

## PLAN DU RAPPORT

### I) INTRODUCTION

### II) DESCRIPTION SOMMAIRE DU SYSTEME PROTOTYPE .

- description general du module de pilotage
- exemple de regles de pilotage
- critique de strategie
- modification de la base de regles
- limites de l'apprentissage.

### III) DESCRIPTION SOMMAIRE DU BASSIN VERSANT CHOISI POUR UNE NOUVELLE APPLICATION DU SYSTEME D'APPRENTISSAGE (BORBECKERMÜHLENBACH) .

### IV) PLAN DE TRAVAIL

### V) CONCLUSIONS

ANNEXE 1: TRADUCTION ADAPTEE DU TEXTE DE A. NEUMANN ( SUR LE PROTOTYPE REALISE POUR LE PILOTAGE D'UNE PARTIE DU RESEAU DE BREMEN ).

ANNEXE 2: PRESENTATION GRAPHIQUE DU RESEAU DE BORBECKENMÜLHENBACH.

ANNEXE 3: EXEMPLES DE REGLES APPLICABLES A LA GESTION DU RESEAU DE BORBECKENMÜLHENBACH.

ANNEXE 4: COMPTE-RENDU DES DISCUSSIONS LORS DE LA VISITE DE G. JACQUET A HANNOVER LE 17.08.87 .

ANNEXE 5: TEXTE GENERAL D'INTRODUCTION AU SYSTEME-EXPERT.

## I) INTRODUCTION : situation du projet

Depuis plusieurs années, une coopération scientifique s'est développée entre le CERGRENE de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (Paris) et l'Institut Für Wasserwirtschaft (de l'université de Hannover), portant sur divers problèmes en hydrologie urbaine.

Parmi ceux-ci, on cite :

- la création d'un langage commun pour la Gestion en Temps Reel des réseaux : un rapport sur l'état de l'art de cette technique est en cours d'édition . Il a été rédigé par un groupe de travail issu de deux organisations internationales (AIRH, IAWPRC ) et formé de 6 membres dont W. Schilling de l'université de Hannover et G. Jacquet du CERGRENE ( ENPC ).

- la mise en place de nouveaux réseaux de mesures, plus efficaces et adaptés à la gestion en temps réel ( notamment l'utilisation du radar météorologique pour laquelle un ingénieur diplômé de l'université de Hannover termine actuellement une thèse au CERGRENE ).

- Enfin le dernier projet, financé actuellement par PROCOPE concerne l'étude d'une méthode de recherche de stratégie, basée sur l'intelligence artificielle, permettant lors d'un événement pluvieux d'utiliser au mieux la capacité du réseau compte tenu des contraintes et des objectifs fixes. Les *objectifs* d'un pilotage du réseau en temps réel sont multiples:

- éviter une mise en charge d'un tronçon, pouvant conduire à des débordements et même à des inondations dans les cas les plus critiques

- éviter les décharges polluantes en milieu extérieur

Les *contraintes* sont :

- les possibilités du système de contrôle ( puissance des pompes, capacité des bassins de rétention ...)

D'autres facteurs interviennent, parfois comme contraintes parfois comme objectifs (suivant la formulation du problème et l'errément choisi) :

- assurer une sécurité maximale notamment minimiser les risques de catastrophes en cas de panne d'un organe de régulation

- trouver la stratégie la moins chère ( minimiser les coûts financiers de lancement et utilisation des pompes,...)

...

Le CERGRENE et l'IFW ont développé, différents outils de recherche de stratégie de contrôle en temps réel, fondés sur des méthodologies différentes et complémentaires (optimisation linéaire pour l'IFW , optimisation non linéaire avec pénalisation des contraintes pour le CERGRENE).

Tant le CERGRENE que l'IFW s'intéressent aux méthodes basées sur l'intelligence artificielle et le programme PROCOPE en 1987 a financé essentiellement la participation d'un jeune chercheur du CERGRENE , M. A. Khelil en séjour post-doctoral à

Hannover pour etudier l'utilisation de ces methodes.  
L'universite de Hannover (IFW) travaille en effet, sur plusieurs cas d'application de ce type de systeme.

Un prototype de systeme d'apprentissage a ete construit par un chercheur de l'IFW ( A. Neumann) pour la ville de Bremen sur le reseau situe en rive gauche de la Weser.

Le programme de recherche realise par A. Khelil comprend :

- la transposition sans modifications de l'architecture du systeme.

Ce travail permet d'evaluer la transportabilite du systeme ( Quelles sont les difficultes rencontrees ? Comment eventuellement modifier le systeme pour les aplanir?...)

Il permet aussi, de tester le fonctionnement du systeme d'apprentissage sur un autre reseau ( dont les caracteristiques de fonctionnement sont differentes ).

- Dans un deuxieme temps, des transformations seront apportees au systeme a partir d'une reflexion sur les resultats obtenus en premiere partie, de maniere a l'adapter au nouveau cas d'etude.

- Enfin, dans un troisieme temps, les limites du systeme seront investiguees pour permettre de degager le domaine d'utilisation ( etude prealable ou mise en service operationnelle en gestion en temps reel ) .

