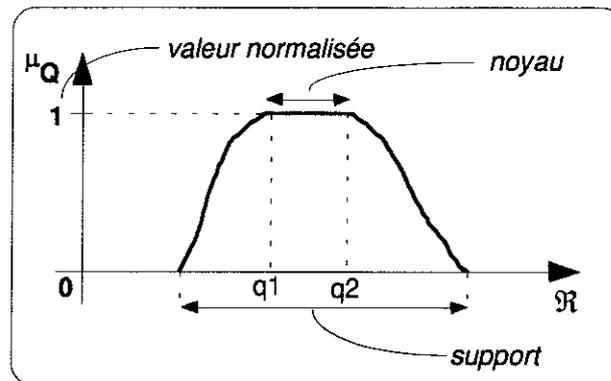


Figure 33 : Représentation d'une quantité floue.

La base du calcul des quantités floues est le **principe d'extension** qui permet d'étendre le calcul "classique" d'une fonction réelle sur des données réelles à une fonction floue sur des données floues.

Nous ne faisons que le citer : soit f une fonction réelle donnée, on cherche à effectuer $f(X_1, X_2)$. X_1 et X_2 sont des variables non-interactives. Soient Q_1 et Q_2 les ensembles flous de respectivement X_1 et X_2 alors :

$$\begin{aligned} \mu_{f(Q_1, Q_2)}(u) &= \sup \{ \min (\mu_{Q_1}(w_1), \mu_{Q_2}(w_2)) / f(w_1, w_2) = u \} \quad (\text{Eq. 1}) \\ &= 0 \text{ si } f^{-1}(\{u\}) = \emptyset \end{aligned}$$

Ainsi grâce à ce principe, on peut définir les opérations unaires :

$$\begin{aligned} \mu_{f(Q)}(u) &= \sup \{ \mu_Q(w) / f(w) = u \} \quad (= 0 \text{ si } f^{-1}(\{u\}) = \emptyset) \\ &= \mu_Q(f^{-1}(\{u\})) \text{ si } f \text{ est injective} \end{aligned}$$

De ces principes nous pouvons en déduire les 4 opérations binaires suivantes:

$$\begin{aligned} \mu_{Q_1+Q_2}(u) &= \sup \{ \min (\mu_{Q_1}(w), \mu_{Q_2}(u-w)) / w \in \mathfrak{R} \} \\ \mu_{Q_1-Q_2}(u) &= \sup \{ \min (\mu_{Q_1}(u+w), \mu_{Q_2}(w)) / w \in \mathfrak{R} \} \\ \mu_{Q_1 * Q_2}(u) &= \sup \{ \min (\mu_{Q_1}(w), \mu_{Q_2}(u/w)) / w \in \mathfrak{R} - \{0\} \} \text{ si } u \neq 0 \\ &= \max (\mu_{Q_1}(0), \mu_{Q_2}(0)) \text{ si } u = 0 \\ \mu_{Q_1/Q_2}(u) &= \sup \{ \min (\mu_{Q_1}(u*w), \mu_{Q_2}(w)) / w \in \mathfrak{R} \} \end{aligned}$$

Pour illustrer ces formules, détaillons l'addition de deux quantités floues Q_1 et Q_2 :

A partir de (Eq. 1), $f(w_1, w_2) = u$

comme f représente l'addition, on obtient $w_1 + w_2 = u$

et donc $w_2 = u - w_1$

En remplaçant cette substitution dans (Eq. 1),

on obtient alors : $\mu_{Q_1+Q_2}(u) = \sup \{ \min (\mu_{Q_1}(w), \mu_{Q_2}(u-w)) / w \in \mathfrak{R} \}$

Pour mieux expliciter cette notion de sup-min, prenons un exemple, toujours sur l'addition (cf. figure 34) :

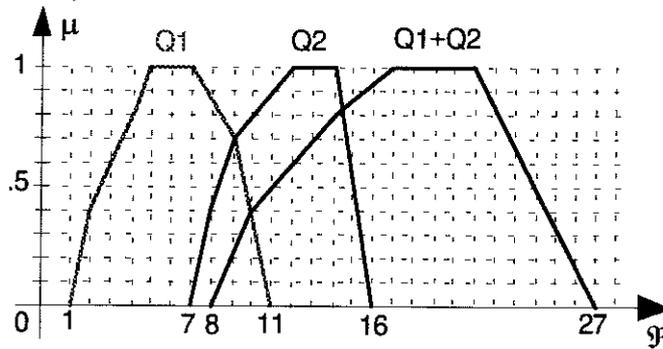


Figure 34 : Addition floue par la méthode supmin.

Nous allons prendre une discrétisation grossière pour u et w, en choisissant un pas égal à 1. On va procéder comme suit: on fixe w puis on fait évoluer u. En effet, telle qu'est écrite l'addition floue, on prend à w constant, le minimum des deux fonctions d'appartenance μ en fonction de u.

On s'aperçoit alors que tant que w est hors de l'intervalle [1, 11], $\mu_{Q1}(w) = 0$ donc $\min((\mu_{Q1}(w), \mu_{Q2}(u-w)))$ sera toujours égal à 0 quand w sera hors de cet intervalle. Cela permet de restreindre le domaine de parcours de w.

D'autre part, $\mu_{Q2}(u-w) = 0$ si u-w n'appartient pas à [7, 16], c'est-à-dire si u n'appartient pas à [7+w, 16+w]. Là encore, cela nous permet de restreindre le domaine de u sans pour cela en altérer le résultat.

Ainsi, on obtient :

$$\begin{aligned} & \sup \left\{ \begin{array}{l} w=1 \text{ et } u=8 \Rightarrow \min(0, 0) = 0 \\ \phantom{w=1 \text{ et }} u=9 \Rightarrow \min(0, 0.2) = 0 \\ \phantom{w=1 \text{ et }} \dots \\ \phantom{w=1 \text{ et }} u=17 \Rightarrow \min(0, 0) = 0 \end{array} \right\} = 0 \\ & \sup \left\{ \begin{array}{l} w=2 \text{ et } u=9 \Rightarrow \min(0.4, 0) = 0 \\ \phantom{w=2 \text{ et }} u=10 \Rightarrow \min(0.4, 0.4) = 0.4 \\ \phantom{w=2 \text{ et }} u=11 \Rightarrow \min(0.4, 0.7) = 0.4 \\ \phantom{w=2 \text{ et }} \dots \\ \phantom{w=2 \text{ et }} u=18 \Rightarrow \min(0.4, 0) = 0 \end{array} \right\} = 0.4 \\ & \dots \\ & \sup \left\{ \begin{array}{l} w=6 \text{ et } u=13 \Rightarrow \min(1, 0) = 0 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=14 \Rightarrow \min(1, 0.4) = 0.4 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=15 \Rightarrow \min(1, 0.7) = 0.7 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=16 \Rightarrow \min(1, 0.8) = 0.8 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=17 \Rightarrow \min(1, 0.9) = 0.9 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=18 \Rightarrow \min(1, 1) = 1 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=19 \Rightarrow \min(1, 1) = 1 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=20 \Rightarrow \min(1, 1) = 1 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=21 \Rightarrow \min(1, 0.5) = 0.5 \\ \phantom{w=6 \text{ et }} u=22 \Rightarrow \min(1, 0) = 0 \end{array} \right\} = 1 \\ & \dots \end{aligned}$$

Les limites de cette méthode :

On s'aperçoit rapidement qu'il n'est pas aisé de travailler avec de telles fonctions :

- d'une part, il faut trouver une fonction qui représente la forme de donnée floue que l'on désire (forme en "cloche", forme triangulaire, etc...).

Par exemple, si l'on choisit de représenter un nombre flou par une forme en "cloche" (de style gaussienne), on peut considérer la fonction paramétrée suivante : $f(x) = e^{-x(Ax-B)} - e^{\frac{B^2}{4A}} + 1$. Cette fonction, grâce à ces deux paramètres A et B, peut se déplacer sur Ox avec des étalements différents, tout en gardant, grâce à $e^{\frac{B^2}{4A}} + 1$, un maximum de 1 sur Oy.

Voici deux exemples, sur la figure 35, de paramétrage possible de cette fonction :

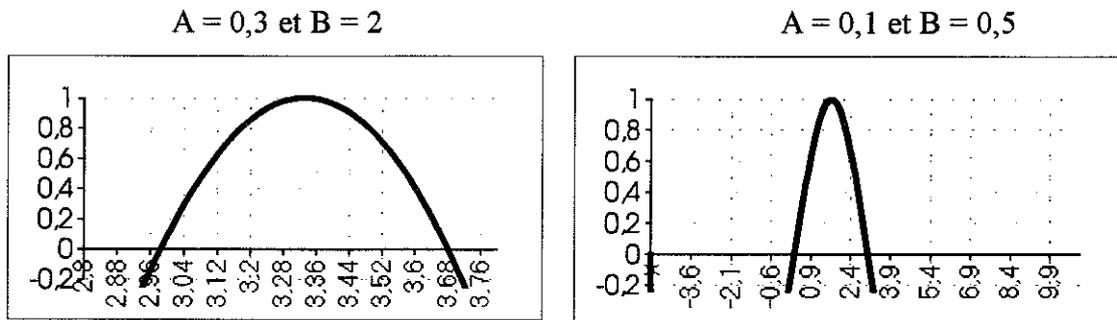


Figure 35 : Fonction paramétrée en "cloche".

De plus, il subsiste de réelles limites dans la représentation. En effet, par exemple, il semble très difficile de représenter des fonctions avec paliers à moins de considérer la composition de fonctions mais cela ne fera qu'accentuer la lourdeur de la manipulation.

Cependant, malgré toutes ces lourdeurs de gestion, on peut réduire la difficulté en ne prenant que des droites et non des courbes. Ainsi, on se retrouve avec des bouts de droites. Mais le problème reste entier car certains calculs ne conservent pas cette linéarité. On se retrouve donc avec des équations complexes.

- d'autre part, les opérations avec ce genre de fonctions sont malaisées car, comme le montre l'exemple traité sur l'addition, les calculs sont longs et fastidieux même si l'on restreint les intervalles des variables (u parcourt $[7+w, 16+w]$ au lieu de \mathcal{R} entier dans l'addition).

En effet :

- ♦ les expressions ci-dessus engendrent un grand nombre de calculs dû principalement au fait que l'on parcourt plusieurs fois le domaine (\mathcal{R} si c'est un nombre flou numérique),

Sur l'exemple de l'addition, w parcourant $[1, 11]$, u parcourant $[7+w, 16+w]$ et avec un pas de parcours de ces intervalles de 1, cela entraîne $11*10*1=110$ appels, à l'inverse de la fonction à calculer (ici la soustraction).

En général, si w parcourt $[a, b]$, u parcourt $[c, d]$ et si le pas choisi est p , alors on aura : $(b-a)*(d-c)*p^2$ appels à la fonction inverse de la fonction à calculer.

- ♦ en plus, cette complexité peut être accrue (et de façon très importante) si la modélisation des données n'est pas **très réfléchie** : comme le montre l'exemple de l'addition traitée plus haut, on fait constamment appel aux fonctions qui représentent les deux variables $Q1$ et $Q2$.
- Enfin, on peut se trouver bloqué si, par exemple, on est dans l'incapacité de calculer la fonction inverse de la fonction que l'on veut utiliser.

Pour toutes ces raisons, nous préférons nous tourner vers d'autres solutions.

2. Méthode par fonctions paramétrées (L/R) [DUB 88] [DUB 79] [DUB 87a]

La figure 36 montre le formalisme de cette représentation qui est tirée de "la théorie des possibilités".

Cette représentation, dite représentation paramétrée d'un intervalle flou, est obtenue à partir d'éléments d'une classe de fonctions $\mathcal{R}_+ \rightarrow [0, 1]$ notées L (left) ou R (right) et telles que :

- L est décroissante au sens large,
- semi-continue supérieurement, $L(0) = 1$
- et de plus : $\forall u > 0, L(u) < 1$; $\forall u < 1, L(u) > 0$ et $L(1) = 0$ ou $(L(u) > 0, \forall u \text{ et } L(+\infty) = 0)$.

L et R ainsi définies sont dites fonctions de forme. La fonction d'appartenance d'un intervalle flou M s'exprimera à l'aide de 2 fonctions L et R et de 4 paramètres $(b_i, b_s) \in \mathbb{R}^2, (\alpha, \beta) \in \mathbb{R}_+^2$.

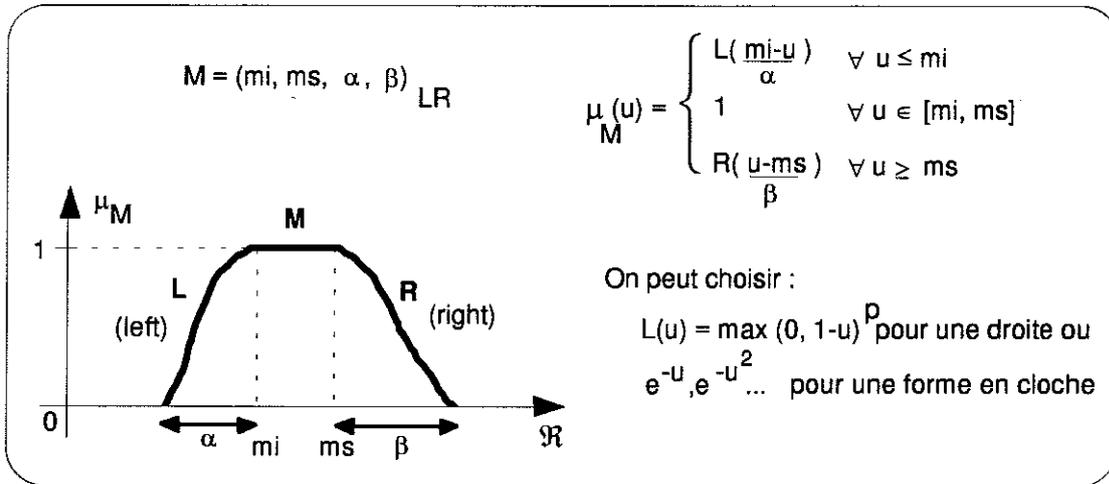


Figure 36 : Représentation paramétrée L/R.