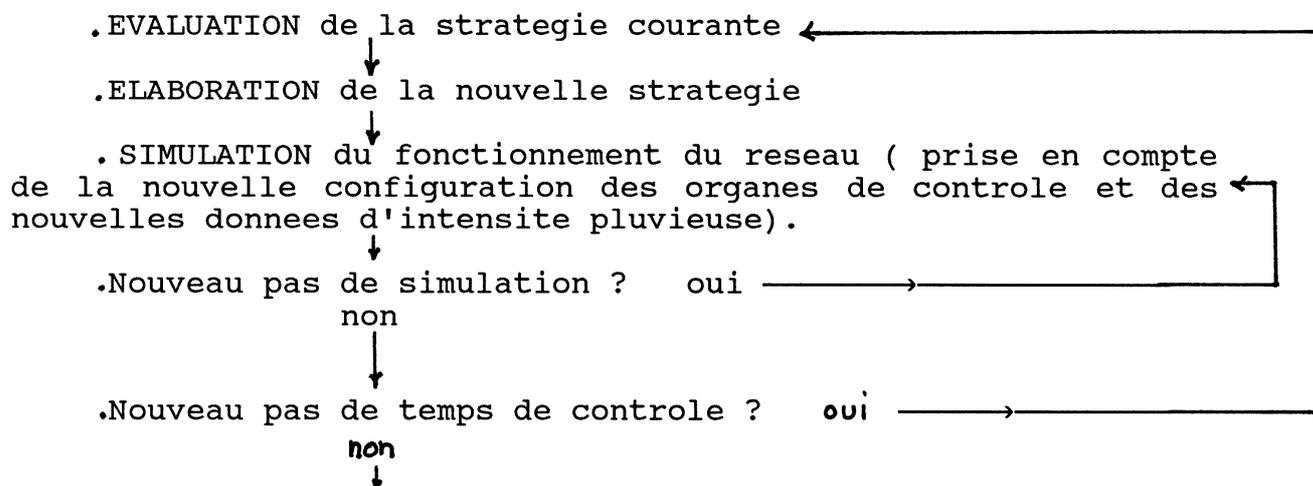
Le present rapport, rend compte du travail effectue, entre fevrier 87 et juillet 87, sur ce dernier sujet.

## II) DESCRIPTION SOMMAIRE DU SYSTEME PROTOTYPE

Pour bien comprendre comment fonctionne le systeme d'apprentissage, il faut au prealable, avoir une idee precise, de la maniere dont le module de pilotage est lui-meme organise.

*En effet, l'apprentissage n'est rien autre qu'une modification du module de pilotage, en fonction de l'experience acquise.*

Schema general d'organisation des traitements d'un systeme automatique de gestion en temps reel :



- La recherche menee a Hannover, correspond a un schema de pilotage entierement automatique du reseau, ( pour plus de details sur les diverses specifications de pilotage -pilotage entierement automatique, pilotage assiste - ,voir le document commun en cours d'edition, sur la gestion en temps reel).

- le module-expert d'evaluation et elaboration de strategie, remplace le module d'optimisation (lineaire ou non lineaire) auparavant mis en oeuvre. Ce dernier constitue en outre, un outil de reference pour evaluer les performances des modules-experts.

- Il est enfin important de noter que dans le contexte d'un pilotage automatique, la prise en compte d'eventuelles defaillances des organes de regulation ou mesure constitue un critere decisif de l'operationalite du systeme.

### II.I) LES REGLES DE PILOTAGE .

Selon le principe du systeme expert, tant l'evaluation que l'elaboration de strategie de pilotage est issue de l'application de regles ( autrement appeles des productions ) dont la validite des premisses entraine la validite des conclusions.

Exemple :

Pi : A B C ---> X Y Z T

Si les conditions A et B et C sont verifiees, ALORS les conclusions ( autrement appelees actions ) , sont elles-aussi verifiees.

D'un point de vue theorique, deux criteres doivent etre verifiees pour qu'un ensemble de regles fonctionne correctement.

- *la completude* : Le systeme est capable de produire une solution (une strategie complete), quel que soit l'etat du reseau et des organes de commande.

- *la coherence* : Il est impossible que deux regles entrainant des conclusions (actions) contradictoires puissent etre simultanement activables.

Le respect de ces deux criteres necessite une etude soignee:

- *du fonctionnemet du reseau*

- *de l'architecture du systeme*, notamment le type de liens existant entre *la base de regles* et *le moteur d'inference*.

Pour les langages appliques a l'intelligence artificielle (PROLOG, LISP, ...), le moteur d'inference est transparent au programmeur . Un programme n'est donc que l'ecriture d'un ensemble de regles.

Dans notre cas, le langage informatique utilise est LE FORTRAN 77, ce qui signifie que le moteur d'inference doit explicitement etre ecrit.

Tel qu'il a ete concu, le moteur d'inference opere, entre autres , selon les hypotheses suivantes :

- Les regles sont groupees en blocs, dont le traitement se fait l' un a la suite de l' autre. Chaque bloc de regles correspond a la resolution d'un sous-probleme .

- A l'interieur d'un bloc, seule une regle est applicable. Le choix s'effectue, en fonction du pourcentage de conditions verifiees de chacune des regles ( respect du principe de completude).

En cas de conflits, des criteres supplementaires interviennent, supposes rendre compte de la pertinence des regles.

## II.II) EXEMPLE DE REGLES DE PILOTAGE DANS LE CAS DE BREMEN

Les variables retenues pour la determination de strategie sont :

- Les intensites de pluie mesurees au pluviometre  $i$ ,  $RINT_i$   
 $i=1,3$

- Les niveaux limnimetriques mesures au limnimetres  $i$ ,  $H_i$   $i = 1,2,6$

- Les niveaux d'utilisation de la pompe  $i$ ,  $P_i$   $i=1,7$

On note au maximum, 4 niveaux de pompage, sur une pompe  $i$ ,

notes 0,1,2,3,4 .

0 correspond a l'arret de la pompe

le niveau maximum (  $\leq 4$  ), correspond a la capacite maximale de refoulement de la pompe i.

Regles issues du premier bloc :

```
( H9 <R 8) -> ( H9 = LOW)
( H9<=R 8)( H9 <R 12) -> ( H9 = MID)
( H9>=R 12)( H9 <R 19) -> ( H9 = HIGH)
( H9 >R 19) -> ( H9 = OFL)
```

Ce bloc permet de faire la transposition entre les *valeurs numeriques* mesurees de niveau d'eau et des *valeurs-predicats* (niveaux BAS,MOYEN,HAUT,DEBORDEMENT) qui sont utilisees dans l'ecriture des regles de pilotage proprement dites.

Regles issues du bloc numero 30 :

```
( H10 >=HIGH1) -> ( P1 = 3)
( H10 >= HIGH) -> ( P1 = 2)
( H10 <= MID) -> ( P1 = 1)
```

Ce bloc contient les regles permettant de regler la pompe numero 1. On remarque que, dans ce cas, la regulation de la pompe 1 ne depend que du niveau ( MOYEN, HAUT, TRES HAUT) au limnimetre numero 10.

## II.III) L'EVALUATION DE STRATEGIE ( DES REGLES DE PILOTAGE )

L'apprentissage est fonde sur une analyse critique des resultats obtenus par la base de regles existantes laquelle comporte deux volets :

- evaluation des resultats ( satisfaisants / insatisfaisants)
- capacite d'attribuer telle performance a telle ou telle regle (ou combinaison de regles ).

Le sytème evalue, la strategie mise en oeuvre, a l'aide d'un ensemble particulier de regles que l'on appelle meta-regles pour les differencier des simples regles de pilotage.

Ces meta-regles sont regroupees dans un bloc particulier (numere 0) et font l'objet d'un traitement separe du moteur d'inference.

Notamment :

- Elles ne peuvent etre mises en oeuvre que si leurs premisses sont remplies a 100% ( contrairement aux regles de pilotage ).
- Elles ne peuvent etre modifiees par le systeme lui-meme.

De maniere generale, une meta-regle enonce a quelles conditions tel ou tel organe de controle n'a pas ete correctement regule. Une amende est evaluee (STRAF) ainsi que l'intervalle de scrutation de la memoire des decisions (ZURUK) dans laquelle est stocke l'ensemble des regles de pilotage actives a chaque pas de temps.

Exemple de meta-regle ( la regle R3, stockee dans le bloc 0 ) :

```
( P1 > 1)( H10 <R 7) -> (P1WASTOO HIGH)
(STRAF =R -1)(ZURUK =R 5)
```

LORSQUE

- la pompe 1 opere a un niveau superieur a 1
- le niveau au limnimetre 10 est inferieur a 7,

ALORS

- P1 a ete opere a un niveau trop eleve
- la base de penalisation est -1
- l'intervalle de retroaction est 5 mn.

*Toutes les meta-regles sont construites sur le meme patron :*  
CONDITIONS --> DIAGNOSTIC + PUNITION + INTERVALLE DE  
RETRO-ACTION

Le diagnostic est toujours une regulation incorrecte sur un organe de regulation ( dans notre cas, une des pompes ) :

- soit une regulation trop elevee ( TOO HIGH)
- soit une regulation trop basse ( TOO LOW)

Supposons qu'au pas de temps t, la meta-regle R3 s'applique .

1) RECHERCHE DES REGLES A PENALISER :

Il existe un fichier appele " memoire de decisions" (DECMEM) , dans lequel est stockee pour les 60 mn precedant l'instant t, la suite des regles declenchees a chaque pas de pilotage.

DECMEM est relu entre les instants t-ZURUK et t.

Toutes les regles utilisees durant cet intervalle de temps et conduisant a reguler P1 sont detectees et critiquees.

Si du point de vue, du diagnostic fourni par la meta-regle, la regle est perfectible, elle est penalisee.

Dans notre exemple, cela signifie que toute regle detectee n'ayant pas regule P1 a son minimum, est perfectible puisque le niveau de P1 est trop eleve. La regle est penalisee.

2) LA PENALISATION

La penalisation consiste a prelever sur un compte affecte a la regle, une somme qui se calcule en fonction de la base de penalisation selon la formule :

$$\text{STRAF} \cdot (t-t_k-1) \cdot (0.05) \text{ avec :}$$

- STRAF : base de penalisation
- t : pas de temps d'utilisation de la meta-regle
- tk: pas de temps d'utilisation de la regle a penaliser
- 0.05: coefficient de ponderation.

II. IV) MODIFICATION DE LA BASE DE REGLES

La critique de strategie, a l'aide des regles d'evaluation ou meta-regles intervient a chaque pas de temps de pilotage.

La modification de la base de regles intervient apres chaque

evenement, alors que le module de pilotage proprement dit est desactive.

Le systeme passe alors en revue, toutes les regles de pilotage qui ont ete penalisees par relecture d'un fichier " memoire des penalisations".

Lorsque la somme des penalisations, depasse un certain seuil , on considere que la quantite d'information est suffisante pour pouvoir effectuer une modification de la regle deficiente.

Le processus de generation d'une nouvelle regle R', a partir de la regle initiale R, est amorce.

Cette modification s'opere en deux etapes :

- modification des premisses
- modification des conclusions.

#### 1) modification de la partie premisses.

Le numero du bloc de pilotage, correspondant a (R) est repere. Or, a l'issue d'une analyse prealable et detaillee du fonctionnement du systeme, sont associes a chaque bloc, une liste de parametres, qui peuvent eventuellement entrer en ligne de compte pour resoudre le sous-probleme correspondant. La moyenne ponderee (par les valeurs de punition), VM ainsi que la variance VA de chacun des parametres, lors des punitions de (R) sont calculees.

Le parametre XMIN dont la variance est minimale est suppose, le plus "significatif" ; il est retenu pour la modification.

Une nouvelle condition est construite qui s'ecrit :

soit  $(XMIN) \geq VM(XMIN)$   
soit  $(XMIN) \leq VM(XMIN)$

Le choix de l'operateur (  $\geq$  ou  $\leq$  ) depend , de l'information sur le sens de variation de XMIN en fonction du bloc.