Si $M = (m_i, m_s, \alpha, \beta)_{LR}$ et $N = (n_i, n_s, \gamma, \delta)_{LR}$ alors pour f isotone, f(M, N) devient : trouver $\lambda \in]0, 1]$ tel que :

$$w = f(m_i - \alpha * L^{-1}(\lambda), n_i - \gamma * L^{-1}(\lambda)) \text{ si } w \leq f(m_i, n_i) \tag{Eq. 2}$$

$$w = f(m_s + \beta * R^{-1}(\lambda), n_s + \delta * R^{-1}(\lambda)) \text{ si } w \geq f(m_s, n_s) \tag{Eq. 3}$$

On obtient alors pour les quatre opérations :

$$M + N = (m_i + n_i, m_s + n_s, \alpha + \gamma, \beta + \delta)_{LR}$$

$$M - N = (m_i - n_s, m_s - n_i, \alpha + \delta, \beta + \gamma)_{LR}$$

$$M * N \approx (m_i * n_i, m_s * n_s, m_i * \gamma + n_i * \alpha, m_s * \delta + n_s * \beta)_{LR} \text{ si } M > 0 \text{ et } N > 0$$

$$M / N \approx (m_i + n_i, m_s + n_s, \alpha + \gamma, \beta + \delta)_{LR}$$

Tout comme pour la première représentation, détaillons, par exemple, l'addition de deux intervalles flous A et B (cf. figure 37).

On procède, comme l'indique les équations (Eq. 2) et (Eq. 3), en transformant les fonctions de la forme $y = f(x)$ en équations de la forme $x = f^{-1}(y)$.

Soient A et B définis par : $A = (m_A, n_A, \alpha_A, \beta_A)_{LR}$

$$B = (m_B, n_B, \alpha_B, \beta_B)_{LR}$$

Si l'on effectue le calcul, d'abord sur le côté gauche, on obtient :

$$\mu_A(x_A) = L\left(\frac{m_A - x_A}{\alpha_A}\right) \quad \text{et} \quad \mu_B(x_B) = L\left(\frac{m_B - x_B}{\alpha_B}\right)$$

or $\mu_A(x_A) = \mu_B(x_B) = w$

$$\text{d'où } L\left(\frac{m_A - x_A}{\alpha_A}\right) = w \quad \text{et} \quad L\left(\frac{m_B - x_B}{\alpha_B}\right) = w$$

$$\text{et donc } x_A = m_A - \alpha_A * L^{-1}(w) \quad \text{et} \quad x_B = m_B - \alpha_B * L^{-1}(w)$$

$$\text{donc } x_A + x_B = m_A - \alpha_A * L^{-1}(w) + m_B - \alpha_B * L^{-1}(w)$$

$$\text{ce qui revient à écrire : } x_A + x_B = (m_A + m_B) - (\alpha_A + \alpha_B) * L^{-1}(w)$$

on voit alors que l'on peut tout transformer pour réintégrer le formalisme

$$\text{d'origine. On obtient alors : } w = L\left(\frac{(m_A + m_B) - (x_A + x_B)}{\alpha_A + \alpha_B}\right)$$

En procédant de la même façon pour le coté droit, on obtient :

$$A + B = (m_A + m_B, n_A + n_B, \alpha_A + \alpha_B, \beta_A + \beta_B)_{LR}$$

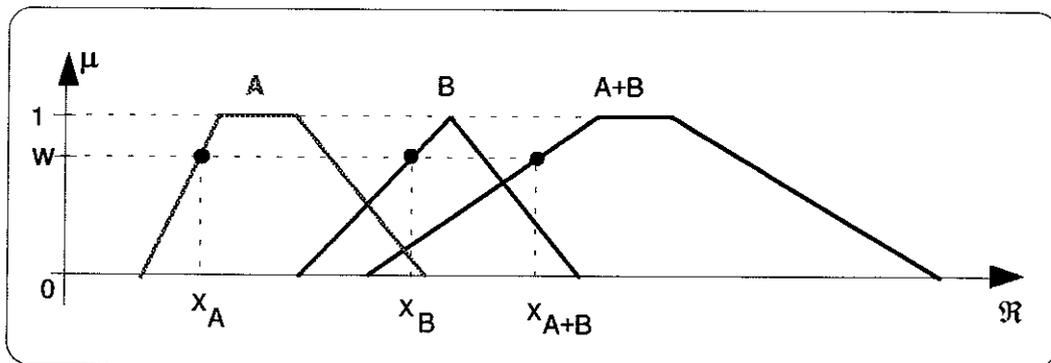


Figure 37 : Addition floue par la méthode L/R.

Les limites de cette méthode :

Elles sont surtout de l'ordre du calcul. En effet, nous pouvons surtout souligner trois points :

- Le formalisme d'une telle représentation est très pratique pour décrire des nombres flous. Cependant, il a le principal désavantage d'être très strict pour le choix des fonctions L et R. En effet, comme nous avons pu le noter sur l'exemple détaillé de l'addition, le principe de base consiste à réintégrer le formalisme donné par les fonctions de forme :

$$\mu_M(x_M) = L\left(\frac{m_M - x_M}{\alpha_M}\right) \text{ d'une part et } \mu_M(x_M) = R\left(\frac{x_M - m_M}{\beta_M}\right) \text{ d'autre}$$

part.

Or, si les deux nombres flous n'ont pas des fonctions de forme qui correspondent (LR pour M et LR pour N pour l'addition; ou LR pour M et RL pour N pour la soustraction par exemple), il est difficile de reconstruire les fonctions de forme du résultat. Si on ne peut pas le faire, c'est-à-dire que le résultat ne peut être réintégré dans le moule $(r_1, r_S, \alpha_r, \beta_r)_{LR}$, alors ce formalisme perd une grande part de son intérêt.

- Un autre désavantage lié à cette représentation est que l'on est conduit à faire des approximations, toujours pour réintégrer le formalisme présenté, quand on effectue notamment une multiplication ou une division. En effet, lors de ces deux opérations, on obtient un terme en $L^{-2}[\mu(\xi)]$ (en plus du terme en $L^{-1}[\mu(\xi)]$). Or ce terme n'est pas toujours réintégré dans le formalisme choisi (cela conduit à une équation du deuxième degré en L^{-1} qui n'a pas forcément de solution simple). Dans ce cas, on est conduit à faire une approximation.

Cette approximation peut être gênante. En effet, elle consiste à interpoler entre un point du noyau et un point du support (les extrémités) par la fonction $L^{-2}[\mu(\xi)]$ au lieu de la fonction $L^{-1}[\mu(\xi)]$. Comme le montre un exemple (cf. figure 38), si L représente une droite, on voit que l'approximation va rajouter de l'information qui ne doit pas être prise en compte. **Cela est problématique si l'on choisit une méthode de déflouification fondée sur l'aire comprise sous μ_A , comme les méthodes COA et FM : l'aire n'étant pas du tout la même, le point résultant de la déflouification sera différent.**

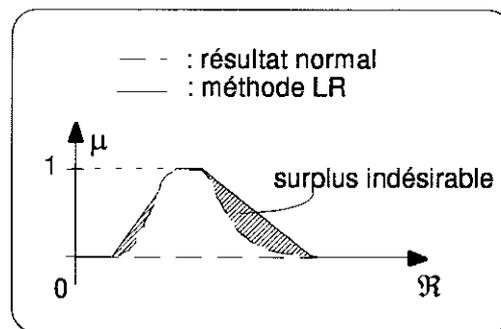


Figure 38 : Problème posé par l'approximation de $L^{-2}[\mu(\xi)]$.

- Enfin, il est intéressant de soulever le problème des fonctions comme racine carrée ou sinus, entre autres.

Prenons l'exemple du calcul de sinus(A). On va donc appliquer la méthode utilisée pour l'addition,

Si l'on effectue le calcul, d'abord sur le côté gauche, on obtient :

$$\mu_A(x_A) = L\left(\frac{m_A - x_A}{\alpha_A}\right) \quad (\text{Eq. 4})$$

et donc $x_A = m_A - \alpha_A * L^{-1}(w)$

on applique alors le sinus : $\sin(x_A) = \sin(m_A - \alpha_A * L^{-1}(w))$

ce qui revient à écrire :

$$\sin(x_A) = \sin(m_A) * \cos(\alpha_A * L^{-1}(w)) - \sin(\alpha_A * L^{-1}(w)) * \cos(m_A)$$

on voit alors que l'on ne peut pas retomber sur une expression simple de la forme $\sin(x_A) = f(m_A) + g(\alpha_A) * L^{-1}(w)$ qui nous permettrait de réintégrer le formalisme de l'équation (Eq. 4).

On est donc dans l'incapacité d'avoir de façon simple même une approximation du sinus sur les points du noyau et sur les étalements.

3. Méthode dite α -coupée [ZHA 91a]

La méthode par α -coupes (ou coupes de niveaux), consiste à considérer le nombre flou comme un ensemble d'intervalles de points à μ constant. La définition exacte d'une α -coupe est :

$$\forall \alpha \in [0, 1], A_\alpha = \{x \in \mathfrak{R} / \mu_A(x) \geq \alpha\}. \text{ (cf. figure 39)}$$

On peut en tirer quelques propriétés intéressantes, par exemple comme :

$$(A \cap B)_\alpha = A_\alpha \cap B_\alpha$$

ou encore

$$(A \cup B)_\alpha = A_\alpha \cup B_\alpha.$$

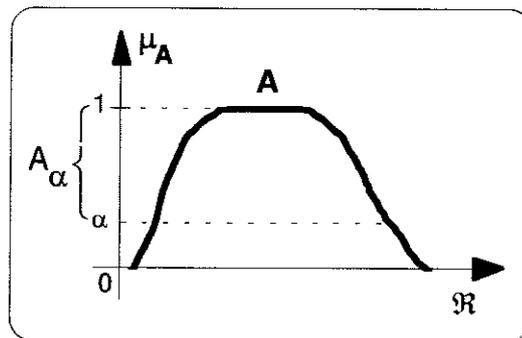


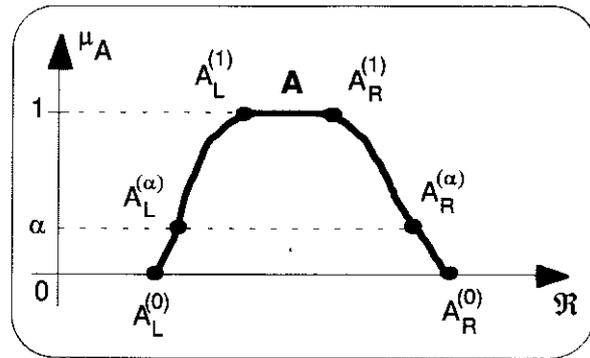
Figure 39 : Exemple de représentation α -coupée

On peut voir, sur la figure 40, un exemple de cette modélisation formalisée notamment par [ZHA 91a].

Les auteurs définissent un nombre flou étendu par :

- un nombre flou étendu est représenté par une fonction de distribution μ de \mathfrak{R} vers $[0; 1]$, avec : $\mu(x)$ continue par partie et convexe,
- il existe un intervalle de points I tel que $\forall i \in I, \mu(i) = 1$,
- on peut définir 3 points tels que : $x_1 \in \mathfrak{R}, x_2 \in \mathfrak{R}, x_3 \in \mathfrak{R}$, et $x_1 < x_2 < x_3$ alors si $\mu(x_1) = 0$ et $\mu(x_3) = 0$ alors $\mu(x_2) > 0$.

Considérons une quantité floue A (cf. figure 40). Les symboles $A_L(\alpha)$ et $A_R(\alpha)$ sont utilisés pour représenter le point extrême gauche (left) et le point extrême droit (right) de l'intervalle de niveau α . On note :



$$A \rightarrow [A_L(\alpha); A_R(\alpha)] \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Figure 40 : Formalisme α -coupe.

Le calcul sur des nombres flous étendus se ramène aux calculs d'intervalles sur chaque α -coupe. Voici pour les quatre opérations, ce que donne le calcul d'intervalles :

Soient A et B deux nombres flous étendus, tels que :

$$A \rightarrow [A_L(\alpha); A_R(\alpha)] \quad \text{et} \quad B \rightarrow [B_L(\alpha); B_R(\alpha)]$$

$$C = A + B$$

$$\rightarrow [C_L(\alpha), C_R(\alpha)] = [A_L(\alpha) + B_L(\alpha), A_R(\alpha) + B_R(\alpha)]$$

$$C = A - B$$

$$\rightarrow [C_L(\alpha), C_R(\alpha)] = [A_L(\alpha) - B_R(\alpha), A_R(\alpha) - B_L(\alpha)]$$

$$C = A * B$$

$$\rightarrow [C_L(\alpha), C_R(\alpha)] = [\min(A_L(\alpha)*B_L(\alpha), A_L(\alpha)*B_R(\alpha), A_R(\alpha)*B_L(\alpha), A_R(\alpha)*B_R(\alpha)), \max(A_L(\alpha)*B_L(\alpha), A_L(\alpha)*B_R(\alpha), A_R(\alpha)*B_L(\alpha), A_R(\alpha)*B_R(\alpha))]$$

$$C = A / B$$

$$\rightarrow [C_L(\alpha), C_R(\alpha)] = [A_L(\alpha), A_R(\alpha)] * [1/B_L(\alpha), 1/B_R(\alpha)] \text{ si } 0 \notin [B_L(\alpha), B_R(\alpha)]$$

Les limites de cette méthode :

Nous pensons que cette méthode pêche, telle qu'elle est développée par [ZHA 91a], sur au moins deux points :

- d'une part, la multiplication, développée ici, balaye pour chaque α -coupe toutes les combinaisons possibles (produit cartésien) ce qui, si le nombre d' α -coupes est grand, risque d'être excessif en temps de calcul.
- d'autre part, la méthode présentée par [ZHA 91a] ne permet pas de modéliser toutes les données que nous rencontrons en génie électrique, comme un nombre flou de spires.