Les premisses de la nouvelle regle (R'), incorporent la nouvelle condition si

- celle-ci n'est pas contradictoire avec une autre condition deja existante
- celle-ci entraine des conditions plus restrictives que pour R.

Notamment, si le parametre XMIN propose, n'intervient pas deja dans l'ecriture des conditions sur R, la condition

(  $XMIN \geq VM(XMIN)$  ) ou (  $XMIN \leq VM(XMIN)$  ) est tout simplement rajoutee.

#### 2) modification de la partie conclusion.

D'apres ce qui a ete dit precedemment, les seules regles penalisees et donc modifiables, sont celles conduisant a la determination du niveau de regulation d'un organe .

Le nouveau niveau de regulation propose dans R', est le niveau de R modifie en fonction du diagnostic .

- Niveau trop bas alors le niveau de regulation est accru d'un

pas - Niveau trop haut alors le niveau de regulation est diminue d'un pas .

## II.V) LIMITES DE L'APPRENTISSAGE .

D'une maniere tres generale, les limites d'un systeme d'apprentissage peuvent provenir de la meconnaissance du fonctionnement reel du reseau ( experience insuffisante, temps d'apprentissage trop court) ou de l'insolubilite du probleme pose ( pas de convergence possible du systeme de regles apres modifications successives apportees par l'apprentissage).

De maniere plus precise, concernant le systeme d'apprentissage tel qu'il est construit a Hannover, on distingue 3 types de limites:

- le type de diagnostic possible
- le type de regles qui peuvent etre modifiees
- le type de modifications introduites.

### 1) Le type de diagnostic :

Le processus d'apprentissage n'est mis en oeuvre qu'en cas de resultats insatisfaisants du module de pilotage ( "*instances negatives d'entrainement* ").

Dans ce cas, un seul type de diagnostic est possible ( alors que vraisemblablement les causes d'insuffisance sont de plusieurs type ou peuvent etre attribuees a *plusieurs organes en meme temps* ).

### 2) Le type de regles modifiables :

Il depend beaucoup du type de diagnostic produit.

Seules les regles determinant explicitement, une valeur sur l'organe de regulation sont modifiables.

Or, il est possible que l'insuffisance ne proviennent pas en premier lieu, de ces regles proprement dites, mais par exemple, des regles de description du reseau ( conversion des valeurs-quantitatives en valeurs qualitatives ).

### 3) Le type de modifications introduites :

La partie premisses d'une nouvelle regle est generee, par ajout de nouvelles conditions ou modification d'une condition existante en une condition plus restrictive.

Il s'agit donc d'un processus de specialisation ( en relation d'ailleurs avec le fait qu'il s'agit d'un apprentissage a instances d'entrainement negatives ).

Si dans une regle R du noyau primitif, une condition sur un parametre inadequat est entree, celui-ci subsistera dans les regles issues de R. Le mieux, qui puisse se produire dans ce cas, est que les regles issues de R soient laissees pour compte ( pour cause de mauvaise efficacite ).

Ceci induit a penser que la generation du noyau primitif de regles suppose certaines precautions, notamment ne pas rentrer des regles trop specialisees ( on augmente les chances de prendre en compte un parametre inadequat ).

En dernier lieu, il est a noter que si une telle architecture du systeme d'apprentissage, se revele inadequate du fait par exemple de certaines caracteristiques de fonctionnement du reseau, une modification ou extension du systeme

d'apprentissage a d'autres types de diagnostic ou generation de regles serait tres malaisee . Il faudrait, en effet, construire les programmes de traitement correspondants ( modifier le moteur d'inference ) .

### III) DESCRIPTION SOMMAIRE DU BASSIN VERSANT DRAINE PAR LE BORBECKERMÜLHENBACH.

La partie de reseau choisie, pour effectuer un nouveau test du systeme de pilotage, est situee dans la commune de BOTTROP, pres de la ville de ESSEN.

Elle est generee, par un syndicat nomme EMSCHERGENOSSENSCHAFT.

L'ensemble des bassins versants consideres, est draine par 2 rus (Bach) :

- le BORBECKERMÜLHENBACH
- le SÄLZEBACH ( qui se jette dans le precedent).

La surface totale drainee, par le BORBECKERMÜLHENBACH est environ 2300 hectares dont 1200 hectares impermeabilises.

#### OBJECTIF DE GESTION .

Le bassin draine par le BORBECKERMÜLHENBACH, ainsi que d'autres, sont situes sur un partie du bassin de la RUHR en constant affaissement altimetrique du fait de l'extraction intensive de la houille.

Le phenomene a pris une telle ampleur, que l'exutoire naturel de ces differents bassins, est maintenant situe a un niveau plus eleve que les bassin eux-memes. La totalite des eaux drainees doit donc etre pompee.

La capacite des installations de pompage, bien que considerable est cependant limitee, notamment en cas d'evenement important.

Un debit maximal admissible a donc ete fixe et reparti sur les differents bassins interesses.

Ainsi, le debit maximal admissible du BORBECKERMÜLHENBACH, a l'exutoire de la zone d'etude, ne doit en aucun cas depasser 30-31 m<sup>3</sup>/s.

#### CONTRAINTES SUPPLEMENTAIRES

La plupart des troncons sur le trajet principal du reseau sont constituees de canalisations a ciel ouvert - il s'agit d'un reseau hydrographique naturel, au depart-

On note cependant 2 troncons couverts, dont les capacites maximales d'evacuation ( 12-13m<sup>3</sup>/s et 19-20 m<sup>3</sup>/s) sont relativement faibles.

Ces 2 troncons ( les simulation ulterieures de fonctionnement l'ont confirme ), forment des goulot d'etranglement a haut risque de debordement, meme par pluie relativement moderee - Nous avons simule le fonctionnement du reseau avec une pluie test d'intensite 20mm/h et de duree 1 heure).

#### LES BASSINS DE RETENTION.

Pour realiser l'objectif et aussi eviter les debordements aux points critiques, la solution proposee consiste a construire des bassins de retention, permettant l'ecretement des debits en periode de forte intensite.

Quatre bassins ont ete planifies, numerotes de 1 a 4, dans le sens amont vers l'aval B1,B2,B3,B4 , parmi lesquels B4 est deja operationnel, et B3 construit (bien que non encore operationnel).

Tableau descriptif

No des bassins	etat	capacite
B1	prevu mais non construit	16000 m3
B2	prevu mais non construit	60000 m3
B3	construit mais non operationnel	36000 m3
B4	operationnel	100000 m3

- Le bassin B1 est situe en amont du premier etrangement ( $Q_{\max}$  admissible  $\ll$  13 m<sup>3</sup>/s).
- Le bassin B2 est situe en amont du second etrangement. ( $Q_{\max}$  admissible  $\ll$  19 m<sup>3</sup>/s).
- le bassin B4 est situe directement en amont de l'exutoire du bassin versant.

#### LES POMPES .

Les debits d'entree et sortie des bassins, sont regules par des vannes guillotines.

Or, le modele de simulation utilise a Hannover EXTRAN ( modele de transport hydraulique fonde sur la resolution des equations de Saint-Venant ) est incapable de reproduire le fonctionnement d'une vanne . Celles-ci sont donc remplacees par des pompes - que le modele est capable de prendre en compte -.

principe de l'introduction de pompe fictives :

Scheme 1 :

jonction x  $\rightarrow$  pompe  $\rightarrow$  jonction x+1  $\rightarrow$  jonction x+2  $\rightarrow$   
 bassin de retention

A la jonction x, est branche un bassin de retention.

On suppose alors que le troncon (x, x+1) est coupe, le flux ne s'ecoulant plus que par l'intermediaire d'une pompe (fictive). Les capacites maximales des pompes sont fixees en fonction des objectifs et des contraintes.

Si le debit Q, a la jonction x, depasse le debit d'extraction de la pompe, le surplus est stocke en bassin de retention.

Pour chaque des bassins de retention, le modele exige l'attribution d'une pompe ( soit donc 4 pompes au total ; P1, P2, P3, P4).

Capacite maximale de refoulement des pompes :

P1 : 13 m<sup>3</sup>/s  
 P2 : 19 m<sup>3</sup>/s  
 P3 : 28 m<sup>3</sup>/s  
 P4 : 31 m<sup>3</sup>/s

#### IV) PLAN DE TRAVAIL

##### IV.I) LA SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DU RESEAU

Un module de simulation du fonctionnement du reseau, est obligatoirement incorpore au systeme tant en phase de recherche qu'en phase operationnel.

En phase recherche, il permet de mesurer les consequences sur le reseau de strategies induites par differentes methodes de recherches ( modules-experts, optimisations ...)

En phase operationnelle, il permet :

- de palier aux eventuelles defaillances ou manques du reseau de mesure
- d'introduire un aspect previsionnel dans la recherche de strategie.

Quelques simulations du fonctionnement du reseau, munis des 4 bassins de retention prevus, ont ete realisees en utilisant des descriptions simplifiees du reseau .

Ces essais ont mis en relief, la difficulte de simuler cette partie du reseau, par le modele de transport utilise ( EXTRAN fonde sur la resolution des equations de Saint-Venant ). Le reseau comporte, en effet, de nombreuses discontinuites (ressauts), que le modele supporte difficilement.

Les resultats obtenus, notamment pour le calcul des debits sur certains troncons, fluctuent de maniere anormale (instabilite de resolution des equations differentielles).

C'est la raison pour laquelle il est actuellement procede , en cooperation avec les specialistes du modele EXTRAN, a des nouveaux essais de simulation sur ce reseau, par modifications tant au niveau de la description du reseau et que de certaines parties du modele.

Toutefois, et malgre ces restrictions, les simulations ont permis de mieux apprehender le fonctionnement du reseau et de mettre en relief les points noirs.

##### II) LES ESSAIS OFF-LINE DU SYSTEME D'APPRENTISSAGE ( Novembre 1987 - Mars 1988) .

Pour simplifier le probleme, il a ete decide de n'effectuer de regulation que sur le bassin de retention B2. Des regles de pilotage et d'evaluation , les plus simples, ont ete ecrites.

Dans un premier temps, il est prevu d'implementer ce noyau de regles et de tester le systeme, lorsque la simulation sera au point.

Il s'agit, de savoir exactement comment se comporte le systeme d'apprentissage.

Notamment :

- comment se transforme le noyau de regles ?
- comment se modifient les resultats de strategie ?

Sur ces deux points, on étudiera, la convergence du processus d'apprentissage en fonction

- de la structure du noyau primitif de règles (dans quelles mesures des différences dans l'écriture du noyau initial, se repercutent-elles après apprentissage ?...)

- du type d'expérience que le système connaît (s'agit-il de tester le système sur un même événement, plusieurs fois, simule ou bien sur une série d'événements différents ?...)

Cette partie du projet devrait s'achever en Mars 1988. La rédaction d'un rapport sur les premiers résultats obtenus est toutefois prévu en Décembre 1987.

Si l'on vise à l'opérationnalité d'un tel système, il faut de plus, étudier soigneusement, les cas où des défaillances, se produisent en cours d'événement.

On distingue, plusieurs types de défaillances :

- défaillances sur les appareils de mesure ( la description de l'état du réseau est plus grossière )

- défaillances sur les organes de commande (les actions possibles sur le réseau sont plus limitées).

La prise en compte, de défaillances sur les organes de commande ne fait pas seulement intervenir, le système de recherche de stratégie mais nécessite une réflexion approfondie sur l'architecture globale du système de gestion. Une telle réflexion est encore prématurée sur la zone concernant le projet ( Borbeckermühlenbach) .