Comme nous l'avons dit, cette méthode nous séduit par sa facilité de représentation des données et par la rapidité avec laquelle on peut effectuer des calculs. Ce sont les raisons principales qui nous ont poussés à adopter cette méthode, tout en l'améliorant sur les trois points suivants : représentation des données, faisabilité et rapidité des calculs.

C. Méthode α -coupée améliorée

Compte tenu des limites des trois méthodes présentées, nous avons défini et mis au point une méthode de calculs fondée sur une nouvelle représentation α -coupée et sur le calcul d'intervalles. Certains se sont déjà inspirés de cette méthode [ZHA 91a]. Cependant, il reste des lacunes tant au niveau de la représentation des données qu'au niveau du calcul flou qui doit être enrichi d'un certain nombre d'opérations, pour satisfaire nos besoins en génie électrique.

Nous avons choisi une modélisation qui prenne en compte toutes les contraintes du processus de conception, c'est-à-dire : pouvoir modéliser des paramètres ayant des contraintes de type (entiers, réels, autre), avoir la possibilité de réaliser des calculs parfois complexes sur ces mêmes paramètres et, surtout, trouver une méthode capable d'être assez efficace et rapide pour pouvoir l'intégrer dans un système expert de conception comportant un nombre important de règles.

Tout d'abord, voici la structure de données que nous avons choisie.

1. Représentation des données

a. Type de discrétisation

Nous avons choisi la représentation α -coupée, c'est-à-dire en fait une discrétisation horizontale que nous avons préférée à une discrétisation verticale (plus courante).

En effet, la discrétisation horizontale permet, comme μ (la fonction d'appartenance) varie toujours entre 0 et 1, d'avoir constamment le même nombre de points à traiter (à un point près : si le noyau a 1 ou 2 points), quelle que soit la variable floue modélisée. Ceci est illustré par la figure 41.

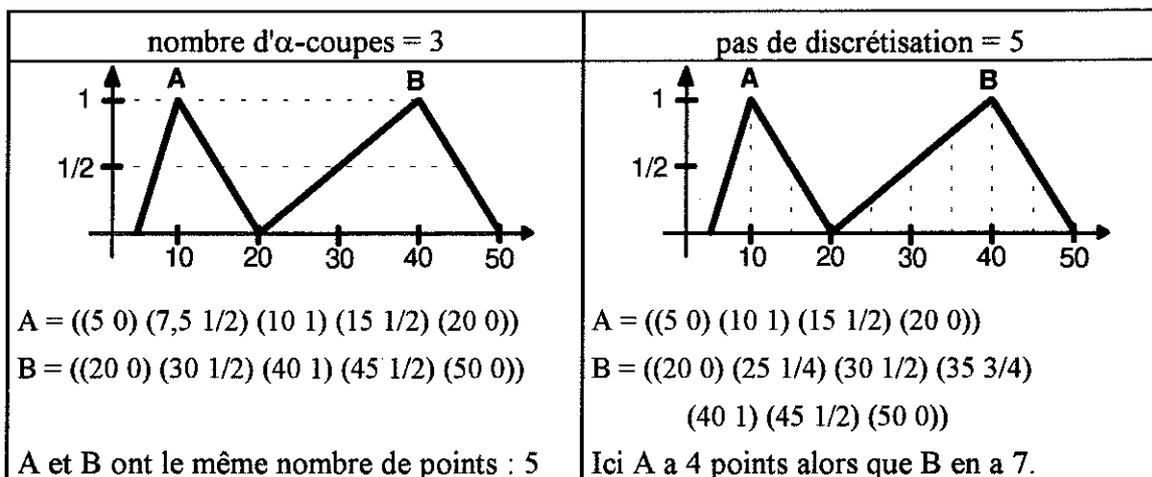


Figure 41 : Exemple de différence entre une discrétisation horizontale et verticale.

Cela permet, notamment, de pouvoir maîtriser le facteur temps de calculs qui peut prendre beaucoup d'importance dans nos applications en génie électrique.

b. Définitions

Nous avons étendu la notion de nombre flou à celle de variable floue ou paramètre flou (terme plus fréquemment utilisé en électrotechnique). Pour cela, nous avons défini une structure englobante que nous avons appelée *Nbres-flous* et qui est un ensemble de sous-structures nommées *éléments*. Chaque élément est caractérisé par un *étalement gauche*, un *noyau* et un *étalement droit*. Ces trois sous-parties sont représentées par des couples de points (abscisse, α -coupe).

Le *noyau* (par abus de langage) est en fait la partie haute de l'élément, mais n'est pas forcément de hauteur égale à 1. Il contient le point ou les deux points extrêmes associés à l' α -coupe correspondante.

L'*étalement gauche* et l'*étalement droit* sont modélisés par la liste de tous les couples (abscisse, α -coupe) dans l'ordre croissant de l' α -coupe. Le nombre de points des étalements dépend du pas sur l'axe des ordonnées (selon le nombre d' α -coupes voulu).

Il est intéressant de noter que le formalisme ainsi établi permet d'englober le monde des réels (et a fortiori celui des entiers) dans le monde des flous.

D'un point de vue formel, on peut écrire : si P est un paramètre flou, alors on le note $P = \bigcup_{i=1}^n (E_{gche}^i, E_{noy}^i, E_{dt}^i)$ où n est le nombre d'*éléments*, E_{gche}^i est la liste des points de l'*étalement gauche* du ième *élément*, etc...

Par les *éléments* E^i , on rejoint la méthode α -coupée de [ZHA 91a].

Les conditions:

- Chaque paramètre flou doit avoir au moins un élément dont la hauteur du noyau égale 1.
- Chaque élément doit être convexe.
- Chaque élément est continu par partie.

L'interpolation entre α -coupe:

Comme nous pouvons le voir, ce formalisme n'est pas tributaire des fonctions de forme (cf. §IV.B.2). Entre deux α -coupes, nous faisons une interpolation linéaire.

Nous avons choisi cette option car elle est très simple à mettre en oeuvre.

De plus, elle n'est pas limitative quant aux formes des fonctions d'appartenance car il suffit de choisir un nombre d' α -coupes correspondant à la forme voulue (plus, le nombre d' α -coupes sera grand, plus il sera facile d'avoir des courbes).

Cependant, il est tout à fait possible de changer cette interpolation linéaire par d'autres méthodes, comme celle des moindres carrés par exemple.

Grâce à ce formalisme, on augmente le champ des possibilités de modélisation des données :

- d'une part, avec notamment la prise en compte des nombres flous entiers, on pourra modéliser une assertion du type :

~~ un nombre de spires
plutôt égal à 10 mais
compris de façon sûre entre
6 et 12 ~~

sera représenté par plusieurs
éléments (cf. figure 42).

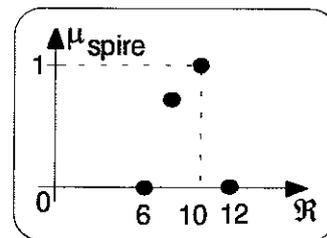


Figure 42 : Nombre de spire

Dans le même sens, on pourra prendre en compte, facilement, des contraintes sur les paramètres comme par exemple :

~~ les angles de chanfrein intérieur et extérieur doivent être pris par pas de 5 degrés. ~~

On obtient alors un ensemble de valeurs, cet ensemble est une variable floue.

- On peut aussi envisager de modéliser des variables intégrant plusieurs formes floues. Cela peut notamment permettre d'avoir plusieurs critères totalement différents ou nuancés en un même paramètre, comme le montre la figure 43.

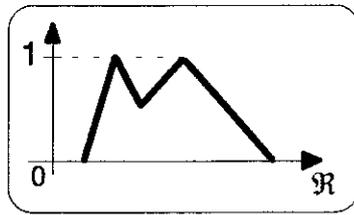


Figure 43 : Paramètre englobant plusieurs critères.

Cela présente un intérêt dans la problématique de conception floue car, comme on a pu le voir dans le paragraphe sur l'agrégation, quand on fait appel à des règles floues, il arrive que l'on soit obligé d'intégrer plusieurs critères dans la même variable floue.

2. Calculs

En ce qui concerne les calculs, nous avons étendu la liste de opérations à toutes sortes de fonctions :

- Opérations élémentaires : +, -, opposé, *, /, inverse.
- Opérations monotones : $\exp(x)$, $\text{Log}(x)$.
- Opérations non monotones mais continues : $\cosinus(x)$, $\sinus(x)$
- Opérations non monotones et discontinues : $\text{tangente}(x)$

Chaque fonction est traitée en fonction de ses particularités. En règle générale, nous avons préféré faire un peu plus d'analyse avant certains calculs (comme la multiplication) afin d'éviter un grand nombre d'opérations inutiles. Ainsi, dans notre représentation, nous n'utilisons pas les fonctions minimum ou maximum car nous avons, à coup sûr, la bonne valeur et elle seule.

Il est aussi intéressant de remarquer que grâce au formalisme mis en oeuvre, un certain nombre de problèmes peuvent être pris en compte :

- par exemple, dans tout système, la division par zéro pose des problèmes. Dans notre modèle aussi (!), cependant, grâce à l'union d'éléments, une

solution est envisageable (ce qui n'est pas le cas avec la méthode α -coupée de [ZHA 91a]). Elle consiste à scinder en deux le paramètre qui est à cheval sur 0 et de le transformer en deux éléments distincts, excluant chacun 0.

Nous ne nous étendrons pas sur toutes les opérations. Ce qui nous semble important, c'est la philosophie générale qui nous a guidés. Nous pensons, en effet, que ce qui importe quand on fait du calcul flou par une méthode α -coupée, c'est d'étudier la **monotonie** et la **continuité** de la fonction que l'on veut utiliser.

Ainsi, si l'on prend l'exemple de la fonction trigonométrique sinus, le fait de prendre pour chaque α -coupe le minimum et le maximum de toutes les possibilités ne fonctionne pas. C'est incorrect car la fonction sinus n'est pas monotone sur \mathfrak{R} .

Considérons la variable floue représentée sur la figure 44.

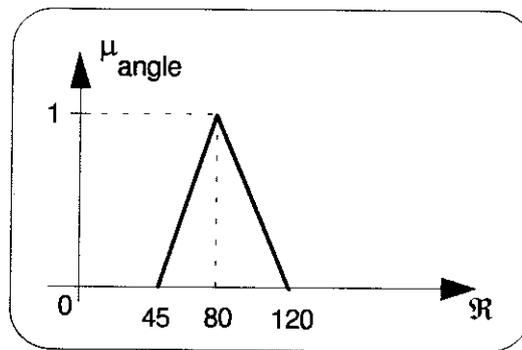


Figure 44 : Variable floue représentant un angle.

On a : $\sin(45) = 0.707$
 $\sin(120) = 0.866$
 $\sin(80) = 0.984$

Si l'on applique brutalement le minimum et le maximum, on obtient une variable floue résultante qui a la forme de la variable floue représentée sur la figure 45.

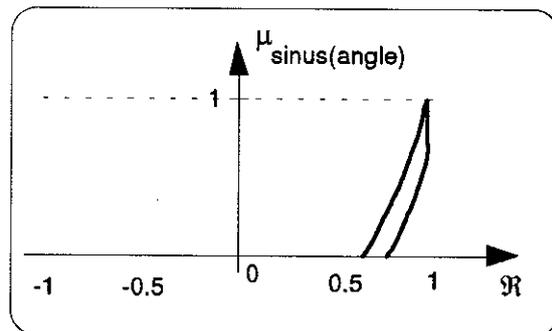


Figure 45 : Mauvais calcul de sinus.

Or le résultat correct est représenté sur la figure 46b (il n'a pas été calculé point par point mais la forme est la bonne). Il est obtenu en scindant le paramètre d'entrée en deux parties. Chaque partie correspond à un domaine sur lequel la fonction sinus est monotone (cf. figure 46a) (nous avons volontairement agrandi l'espace entre les deux éléments pour une meilleure vision (en réalité, il est nul)).

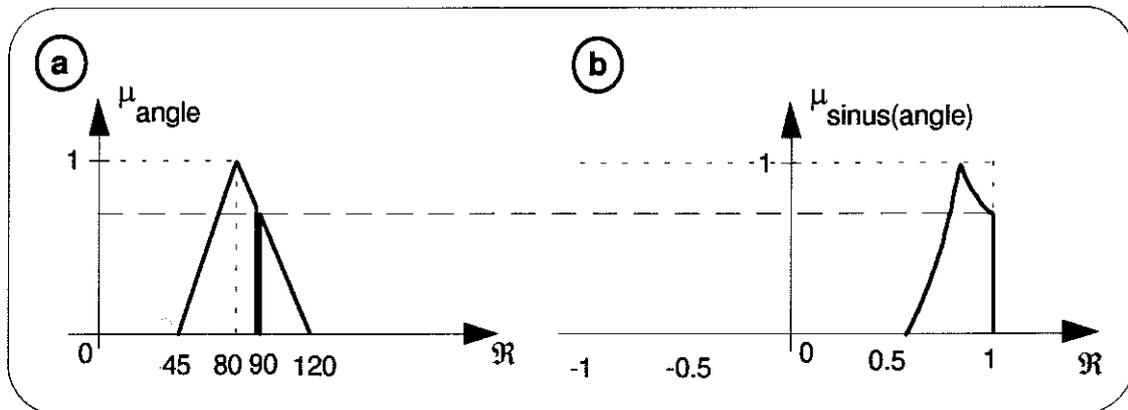


Figure 46 : Calcul correct du sinus.

En ce qui concerne la discontinuité de fonction, on peut noter que, par exemple, la fonction trigonométrique tangente est discontinue pour la valeur de 90° (cf. figure 47).