En outre, il ne semble pas pour l'instant possible de simuler correctement les pannes avec le modèle disponible.

Aussi les seules défaillances dont il sera question, sont des défaillances sur l'appareillage de mesure.

Entre Juin et Décembre 1988, on cherchera, à définir des règles supplémentaires ( et éventuellement meta-règles? ), permettant de prendre en compte, EXPLICITEMENT, le cas de non-validité de certaines mesures et on testera le nouveau système quant à son opérationnalité.

#### IV.III) TRANSCRIPTION DES MODULES (Janvier 1988 - Juin 1988)

Il est prévu, d'effectuer par la suite, une transcription du système en langage PROLOG (adapté à l'intelligence artificielle).

Les avantages d'une telle transcription sont de 2 types :

- meilleure adaptabilité du système à différents réseaux.

- élargissement des possibilités de modifier, compléter et complexifier le module d'apprentissage.

En effet, PROLOG fournit un moteur d'inférence, qui simule des processus de raisonnement, beaucoup plus généraux, que ceux simulés par le moteur d'inférence actuellement écrit en FORTRAN.

L'utilisation de PROLOG, permet ainsi, de se concentrer exclusivement sur l'écriture des règles et fournit pour cela un outil beaucoup plus performant que celui dont nous disposons actuellement.

- possibilites d'utiliser des variables dans l'écriture des regles
- possibilite d'ecrire un meta-savoir a un niveau aussi eleve qu'on le desire ; on peut ainsi ecrire des regles d'evaluation de meta-regle (des meta-meta-regles)...
- ...

Cependant, la transcription du systeme en PROLOG, necessite un apprentissage prealable, du langage proprement dit. Des cours de PROLOG, sont prevus a cet effet, au cours du premier trimestre de l'annee 1988

## V) CONCLUSION

Alors que la necessite du controle de reseau, en temps reel, est de plus en plus reconnue, notamment pour les reseaux des grandes agglomerations dont les cout de modifications (aggrandissements) deviennent exorbitants, le prototype realise a HANNOVER constitue une demarche interessante.

Teste d'abord a BREMEN, puis transpose a BOTTRUP, le systeme permettra d'enrichir notre experience, dans le domaine des systemes-experts appliques au pilotage de reseau ; en particulier, pour ce qui concerne :

- l'adequation de ces systemes, au pilotage automatique et operationnel de reseau
- le developpement de methodologies d'expertise de fonctionnement d'un reseau, par utilisation de modules d'apprentissage performants.

**ANNEXE 1**

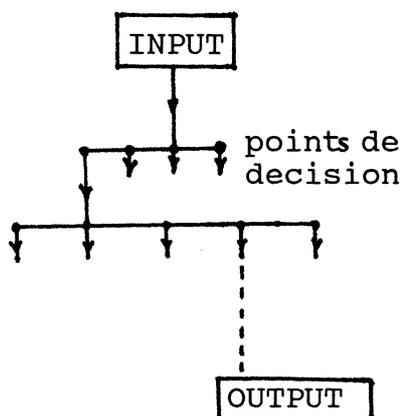
UN SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCE

I)

Classiquement, un ordinateur opere sequentiellement le traitement des donnees et les points de decision ou s'opere le choix d'une sequence d'instructions a l'exclusion d'une autre, sont localises precisement et de maniere definitive.

Pour certains traitements, une telle organisation s'avere inadaptée. Notamment, dans le cas ou le traitement depend de maniere essentielle, des caracteristiques des donnees-entrees (input), ou encore lorsque l'ensemble des combinaisons possibles de traitement est si grand qu'il ne peut etre fige au prealable.

Schema 1



Lorsque le nombre de points de decision est faible, l'ensemble des procedures de traitement peuvent etre inscrites. (ie une variation de l'input n'a que peu d'influence sur le traitement).

Plus le nombre de points de decision augmente, plus l'écriture d'un programme en sequences figees d'instructions devient inextricable et donc plus ardues aussi les eventuelles corrections ou modifications.

Dans ce cas, il est propose d'operer *une separation nette entre des procedures generales de traitement et des procedures particulieres*. Ceci conduit a definir ce que l'on nomme *un systeme a base de savoir*.

Un systeme a base de savoir, est compose au minimum :

- d'une base de savoir ( Wissensbasis ).
- d'un moteur d'inference ( Folgerungsmaschine ).

Si en fonction des caracteristiques de l'input, le systeme definit lui-meme le traitement qui s'ensuit, le systeme est nomme *systeme a pilotage infere (SPI)*.

Un SPI se definit par une separation claire des donnees, des regles de traitement et des mecanismes d'inference.

Il se decompose en :

- un ensemble de donnees ( des faits inscrits en input ).
- un ensemble des modules de pilotage ( qui peuvent etre des groupes de regles ).
- un moteur d'inference .

Le moteur d'inference opere cycliquement, en quatre etapes :

1) CHOIX : les modules de pilotage appropriés ( par ex. un ensemble des regles ) sont actives.

2) MATCHING : ( procedure " d'unification ) : En fonction des caracteristiques de l'input, a l'interieur d'un module de pilotage, la pertinence des decisions possibles est evaluee. Des conflits peuvent eventuellement apparaitre.

3) SORTIE : Resolution des conflits a l'interieur du module de pilotage.

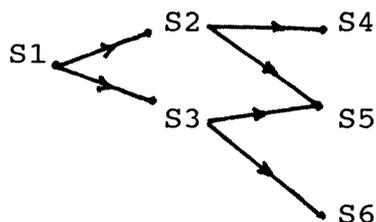
4) RESULTAT : Le module de pilotage, ayant la priorite la plus elevee, est active.