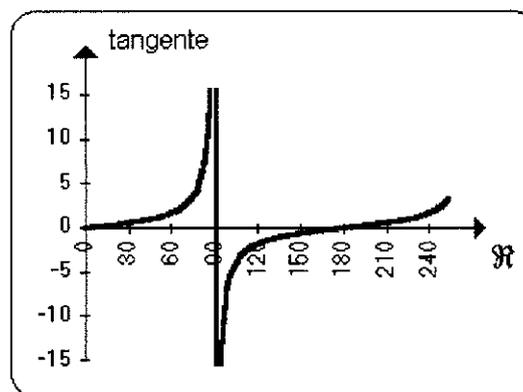


Figure 47 : Fonction tangente.

Cela pose des problèmes car là encore, si l'on ne tient pas compte de ce fait, on obtient des formes floues incorrectes. Cependant, dans ce cas précis, contrairement au problème de la monotonie, il n'y a pas de réelle solution, car s'il existe un point de discontinuité, cela signifie que la fonction n'est pas définie en ce point. On obtient, ainsi, des formes floues comme celle représentée par la figure 48. Le problème serait résolu si

notre formalisme prenait en compte les formes floues qui ont des asymptotes, ce qui n'est pas encore le cas.

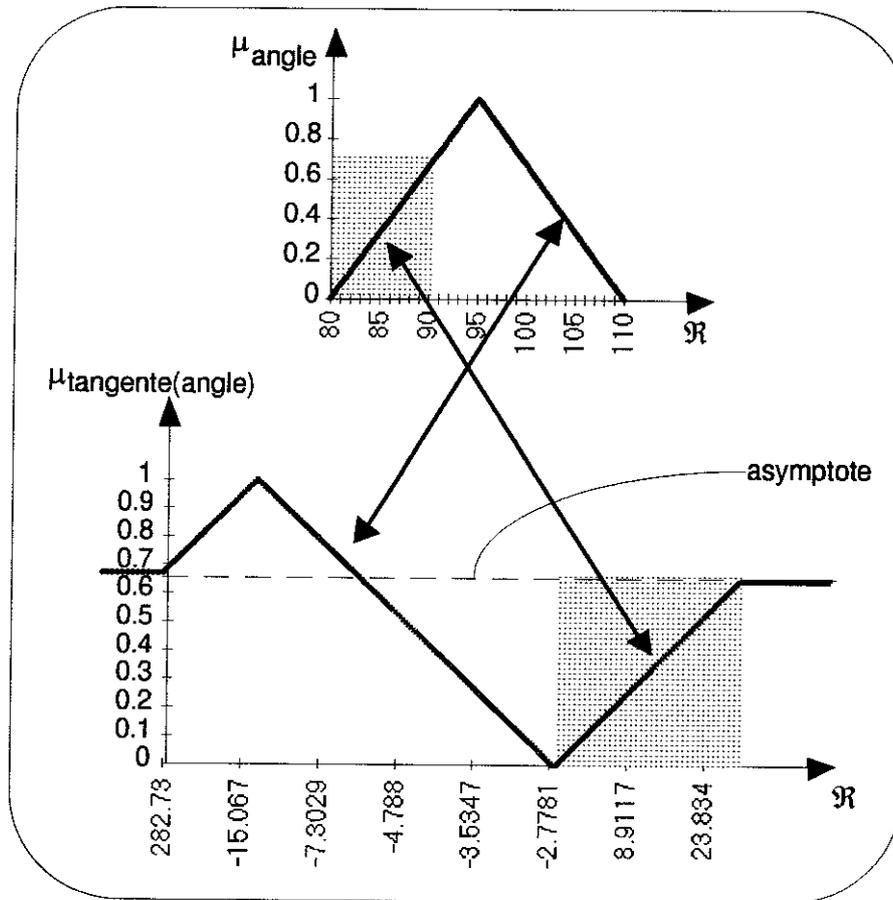


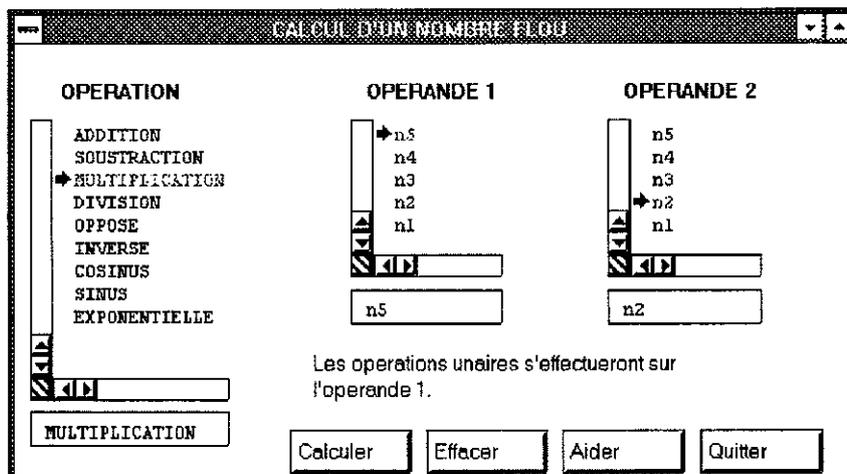
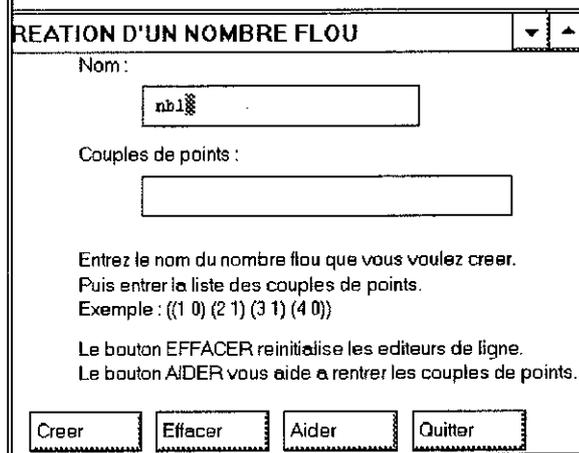
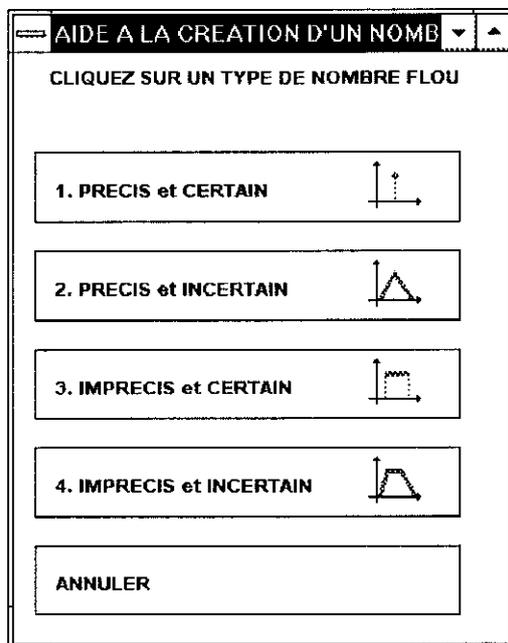
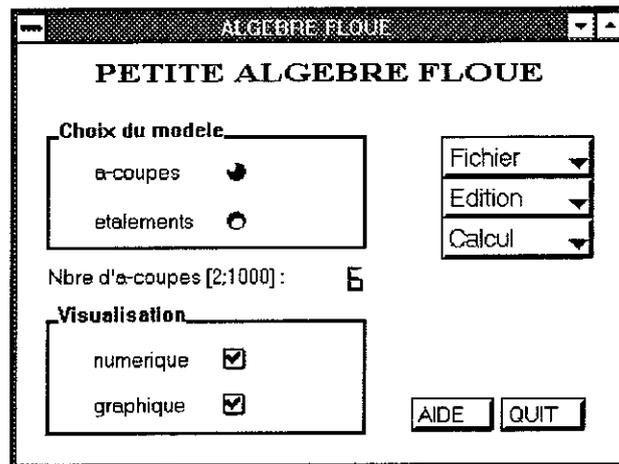
Figure 48 : Variable floue ayant une asymptote.

3. Module de calculs flous

Afin de tester les possibilités de l'arithmétique ainsi modélisée, nous avons mis au point un logiciel de calculs flous qui permet d'effectuer toutes les opérations précitées et d'en apprécier les résultats.

Pour noter les différences entre les 3 méthodes exposées succinctement ci-dessus, nous les avons implantées dans le logiciel. Il est ainsi possible de comparer les différents résultats donnés par les différentes méthodes (à condition que la fonction choisie soit implantée dans la méthode à comparer !).

Voici quelques écrans de l'interface :



- Chapitre V -

Réalisation informatique
et résultats

Dans ce chapitre, nous présentons l'application réalisée. Pour faciliter cette réalisation, nous avons utilisé un générateur de système expert : SMECI (Système Multi Expert de Conception et d'Ingénierie) qui présente de nombreuses potentialités en tant que "boîte à outils". SMECI offre les briques de base sur lesquelles nous avons pu bâtir l'architecture de notre système.

SMECI offre une grande fidélité pour le classement de la structuration de la connaissance en trois catégories, celles définies au chapitre III : la connaissance factuelle, la connaissance déductive et la connaissance stratégique.

Dans SMECI, toutes les données présentes dans le système utilisent le formalisme objet. Ceci est vrai pour les informations relatives au domaine d'application, mais aussi pour toutes les structures relatives au système SMECI (chaque classe "système" sera suffixée par "S.", comme par exemple la classe des tâches S.Task).

Enfin, ce logiciel s'appuie sur le langage LE LISP et sur l'interface graphique AIDA, ce qui lui confère un haut niveau d'interactivité.

Nous avons décidé de présenter l'application réalisée en prenant le cheminement inverse du chapitre III. Nous débuterons donc par les problèmes relatifs aux données, puis nous présenterons les points les plus marquants concernant les règles, enfin nous donnerons la stratégie choisie.

Pour terminer, nous décrirons une session et nous montrerons quelques résultats.

A. Connaissance factuelle

La connaissance factuelle, mise en oeuvre dans SMECI, est formalisée par le modèle Objet.

1. Vocabulaire

Dans SMECI, la notion de classe est appelée *catégorie*. Comme nous l'avons dit dans la présentation succincte des langages objets (cf. §III.C.2.a), une classe est,

notamment, décrite par ses attributs (ici nommés *champs*). La figure 49 montre un exemple de classe.

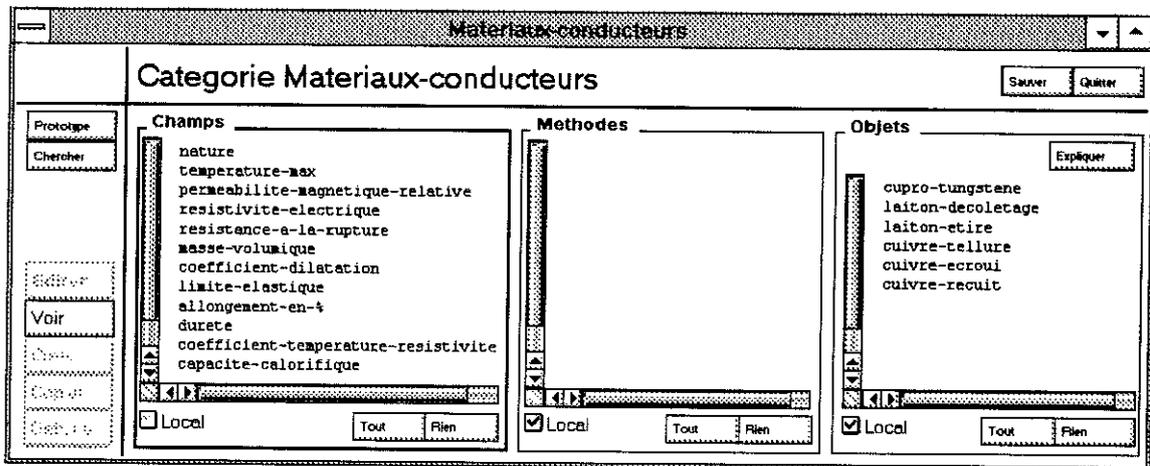


Figure 49 : Exemple de classe.

Remarque : Dans SMECI, l'utilisateur du système a la possibilité de créer interactivement les classes d'objets dont il a besoin pour la modélisation de son problème.

Chaque champ est lui-même une instance d'une classe, propre au système SMECI (*S.Slot*), qui est transparente pour l'utilisateur. Cela présente le principal avantage de pouvoir décrire les attributs des classes de façon très complète, par la description de *facettes* donnée ci-après (cf. figure 50) :

- *name*, qui contient le nom de l'attribut.
- *type*, qui peut prendre un grand nombre de valeurs comme : réel, entier symbole, objet, etc...)
- *allocation*, qui indique la nature du champ :
 - ◆ *instance* : la valeur du champ est portée par l'instance.
 - ◆ *constrained* : la valeur du champ est contrainte par le prototype.
 - ◆ *prototype* : la valeur du champ est identique pour toutes les instances. Cette valeur est fixée par le prototype.
- *domain*, qui existe et référence une classe si l'attribut *type* vaut "objet".
- *unit* (millimètre, Ampère, etc...)

- *inverse*, qui permet de modéliser la relation du fils vers le père dans le cas d'une décomposition hiérarchique.

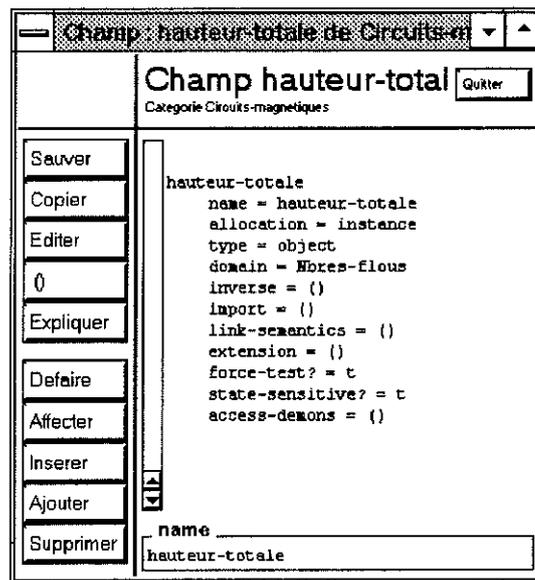


Figure 50 : Exemple de description d'un champ avec des facettes.

N'ayant pas utilisé les *démons*, nous ne les présenterons pas.

2. Structure générale

La structure objet que nous avons choisie, répond à tous les points méthodologiques que nous avons exposés dans le chapitre III.C.2.b. Elle est représentée sur la figure 51.

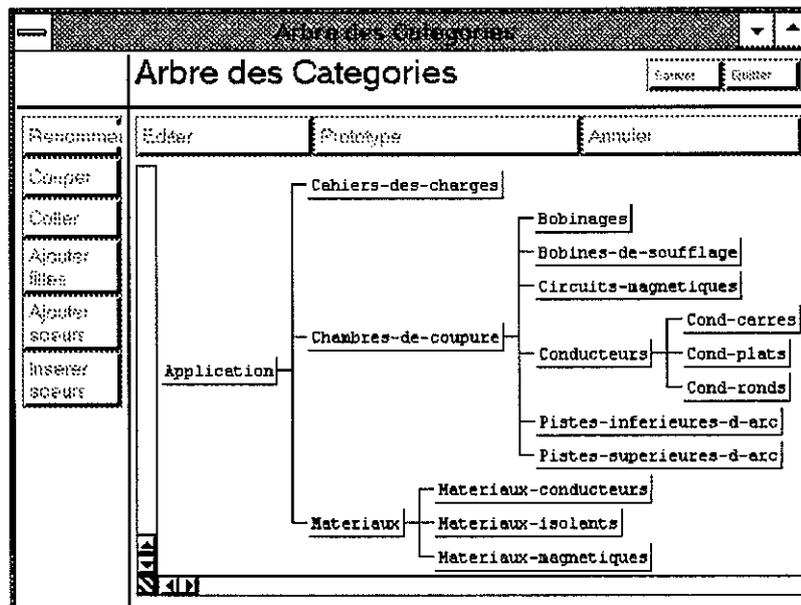


Figure 51 : Décomposition objets choisie.

a. Lien inverse

Nous avons trouvé intéressant la notion de facette *inverse* dans SMECI. C'est la raison pour laquelle, nous l'avons utilisée (cf. figure 52) pour représenter les liens entre la classe Cahiers-des-charges et la classe Chambre-de-coupure. En effet, dès que l'un des attributs concerné par ce lien acquiert une valeur, l'autre est immédiatement affecté.

L'intérêt principal, pour nous, est de pouvoir, par ce biais, contrôler et gérer, lors de la création d'un objet Cahier-des-charges, la structure Chambre-de-coupure correspondante.

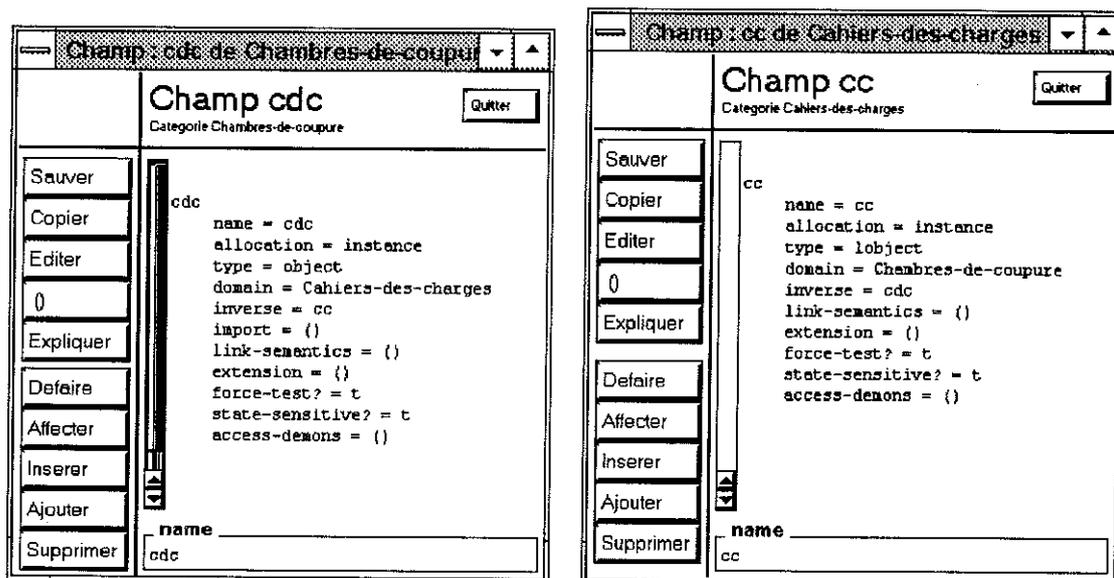


Figure 52 : Exemple de lien inverse.

b. Méthodes

Les *méthodes*, dans SMECI, sont des comportements communs à toutes les instances d'une classe. Ces comportements sont définis par des fonctions typées, c'est-à-dire qu'elles réagissent en fonction du type du paramètre d'entrée de la fonction.

Les *méthodes* sont héritées, tout comme les attributs, mais elles peuvent être redéfinies dans chaque classe.

Nous avons beaucoup utilisé ce concept car il nous a notamment permis de définir toutes les opérations floues comme des *méthodes*, l'intérêt majeur étant qu'elles sont dédiées à la classe, comme le montre l'exemple de la figure 53.

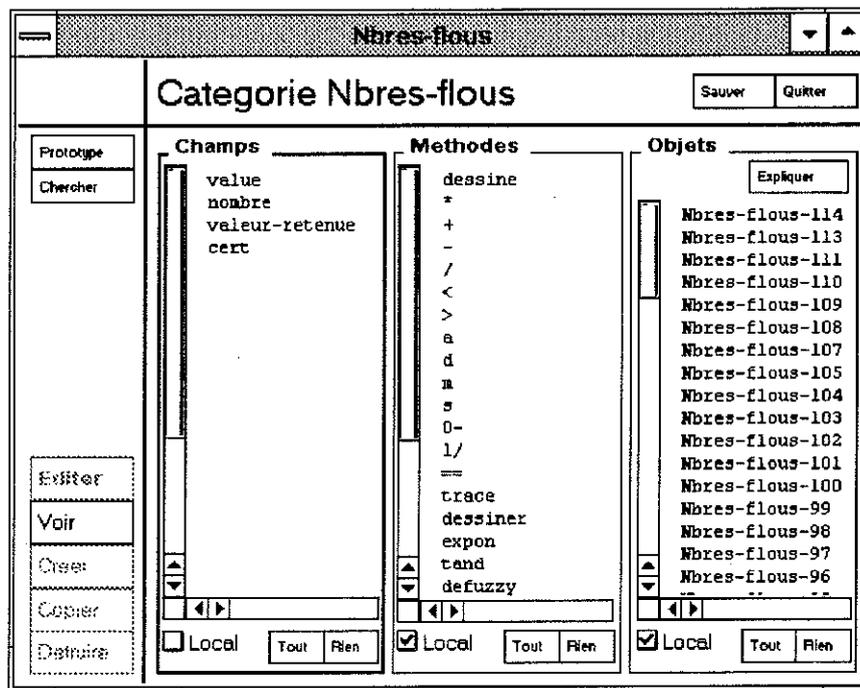


Figure 53 : Définition des opérations floues par des méthodes.

Généralement, en préconception, ce concept permet de dessiner tout ou partie de la structure géométrique de l'objet à concevoir. En effet, le simple appel d'une de ces *méthodes* sur n'importe lequel des composants de l'objet à concevoir entraîne le tracer géométrique du composant. Nous avons aussi défini des méthodes de dessin, **chacune propre à sa classe mais portant le même nom** (grande efficacité).

Une autre application de la notion de *méthode* concerne la fonction de déflouification. Tout comme les opérateurs de calcul, elle est très bien adaptée au concept de *méthode*. En effet, la déflouification est une procédure qui est propre à la classe des nombres flous et qui ne fait appel à aucune autre information que celle appartenant à la classe.

B. Connaissance déductive

Les règles SMECI sont écrites dans un macro langage fondé sur le langage LE-LISP. Cependant, pour une plus grande efficacité, ces règles sont compilées.

1. Présentation générale

La syntaxe utilisée pour les règles est très proche du langage naturel. On distingue :

Une partie condition où l'on trouve les mots-clés :

- *soit*, qui permet de déclarer des variables qui "s'instancieront" sur des objets utilisables.
- *si*, qui permet de déclarer des contraintes sur ces variables. On peut dans cette partie utiliser des quantificateurs existentiels tel que *il existe*.

Une partie Conclusion avec :

- *Alors*, qui permet d'exprimer en langage naturel les actions à réaliser comme l'affectation de valeurs ou encore la création d'objets.
- *Action*, qui permet d'utiliser des instructions LE-LISP dans la conclusion de la règle.

Voici deux exemples de règle :

<pre> ; ***** defregle isolement-cm-42 ; ***** auteur ff explication Demande a l'utilisateur si le circuit est isole fin-explication soit CM un Circuits-magnetiques alors question isolation^CM explication Le circuit magnetique est il isole des amenees de courant (oui ou non) Si le circuit magnetique est isole des amenees de courant, alors le bobinage sera globalement moins encombrant. fin-explication fin-regle </pre>	<pre> ; ***** defregle demande-cdc ; ***** auteur ff explication Demande les valeurs du cahier des charges a l'utilisateur fin-explication alors creer C un Cahiers-des-charges puis action \$(S-set-value 'tension-nominale C (ff-s-cree-nb-flou "LA TENSION NOMINALE")) \$(S-set-value 'tension-de-service C (ff-s-cree-nb-flou "LA TENSION DE SERVICE")) \$(S-set-value 'courant-de-court-circuit C (ff-s-cree-nb-flou "LE COURANT DE COURT-CIRCUIT")) \$(S-set-value 'courant-nominal C (ff-s-cree-nb-flou "LE COURANT NOMINAL")) \$(S-set-value 'tension-d-isolement C (ff-s-cree-nb-flou "LA TENSION D'ISOLEMENT")) \$(S-set-value 'tension-choc-de-foudre C (ff-s-cree-nb-flou "LA TENSION AU CHOC DE FOUDRE")) \$(S-set-value 'frequence C (ff-s-cree-nb-flou "LA FREQUENCE")) \$(S-set-value 'nbre-cycles C (ff-s-cree-nb-flou "LE NOMBRE DE CYCLES ON/OFF")) fin-regle </pre>
--	---

Dans notre application, la plupart des règles ont utilisé le formalisme des règles floues (même les règles dures). Cela nous a permis d'avoir un plus grand niveau de généralité : l'ajout d'une règle ne nécessite pas de connaître deux formalismes différents

(un pour les règles "classiques" et un pour les règles floues), mais bien un seul. Cela n'a pas posé de problème dans la mesure où l'univers des règles floues peut englober celui des règles "classiques" (c'est un cas particulier où le degré nuancé de véracité vaut alors 0 ou 1).

Remarque : Si l'on avait pu hiérarchiser, nous mêmes, les règles en classes, on aurait créé deux classes, l'une de "règles floues", l'autre de "règles classiques". La classe des "règles classiques" aurait été une sous-classe de la classe des "règles floues". On aurait alors utilisé la pleine puissance des prototypes de SMECI en contraignant le degré de véracité de la classe des "règles classiques" à un ensemble réduit ($\{0,1\}$) par rapport à l'intervalle des valeurs du degré de véracité de la classe des "règles floues" ($[0, 1]$).

2. Aspects spécifiques au flou

Les règles floues ont certaines particularités intéressantes comme le fait de s'appliquer si la partie condition a un degré de véracité supérieur à une valeur paramétrée.

Voici deux exemples de règles floues :

```
; *****
defreglefloue choix-du-materiau-ps-24
; *****
auteur ff
explication
  La piste superieure d'arc PS doit etre realisee dans un materiau bon
  conducteur et resistant a l'arc. Les cuivres ecrouis ou recuits
  conviennent generalement bien. On peut utiliser aussi des alliages
  speciaux plus resistants a l'arc (cuivre au tellure ou cupro-
  tungstene) qui sont aussi plus chers et plus resistifs. Une
  resistivite ... .. est bien dimensionnee.
fin-explication
soit
  PS une Pistes-superieures-d-arc
si
  le materiau de PS = ()
alors
  materiau^PS = $(ask-object "Choix du materiau conducteur : "
    (list (S-find-object 'cuivre-recuit)
          (S-find-object 'cuivre-ecroui)
          (S-find-object 'cuivre-tellure)
          (S-find-object 'cupro-tungstene)))
action
  $(print "fin choix materiau")
fin-reglefloue

; *****
defreglefloue valeurs-usuelles-encl-47
; *****
auteur ff
explication

fin-explication
soit
  CM un Circuits-magnetiques et PS une Pistes-superieures-d-arc
  et LPS la largeur de PS
si
  le cdc de CM = le cdc de PS
et
  la valeur-retenu de l'epaisseur-noyau^PS = ()
alors
action
  $(print "je commence regle 47")
  $(S-fuzzy-set-value CM 'epaisseur-noyau (print-to-string
```

```

      (#:flou:nbflou:creer (list (list (/ LPS 4) 0)
                                (list (/ LPS 2) 1)
                                (list (/ (* 3 LPS) 4) 0)))) 0.5)
$(print "j'ai fini regle 47")
fin-reglefloue

```

On trouve ci-dessus deux exemples de règles floues qui sont différents. La règle 24 est l'illustration de ce qui a été dit dans le chapitre III, à savoir que dans le cas de flou symbolique, c'est au niveau de la stratégie que doit se répercuter l'incertitude. Comme on peut le voir, la règle ne porte pas les degrés.