Deux types de systeme, correspondent a ce schema de mise en oeuvre:

- le systeme a base de reseau ( *Netzwerk basierten System* ).
- le systeme a base de regle ( *Regelbasierten System* ).

- Dans un systeme a base de reseau, un module est constitue d'un ensemble de sommet sur une grille, lesquels sont relies par des fleches qui definissent l'ordre de traitement.

Schema 2.



- Dans un systeme a base de regles, les modules sont definis comme des regles, dont le schema est PREMISSES ---> CONCLUSIONS .

Un systeme a base de regles est constitue de sous-ensembles nommes *systeme de productions* ( une production = une regle ). (SP).

Plus exactement, un systeme de productions (SP) se definit par le couple (W,P) dans lequel :

1) W est l'ensemble des signes possibles ( alphabet ). C'est un ensemble fini, non vide.

2)  $P = ( (\alpha_1, \beta_1); \dots; (\alpha_n, \beta_n) )$  est un ensemble de couples. Chaque couple  $(\alpha_i, \beta_i)$  correspond a une production  $p_i$  et se compose d'une premisses  $\alpha_i$  et d'une conclusion  $\beta_i$  .

$p_i : (\alpha_i, \beta_i)$  se lit donc  $\alpha_i \rightarrow \beta_i$

Par exemple, dans les langages formels, l'etablissement de la grammaire se definit par l'ecriture d'un systeme de production.

Remarque :

Il n'est pour l'instant pas presage de la maniere dont le systeme de production est relu, pour generer l'information-output a partir de l'input (les faits).

Deux solutions sont possibles:

1) *lecture du systeme de productions en chainage avant :*

La lecture de la production  $p_i$  ( $\alpha_i, \beta_i$ ) se fait de la maniere suivante :

- On verifie en premier la valeur de verite de  $\alpha_i$ .
- Si  $\alpha_i$  est vrai alors on en deduit que  $\beta_i$  aussi est vrai.

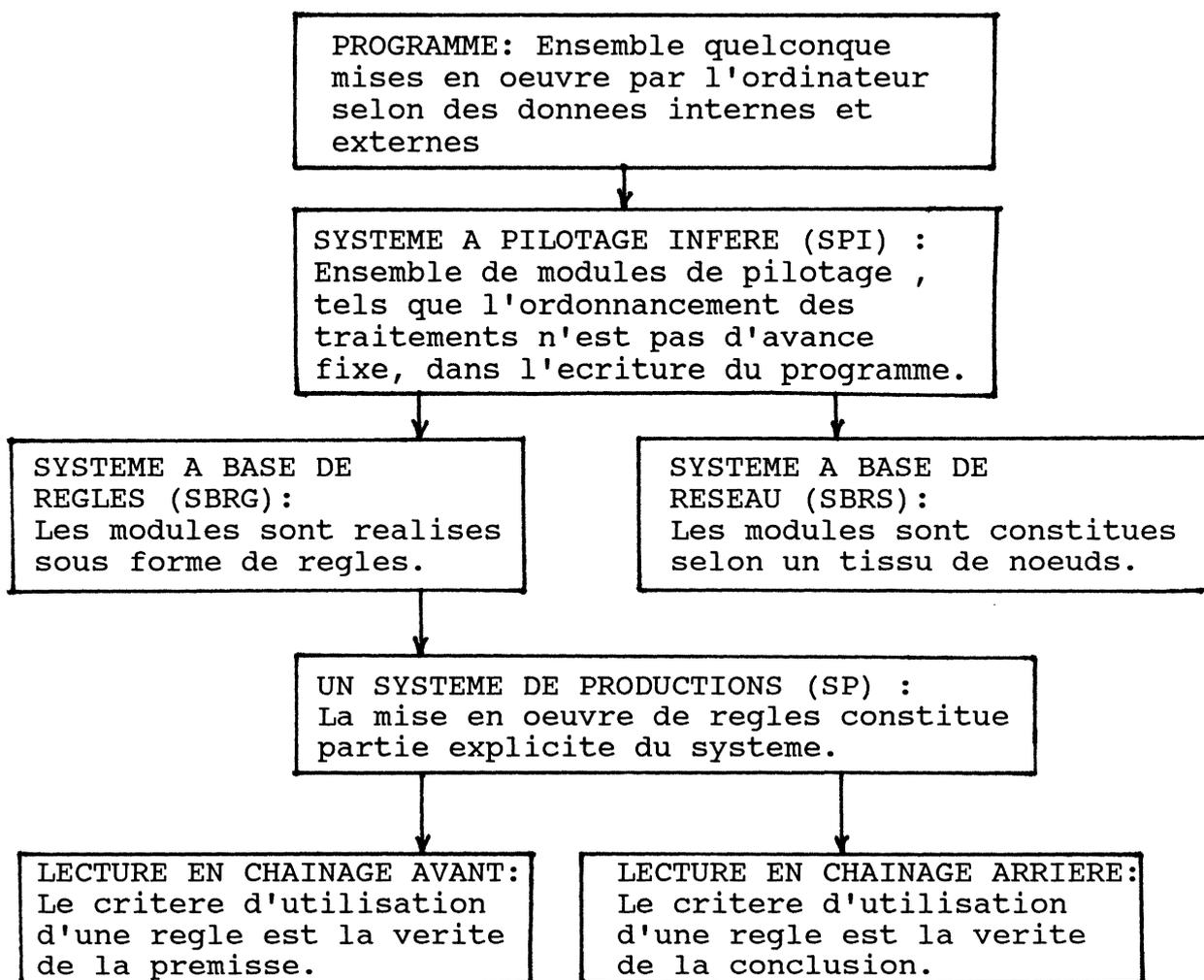
2) *Lecture du systeme de productions en chainage arriere :*

Dans ce cas, on suppose a priori que  $\beta_i$  est vrai et on verifie si cette hypothese n'entraîne pas de contradiction avec les information dont on dispose sur  $\alpha_i$ .