Par contre, dans le cas de la règle 47, le paramètre a une valeur numérique. L'incertitude (0.5) de la règle va se répercuter directement sur la valeur (qui elle-même est floue).

a. Evaluation de la prémisse d'une règle floue

Prenons maintenant un exemple pour montrer comment se déroule une règle floue avec une prémisse floue :

```

; *****
defreglefloue calcul-lps-8
; *****
auteur ff
soit
  PS une Pistes-superieures-d-arc et ICC le courant-de-court-circuit du cdc de PS
      et DMPS le diametre-moyen de PS
si
  plus-petit-que (ICC, $(/ 36000 (sqrt 2)))
alors
variables
  declare DELTA1 valant $ (send2 '/ (send 'carre (send 's
    (send2 '* (send 'log (send2 '* ICC (/ (sqrt 2) 1000))) 15.069) 2.238))
    (send 'm DMPS 2e+06))
  declare DELTA2 valant $(send2 '/ (send 'm ICC (* (sqrt 2) 1.4e-07))
    (send 'm DMPS (acos -1)))
action
  $(S-fuzzy-set-value PS 'largeur (print-to-string (#:flou:nbFlou:creer (list
    (list (* 0.8 (send 'min DELTA1 DELTA2)) 0)
    (list (send 'min DELTA1 DELTA2) 1)
    (list (* 1.2 (send 'max DELTA1 DELTA2)) 0)))) 1)
  $(ff-s-aggregation PS 'largeur)
fin-reglefloue

```

Dans la règle 8, nous avons dû créer un nouveau prédicat, *plus-petit-que*, qui permet d'établir une relation d'ordre entre deux quantités floues.

Ce prédicat renvoie comme valeur un degré nuancé qui se répercute sur la conclusion de la règle. Si, par exemple, l'évaluation de la prémisse (donc du prédicat) retourne une valeur x , l'affectation de la valeur floue n'aura pas comme degré de certitude 1 (qui est le degré donné par cette règle) mais il aura comme degré de certitude $\text{minimum}(1, x)$.

b. Agrégation

Le dernier point que nous voulons développer pour ce qui est de la connaissance déductive, concerne l'agrégation, c'est-à-dire la synthèse de plusieurs méthodes concourant au même paramètre.

Comme nous l'avons déjà dit, si les méthodes ne sont pas cohérentes entre elles (si l'intersection du noyau de leur quantité floue respective est vide), il faudra faire intervenir un arbitre (le concepteur), sinon, il faut réaliser l'agrégation.

Voici l'exemple de l'agrégation de trois règles sur un même paramètre (cf. figure 54) :

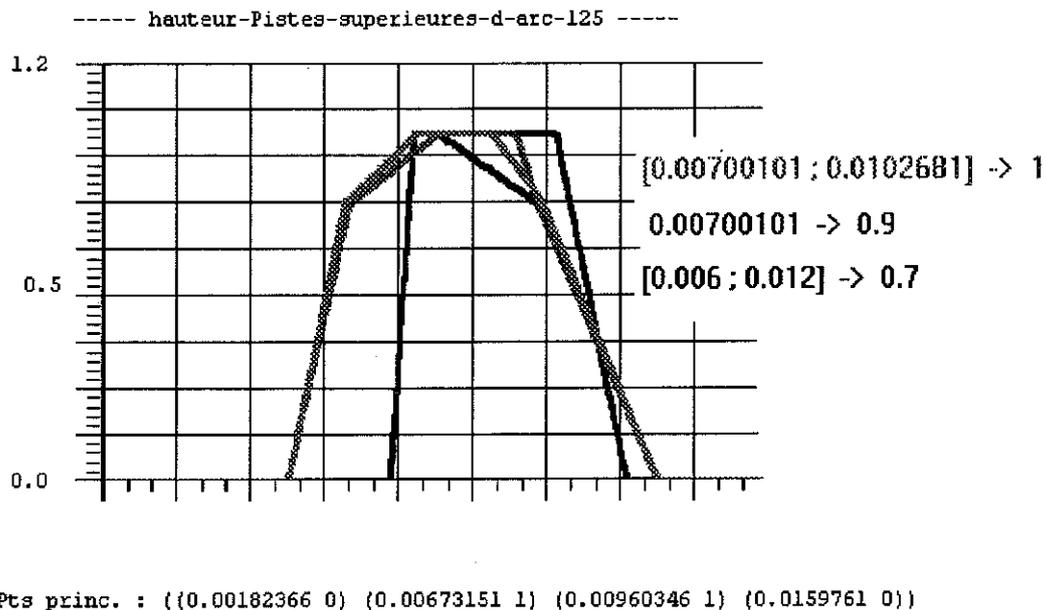


Figure 54 : Agrégation de plusieurs règles.

C. Stratégie

Le contrôle du raisonnement dans SMECI est principalement fondé sur la notion de tâches. Les tâches représentent des granules de connaissance. Elles permettent le regroupement de règles en paquets plus ou moins ordonnés selon la volonté du concepteur.

La connaissance stratégique est représentée sous la forme de deux objets : le contexte et la stratégie.

1. Présentation

Les tâches sont des objets qui précisent comment vont s'enchaîner les différents modules de connaissance (les bases de règles). Elles permettent donc une description de

la stratégie de résolution. Une tâche est une instance de la classe *S.Task* qui contient trois champs principaux :

- *rule-base*, un champ qui contiendra une base de règle de catégorie *S.RuleBase*.
- *subtask*, un champ sous-tâche, contenant les sous-tâches à exécuter pour satisfaire la tâche courante.
- *continuation-task*, un champ transition (empiler, dépiler, passage)

L'activation des tâches par le moteur d'inférence est gérée par un agenda qui contient l'ensemble des tâches en attente.

Il faudra choisir la stratégie dans le cas d'une résolution comportant des hypothèses multiples. On pourra donc préciser une stratégie en largeur, en longueur ou évoluée.

Il est difficile d'insérer une nouvelle tâche dans l'agenda car cela nécessite une connaissance complète de l'algorithme de raisonnement.

Il n'y a pas de séparation complète entre la connaissance stratégique et la connaissance déductive. En effet, on code dans chaque tâche la liste des sous-tâches qu'il faudra appliquer. Une grande partie de la stratégie de résolution se trouve donc directement imbriquée dans la connaissance déductive.

2. Méthodes stratégiques

Nous avons implanté la stratégie que nous avons présentée au chapitre III. C'est-à-dire que, comme le montre la figure 55, nous avons notamment deux tâches principales *contraintes-floues* et *contraintes-dures* qui contiennent l'ensemble des règles respectivement floues et dures.

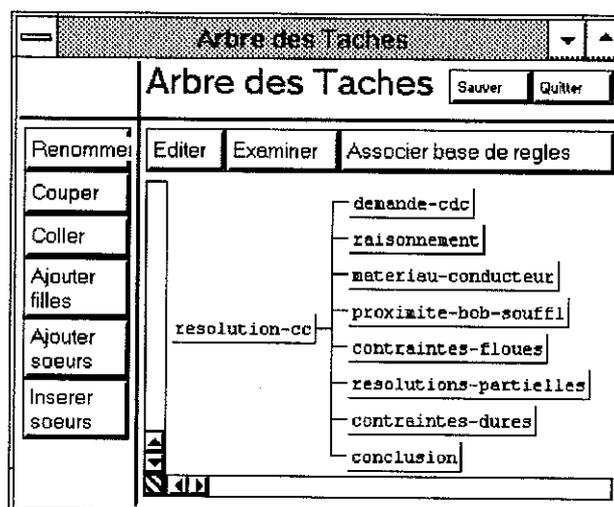


Figure 55 : Arbre des tâches.

Chaque tâche exécute de façon séquentielle les règles dans les tâches. Si la valeur d'un paramètre est imposée par l'utilisateur, les règles qui agissent sur ce paramètre sont annihilées.

D. Session et résultats

SMECI est initialement vierge et ne possède aucune connaissance sur l'application, ni sur la représentation du flou dans les données. Il est donc nécessaire, dans un premier temps, de charger dans SMECI les différents fichiers relatifs au fonctionnement de l'application.

Ce chargement se fait très facilement par l'interface : il suffit de charger le fichier *cc.kb*. Ce fichier regroupe toutes les connaissances nécessaires au bon fonctionnement du système. Voici l'environnement général de SMECI (cf. figure 56) :

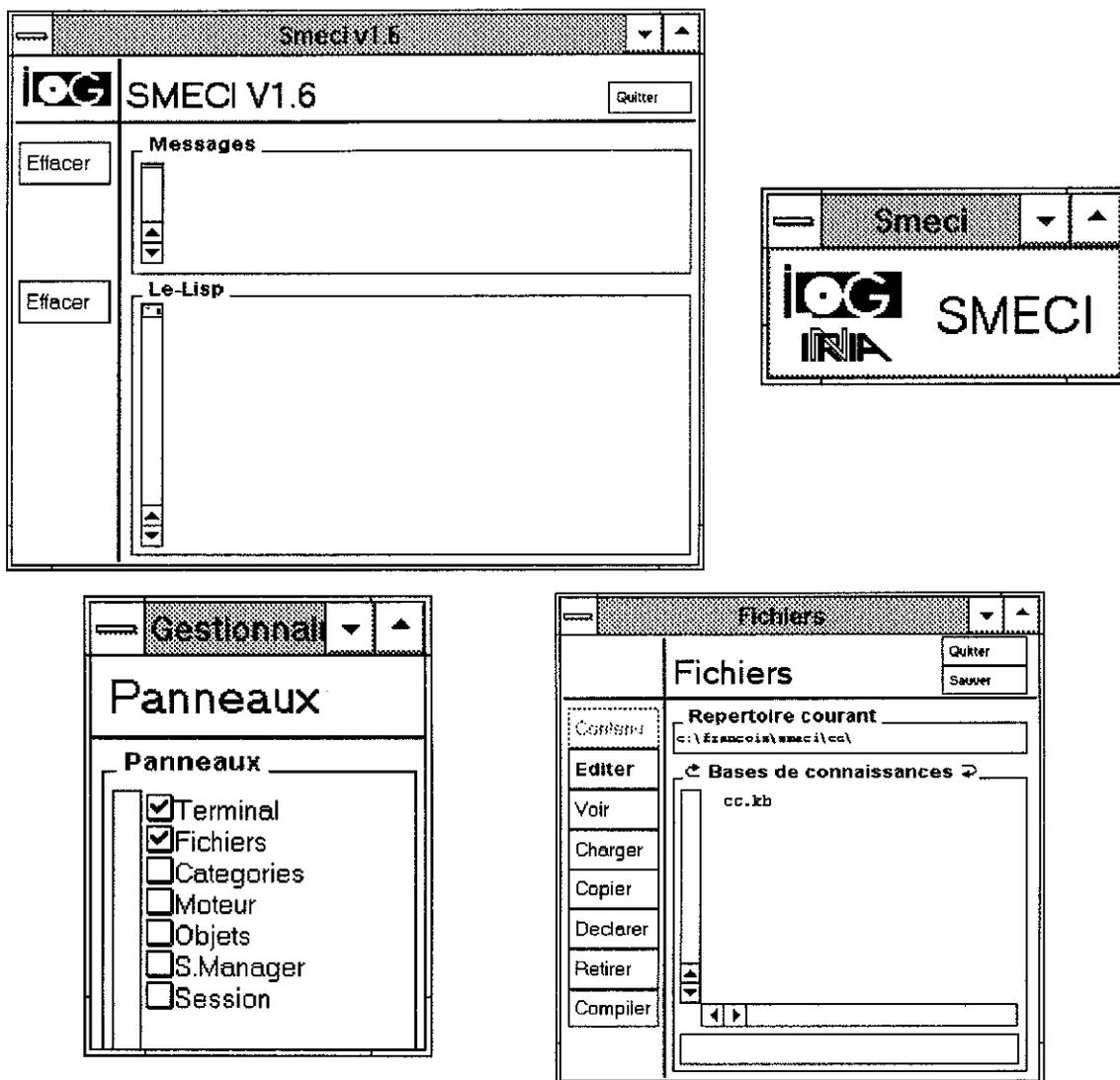


Figure 56 : SMECI.

Le démarrage de la session se fait en "cliquant" sur le bouton *démarrer* du panneau moteur (cf. figure 57) :

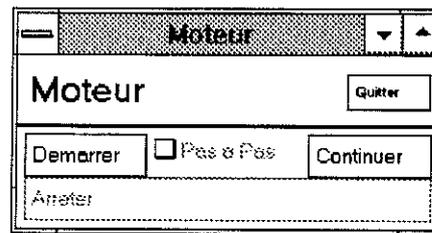


Figure 57 : Ecran moteur.

Le début de la résolution commence par la demande du cahier des charges.

1. Acquisition des données primitives : le cahier des charges

Cet écran interactif demande à l'utilisateur les spécifications du problème, c'est-à-dire :

- la tension nominale U_n
- la tension de service U_s
- le courant de court-circuit I_{cc}
- le courant nominal I_n
- la tension au choc de foudre U_f
- la fréquence f
- le nombre de cycles ouverture/fermeture

L'affectation de valeurs se fait en répondant aux questions successives. Quand tous les paramètres ont été présentés, qu'ils aient été affectés ou non, le système reprend la main et continue le déroulement du processus.

Comme nous venons de le dire, l'affectation d'une valeur à tous les champs n'est pas nécessaire.

2. Raisonnement

Tout au long du raisonnement, l'utilisateur est amené à répondre à un certain nombre de questions comme le montre, par exemple, la figure 58.

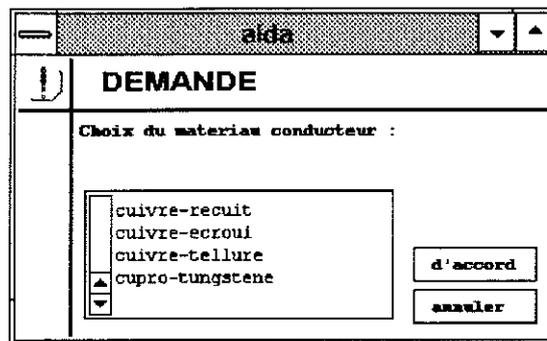


Figure 58 : Question en cours de raisonnement.

Il peut contrôler le déroulement du raisonnement, en éditant les informations écrites sur le *S.Manager* (cf. figure 59).

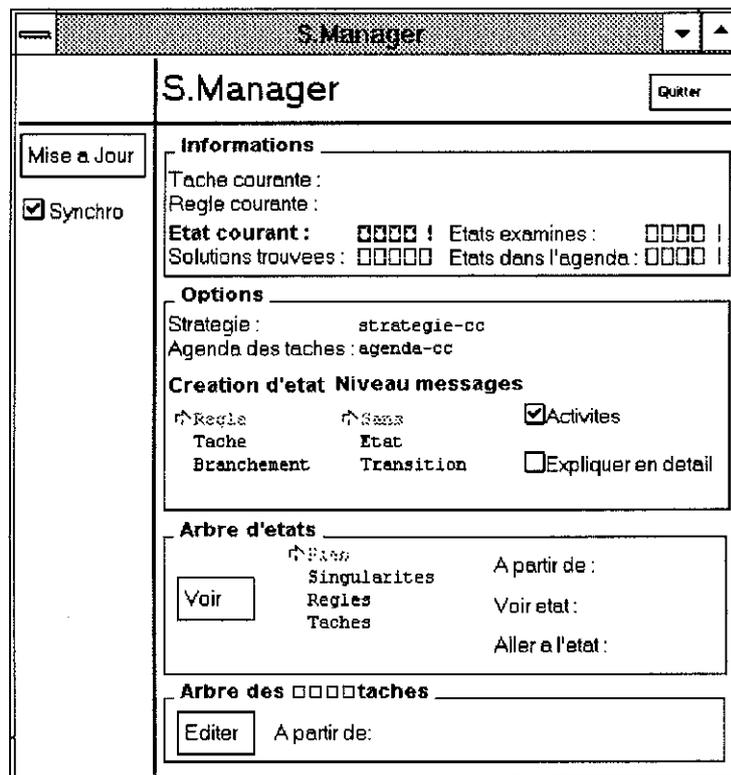


Figure 59 : *S.Manager*.

3. Résultats

Les résultats sont disponibles à la fin de la session. Il est possible de visualiser chaque élément de la chambre de coupure du disjoncteur en tant qu'objet (cf. figure 60), ou en tant que dessin (cf. figure 61).

On peut aussi visualiser, au niveau en dessous, tous les paramètres d'un composant de la chambre de coupure (cf. figure 62).

Voici, ce que nous avons obtenu pour la piste supérieure d'arc :

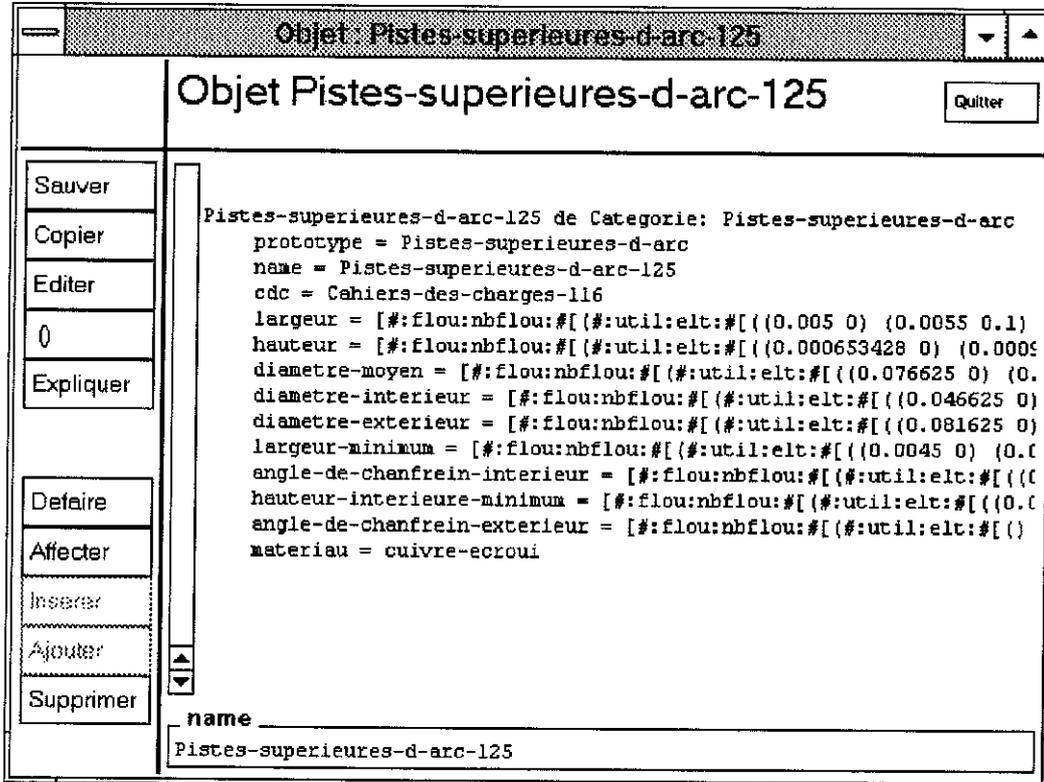


Figure 60 : Visualisation d'un composant.

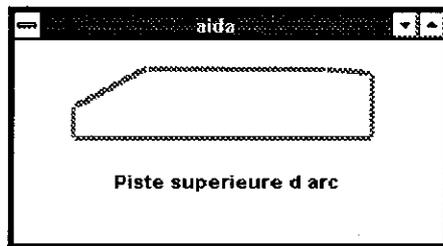


Figure 61 : Dessin d'un composant
(piste supérieure d'arc)

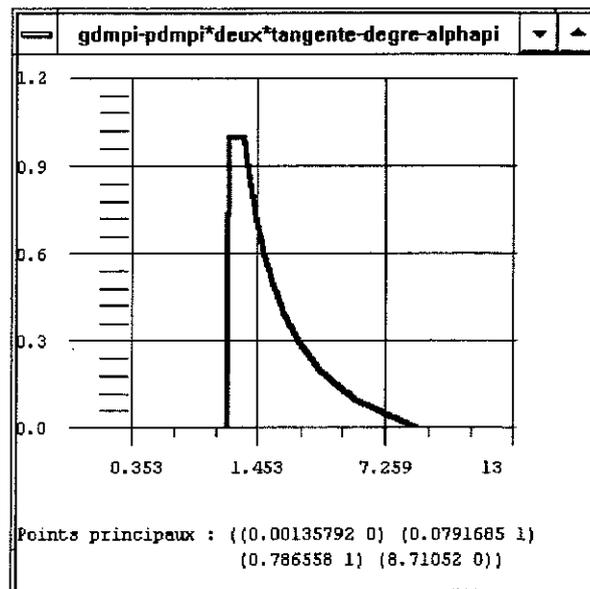


Figure 62 : Visualisation de la valeur d'un
paramètre d'un composant.

L'utilisation de notre système est actuellement très facile. Cependant, il reste un certain nombre de choses à réaliser pour rendre ce produit plus exploitable.

Les résultats obtenus sont très encourageants.

- Conclusion -

Le travail de recherche effectué dans le cadre de cette thèse a mis en évidence qu'il était possible de concevoir un produit en prenant en compte l'imperfection de l'information.

On peut retenir que, dans le domaine de la conception en génie électrique, l'imprécision et l'incertitude sont les deux causes principales d'imperfection de l'information. Or, la conception floue d'un objet nécessite de considérer un ensemble de fonctions qui font appel à des données floues, et de contraintes à satisfaire qui sont entachées d'incertitude. Par une modélisation correcte de ces deux notions, nous avons montré que l'on pouvait, cependant, aller au bout du processus de conception.

Nous avons mis en valeur les liens étroits qui unissent la représentation des données et leur utilisation, tant au niveau des calculs qu'au niveau de la décomposition en objets. Nous avons alors conçu un système expert utilisant la théorie des possibilités. Ce système expert fait essentiellement appel au calcul flou. Nous avons donc été conduits à réaliser une arithmétique floue que nous avons formalisée par une méthode α -coupée améliorée. Ce système a été validé lors de la conception de la chambre de coupure d'un disjoncteur.

Un important travail d'analyse et de modélisation a été effectué pour mettre au point cette arithmétique floue. Cependant, il reste un certain nombre de problèmes à approfondir.

Tout d'abord, nous avons évoqué celui des fonctions discontinues : nous pensons que grâce au formalisme choisi, ce problème peut être effectivement résolu.

D'autre part, il faut noter qu'il existe un problème lié à l'interactivité des variables. Cette interactivité rend le calcul flou imprécis lorsqu'il utilise plusieurs fois la même variable dans une seule équation. Ainsi, si A et B sont deux quantités floues, alors $A+A*B \neq A*(1+B)$. Cependant, et malgré cette limitation, nous pensons que là encore des solutions existent et peuvent minimiser ce problème, à moindre coût.

En ce qui concerne le système expert réalisé, il reste à améliorer un certain nombre de points. Notamment, nous pensons qu'en modélisant les règles sous la forme d'objets, on gagnerait en généralité et en évolutivité. D'autre part, un travail important reste à fournir notamment pour améliorer la convivialité du système et les possibilités d'intervention de l'utilisateur non initié.

En fait, il semble que cette démarche de conception, telle qu'elle est présentée, apporte une solution satisfaisante pour prendre en compte l'incomplétude des informations. Nous avons essayé de trouver des méthodes de réalisation qui la rende compatible avec des systèmes classiques (qui sont majoritaires), où, en fait, l'imprécision et l'incertitude ne sont qu'une partie mineure du processus. Cela permettra d'utiliser notre système comme une "boite-à-flou" dans laquelle on viendra raisonner quand la nécessité se fera sentir.

De plus, il est tout à fait envisageable d'utiliser cette "boite-à-flou" pour évaluer sommairement le domaine de valeur de certains paramètres.

- Bibliographie -

- [ABE 88] J. ABEL, C. ABEL, "Une méthodologie pour le développement des systèmes experts s'appuyant sur la notion de modèles sous-jacent". Huitièmes Journées Internationales des systèmes experts et leurs applications, Avignon, vol. 1, 1988, 261-281.
- [AHR 93] S. AHRENS, "Système expert d'aide au diagnostic et à la maintenance de grands entrainements électriques". Thèse de Doctorat, INPG, 1993.
- [AUR 91] J-P. AURRAND-LIONS, L. FOURNIER, P. JARRI, M. de SAINT BLANCARD, E. SANCHEZ, "Application of fuzzy control for issi vehicule braking" Proceedings of IFSA'91, Brussels.
- [BAL 92] J.F. BALLAY, F. NUWENDAM, J-C. KIENY, "A tool using en object oriented language for field computation in a CAD prospect." IEEE Transactions on Magnetics, vol.28, n°2, 1992, 1774-1776.
- [BEN 88] E. BENSANA, G. BEL, D. DUBOIS, "OPAL : a multi-knowledge-based system for industrial job-shop scheduling." Int. J. Prod. Res., vol.26, n°5, 1988, 795-819.
- [BIG 93] J. BIGEON, "Contrat SHOOD, rapport intermédiaire d'activités" Décembre 1993.
- [BOU 90] B. BOUCHON-MEUNIER, "Logique floue et modificateurs linguistiques (1)." Cybernetica, vol. XXXIII, n°4, 1990, 261-266.
- [BRA 89] S. BRASSARD, "Méthodologie et modélisation floues des connaissances dans l'activité de conception en électrotechnique". Thèse de Doctorat, INPG, 1989.
- [BRU 94] P. BRUNOX, "Etude de différentes représentations du contacteur électromagnétique dans un but de conception innovante". DEA LEG, INPG, 1994.
- [BUC 90] J.J. BUCKLEY, Y. QU, "On using α -cuts to evaluate fuzzy equations". Fuzzy Sets and Systems, 1990, vol. 38, 309-312.
- [CHA 93] S. CHANAS, M. DELGADO, J-L. VERDEGAY, M.A. VILA, "Ranking fuzzy interval numbers in the setting of random sets." Information Sciences, vol.69, 1993, 201-217.
- [CRI 92] La Lettre du Club CRIN, Logique Floue, n° spécial : Principales applications des ensembles flous, Mai 1992.
- [DOR 89] J-L. DORMOY, "Méthodologies pour des systèmes experts de seconde génération." Journées francophones de l'Informatique, Nancy 1989, 219-236.
- [DUB] D. DUBOIS , H. PRADE, "Handling uncertainty in expert systems : pitfalls, difficulties, remedies." The reliability of expert systems. Ed. E. Hollnagel, 64-118.

- [DUB] D. DUBOIS, H. PRADE, "Fuzzy numbers : an overview." Analysis of fuzzy Information, vol.I Mathematics and Logic, ed. J-C. Bezdek, CRC Pres Inc., 3-39.
- [DUB 78] D. DUBOIS, H. PRADE, "Operations on fuzzy numbers." Int. J. Systems Sci., vol.9, n°6, 1978, 613-626.
- [DUB 79] D. DUBOIS, H. PRADE, "Fuzzy real algebra : some results." Fuzzy Sets and Systems, 2, 1979, 327-348.
- [DUB 81] D. DUBOIS, H. PRADE, "Additions of interactive fuzzy numbers." IEEE Transactions on Automatic Control, vol.26, n°4, 1981, 926-936.
- [DUB 83a] D. DUBOIS, H. PRADE, "Ranking fuzzy numbers in the setting of possibility theory." Information Sciences, 30, 1983, 183-224.
- [DUB 83b] D. DUBOIS, H. PRADE, "Unfair coins and necessity measures : towards a possibilistic interpretation of histograms." Fuzzy Sets and Systems, vol. 10, 1983, 15-20.
- [DUB 87] D. DUBOIS, "An application of fuzzy arithmetic to the optimization of industrial machining processes." Mathl. Modelling, vol.9, n°6, 1987, 461-475.
- [DUB 88] D. DUBOIS, H. PRADE, "Théorie des possibilités - applications à la représentation des connaissances en informatique". Coll. Méthode+Programmes, Masson, 1988, ISBN 2-225-81273-X, 292 pages.
- [DUB 89a] D. DUBOIS, H. PRADE, "Order of magnitude reasoning with fuzzy relations." Revue d'Intelligence Artificielle, vol.3, n°4, 1989, 69-94.
- [DUB 89b] D. DUBOIS, J-L. KONING, G. BEL, "Règles de décision antagonistes dans les systèmes à base de connaissances." 7ème Congrès de Reconnaissance des Formes et I.A., t.3, 1989, 1647-1659.
- [DUB 90] D. DUBOIS, H. PRADE, M. XIU, "Aspects sémantiques et algorithmiques du raisonnement approché dans le cadre de la théorie des possibilités." Rapport IRIT 90-53-R, 1990.
- [DUB 91a] D. DUBOIS, H. PRADE, "Les logiques du flou et du très possible." La Recherche, vol.22, n°237, Nov. 1991, 1309-1315.
- [DUB 91b] D. DUBOIS, J-L. KONING, "DEBORA : a decision engine based on rational aggregation." The 2nd Annual Conference on AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems, 1991, 68-77. .
- [DUB 92a] D. DUBOIS, H. PRADE, "The semantics of fuzzy 'IF...THEN...' rules. Fuzzy approach to reasoning and decision making". Novak, Ramik, Mares, Cerny, Nekola Eds, 1992, 3-16.
- [DUB 92b] D. DUBOIS, H. FARGIER, H. PRADE, "Propagation et satisfaction de contraintes flexibles." Rapport IRIT 92-59-R, 1992.

- [DUB 93] D. DUBOIS, H. FARGIER, H. PRADE, "Satisfaction de contraintes flexibles avec application aux problèmes d'ordonnancement." Rapport IRIT 93-30-R, 1993.
- [FRA 94] F. FRANCOIS, E. ESCANDE, J. BIGEON, "A methodology for knowledge representation in expert system, in the field of electrical engineering". IEEE Transactions on Magnetics, Vol 30, n° 5, 1994, 3656-3659.
- [GEN 91] A. GENTILHOMME, "COCASE, un système expert d'aide à la conception d'appareillages électriques". Thèse de DI, INPG, 1991.
- [GEN 92] A. GENTILHOMME, J. BIGEON, J-L. COULOMB, "An expert system for preliminary design of contactors". IEEE Transactions on Magnetics, Vol 28, n° 2, 1992, 1723-1766.
- [GER 92] L. GERBAUD, "Aide à la conception des ensembles machines convertisseur-commande : Apport d'une démarche système expert". Thèse de DI, INPG, 1992.
- [GSI 93] "Modélisation objet pour la C.F.A.O.". Rapport interne du projet GSIP, 1993, 73 pages.
- [HAR 92] B. HARMAN, "Sum and produit of the modified real fuzzy numbers." Supplement to Kybernetika, vol.28, 1992, 37-40.
- [HAT 91] J.P. HATON, N. BOUZID, F. CHARPILLET, M.C. HATON, B. LÂASRI, H. LÂASRI, P. MARQUIS, T. MONDOT, A. NAPOLI, "Le raisonnement en intelligence artificielle". Coll. I.I.A, InterEditions, 1991, ISBN 2-7296-0335-2, 450 pages.
- [KAU 87] A. KAUFMANN, "Nouvelles logiques pour l'intelligence artificielle". Hermès, 1987, ISBN 2-86601-093-0, 298 pages.
- [KAU 88] A. KAUFMANN, "Le paramétrage des moteurs d'inférence". Hermès, 1988, ISBN 2-86601-121-X, 196 pages.
- [LEB] J. LEBAILLY, R. MARTIN-CLOUAIRE, H. PRADE, "Use of fuzzy logic in a rule-based system in petroleum geology" Approximate reasoning in intelligent systems. Decision and Control, Ed. E. SANCHEZ, L.A. ZADEH, Pergamon Press, 125-144.
- [LEE 90] C. C. LEE, "Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic controller. Part I et Part II." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.20, n°2, 1990, 404-435.
- [MAI 85] J. MAIERS, Y.S. SHERIF, "Applications of fuzzy set theory." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.15, n°1, 1985, 175-189. (450 réf)

- [MAM 74] E.H. MAMDANI "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant." Proceedings of IEE Control & Science, vol.121, N°12, 1974, 1585-1588.
- [MAR] M. MARES, "Algebra of fuzzy quantities." Int. J. General Systems, vol.20, 59-65.
- [MAU 76] E. MAURY, "Appareillage électrique d'interruption à haute tension". Techniques de l'Ingénieur, D 655, D 656, D 657, 48 pages.
- [MEY 90] B. MEYER, "Conception et programmation par objets". Coll. I.I.A, InterEditions, 1990.
- [NGU 91] G.T. NGUYEN, D. RIEU, 'Database issues in object-oriented design'. Tools'91, 1991, 14 pages.
- [OTT 91] K.N. OTTO, E.K. ANTONSSON, "Trade-off strategies in the solution of imprecise engineering design problems". Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems, IFES'91, 1991, 422-433.
- [OTT 93] K.N. OTTO, A.D. LEWIS, E.K. ANTONSSON, "Approximating α -cuts with the vertex method". Fuzzy Sets and Systems, 1993, vol. 55, 43-50.
- [PAN 90] I.D. PANDELIDIS, J-F. KAO, "Detector : a knowledge-based system for injection molding diagnostics." Journal of Intelligent Manufacturing, vol.1, 1990, 49-58.
- [PAP 77] C.P. PAPPIS, E.H. MAMDANI, "A fuzzy logic controller for a traffic junction." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.7, n°10, 1977, 707-716.
- [PET 93] P. PETIN, "Outil d'aide à l'expertise de maintenance des grands équipements électriques". Rapport de DEA, 1993.
- [SAB 93] J.C. SABONNADIÈRE, "La CAO en génie électrique - Méthodes et Techniques". Techniques de l'Ingénieur, D 3585, 20 pages.
- [SAN 92] E. SANCHEZ, "Algorithmes génétiques, réseaux-neuronaux et logique floue". Science Technique Technologie, n°22, 1992, 22-25.
- [SCH 92] D.G. SCHWARTZ, G.J. KLIR, "Fuzzy logic flowers in Japan." IEEE Spectrum, 1992, 32-35.
- [SEL 90] K. SELF, "Designing with fuzzy logic". IEEE Spectrum, 1990, 42-44 et 105.
- [TAK 85] T. TAKAGI, M. SUGENO, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.15, n°1, 1985, 116-132.

- [TAN 87] K.L. TANG, R.J. MULHOLLAND, "Comparing fuzzy logic with classical controller designs." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.17, n°6, 1987, 1085-1087.
- [TRI 91] F. TRICHON, "Modélisation du processus de conception des machines électriques, le système expert DAMoCLES". Thèse de DI, INPG, 1991.
- [TRI 90] F. TRICHON, J. BIGEON, M. EMALDI, J. IZAGIRRE, "DAMoCLES : un système expert de conception en électrotechnique appliqué au moteur asynchrone". Dixièmes Journées Internationales des systèmes experts et leurs applications, Avignon, 1990, 315-327.
- [TSA 91] J.P. TSANG, "Dossier conception et I.A". Bulletin de l'AFIA, n°7, 1991, 23-35.
- [TUR 84] I.B. TURKSEN, D.D.W. YAO, "Representation of connectives in fuzzy reasoning : the view through normal forms." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.14, n°1, 1984, 146-151.
- [VER 93] J-L. VERN, "La logique floue : concepts et définitions." Electronique Radio Plans, 1993, n°541, 11-18.
- [WOO 90] K.L. WOOD, E.K. ANTONSSON, J.L. BECK, "Representing imprecision in engineering design : comparing fuzzy and probability calculus". Research in Engineering Design, 1990, vol. 1, 187-203.
- [WOO 91] K.L. WOOD, K.N. OTTO, E.K. ANTONSSON, "Engineering design calculations under uncertainty". Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems, IFES'91, 1991, 434-445.
- [WOO 92] K.L. WOOD, K.N. OTTO, E.K. ANTONSSON, "Engineering design calculations with fuzzy parameters". Fuzzy Sets and Systems, 1992, vol. 52, 1-20.
- [ZAD 73] L.A. ZADEH, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.3, n°1, 1973, 28-44.
- [ZAD 85] L.A. ZADEH, "Syllogistic reasoning in fuzzy logic and its applications to usuality and reasoning with dispositions." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.15, n°6, 1985, 754-763.
- [ZHA 91a] R. ZHAO, R. GOVIND, "Algebraic characteristics of extended fuzzy numbers." Information Sciences, 54, 1991, 103-130.
- [ZHA 91b] R. ZHAO, R. GOVIND, "Defuzzification of fuzzy intervals." Fuzzy Sets and Systems, 1991, vol. 43, 45-55.
- [ZHU 91] Z. ZHU, D.A. LOWTHER, "An intelligent CAD system for DC machines" Onzièmes Journées Internationales des systèmes experts et leurs applications, Avignon, 1991, 113-128.



- Annexes -

Annexe 1 : La chambre de coupure d'un disjoncteur

Présentation générale [MAU 76] [BRA 89]

Un disjoncteur est un appareil électrique, de la gamme de l'appareillage électrique d'interruption, qui est destiné à interrompre et établir des circuits dans toutes les conditions : charge normale (comme les interrupteurs), surcharge et court-circuit.

La coupure de courant d'un circuit survient, très souvent, lorsque des courants sont devenus trop importants pour l'installation aval. Dans le cas normal, le disjoncteur laisse passer le courant qui le traverse, en minimisant les pertes.

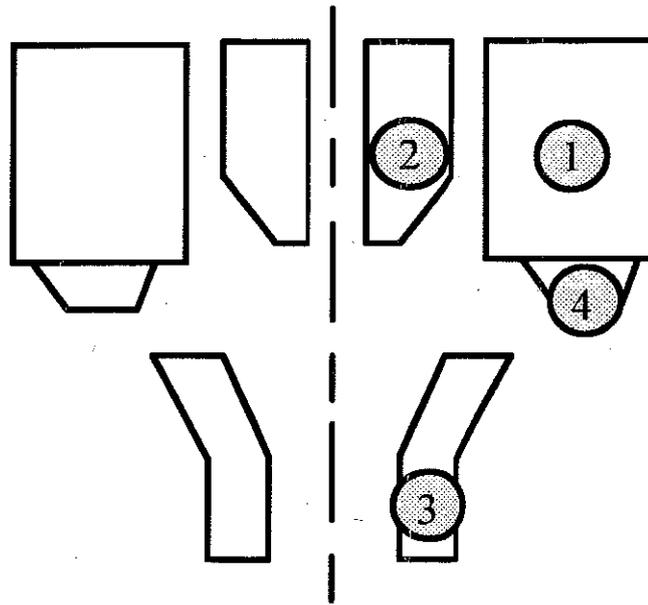
Le disjoncteur est composé de quatre organes essentiels :

- le circuit principal dont le rôle est d'assurer la conduite du courant en régime normal,
- le circuit secondaire qui supporte l'arc et permet d'éteindre ce dernier,
- la commande qui permet d'ouvrir le circuit, de transférer l'arc depuis le circuit principal où il est créé, jusqu'au circuit secondaire,
- l'isolation, qu'elle soit statique (avec l'environnement extérieur) ou dynamique (pour les circuits principal et secondaire avant, pendant et après la coupure de l'arc).

La chambre de coupure d'un disjoncteur regroupe les circuits principal et secondaire.

Un des problèmes délicats de la fabrication d'un disjoncteur réside dans la conception de sa chambre de coupure. En effet, pour interrompre le passage d'un courant électrique dans un circuit, la seule façon connue depuis toujours consiste à séparer et à écarter deux éléments de ce circuit, intercalant ainsi un intervalle d'air ou de fluide isolant. Cependant, après la séparation, le courant continue de passer à travers un arc qui jaillit entre les deux points de séparation. Cet arc s'éteint plus ou moins rapidement : alors seulement le courant est interrompu dans le circuit.

Il faut donc rendre cet arc électrique instable le plus rapidement possible. Or cela dépend de plusieurs paramètres et notamment de la conception de la chambre de coupure.



- ① Bobinage
- ② Circuit Magnétique
- ③ Piste inférieure d'arc
- ④ Piste supérieure d'arc



A U T O R I S A T I O N D E S O U T E N A N C E

Vu les dispositions de l'arrêté du 30 Mars 1992 relatifs aux Etudes Doctorales

Vu les Rapports de présentation de :

Monsieur Bernard DUBUISSON

Monsieur Norbert GIAMBIASI

Mademoiselle Florence FRANCOIS

est autorisée à présenter une thèse en soutenance en vue de l'obtention du diplôme de
**Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, spécialité "GENIE
ELECTRIQUE".**

Fait à Grenoble, le

Pour
le Directeur
INPG
Doctorale

Le but de ce travail est de montrer la faisabilité d'un système de conception, en génie électrique, prenant en compte l'imperfection de l'information : l'imprécision des données et l'incertitude des règles d'expertise.

Ce système réalisé est un système expert utilisant la représentation objets. La majorité des règles de conception fait appel à des calculs. Dans cette optique, une arithmétique floue a été développée à partir de la représentation α -coupée. L'application qui a permis de tester le modèle est la conception de la chambre de coupure d'un disjoncteur.

Mots Clés : Génie électrique, Conception, Système expert, Modélisation floue, alpha-coups.

The aim of this work is to show the feasibility of a design system, in the field of electrical engineering, based on knowledge imperfection : lack of data precision and uncertainty of design rules.

This developed system is an expert system using objects representation. Most of design rules require calculations. So, a fuzzy arithmetic has been done from α -cut method. The design of the breaking chamber of a circuit breaker has been the application which allows to test the model.

Keywords : Electrical engineering, Design, Expert system, Fuzzy modeling, alpha-cuts.