Si  $\alpha_i$  est vrai, alors notre hypothese de depart est verifiee.

Si  $\alpha_i$  est faux, alors notre hypothese de depart est fausse.

Si  $\alpha_i$  est indecide, alors le cycle continue en posant comme hypothese  $\alpha_i$  est vrai, et en cherchant a la verifier.



Schema 3

Remarque : Le sens des fleches indique une specialisation croissante.

- En chainage arriere, le systeme fonctionne de la maniere suivante:

- 1) Une hypothese A est posee .
- 2) On repertorie toutes les productions contenant la conclusion A ou NON-A
- 3) On verifie si les conditions d'une de ces productions sont remplies.

Si OUI alors l'hypothese A est soit acceptee, soit rejetee.

Si NON, les conditions indeterminees ( dont la valeur de verite n'est pas connue et qui ont entraine l'indecidabilite ) sont elles-memes posees en hypothese et verifiees dans les cycles suivants.

- En chainage avant, le systeme opere selon le cycle appele 'RECOGNIZE-ACT CYCLE' (CYCLE RECONNAISSANCE-ACTION) jusqu'a ce qu'une condition de rupture du cycle soit remplie.

- 1) RECOGNIZE ( Etape de reconnaissance)

Les premisses des productions sont evaluees (vraies/fausses), a l'aide des informations contenues dans la base de faits (Datenbasis).

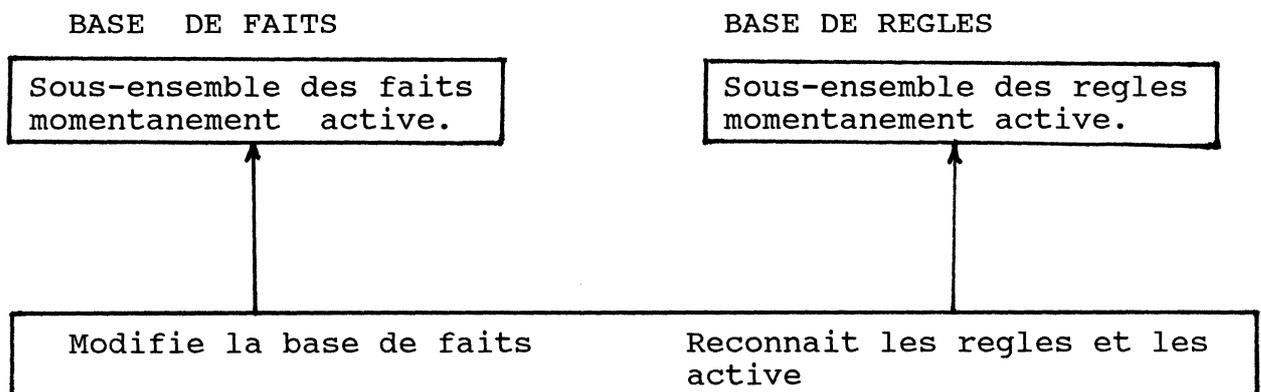
Des conflits entre productions peuvent s'elever dans le cas ou leurs premisses sont egalement verifiees.

- 2) RESOLUTION DES CONFLITS :

Une production parmi les productions en concurrence est selectionnee.

- 3) ACT ( Action ):

La base de fait est modifiee en fonction des conclusions edictees par la regle choisie.



MOTEUR D'INFERENCE

Par la suite , SEULS LES SYSTEMES A CHAINAGE AVANT SONT CONSIDERES.

Dans ce cas, on peut dire qu'un SP se decompose en trois parties :

- La base de faits, autrement appelee 'WORKING MEMORY' ( Memoire de travail ) notee en abrege WM.

Cette base de faits (WM), contient l'information sur les valeurs de tous les parametres caracterisant l'objet sur lequel on travaille. - Dans notre cas, il s'agit des parametres d'etat et de controle du reseau d'assainissement, ainsi que les intensites de pluie -

La base de regle ( Regelbasis ), notee (RB) .

Elle est supposee decrire l'ensemble des traitements possibles appliques a l'objet.

- Dans notre cas, il s'agit de l'ensemble des regles conduisant a l'elaboration d'une strategie de controle du reseau -

Le moteur d'inferences ( Interpreter ) :

Il active et desactive les differents groupes de regles, et modifie la base de faits (WM) en fonction des conclusions.

## II) PROBLEMES RENCONTRES LORS DE L'ELABORATION D'UN SP.

### a) CHOIX DU SOUS-GROUPE DE REGLES A ACTIVER :

La scission de l'ensemble des regles en sous-groupes, permet un gain de temps. En effet, en cas de conflits pour l'activation d'une regle, la depense necessaire pour resoudre le conflit croit lineairement avec le nombre de regles activees et le nombre de faits actives.

### b) RESOLUTION DE CONFLIT A L'INTERIEUR D'UN SOUS-GROUPE DE REGLES Quels criteres permettent d'etablir une priorite de declenchement des regles ?

### c) COMPLETEUDE DU SYSTEME DE PRODUCTION ( Vollständigkeit ).

Dans le cas ou la completeude n'est pas assuree, il est possible que pour certains etats de l'objet etudie, aucun " resultat" ne puisse etre formule par le systeme .- Dans notre cas, le systeme est incapable de determiner une strategie de gestion , pour certains etats du reseau.-

LES SOLUTIONS PROPOSEES POUR CHACUN DES PROBLEMES SONT :

#### A)

- Essayer de diviser le probleme en une suite de sous problemes aussi independants que possibles les uns des autres . La resolution d'un sous-probleme est associee a un sous-ensemble de regles .

- Les sous-problemes sont traitees dans leur ordre chronologique d'apparition.

#### B)

- Associer a chaque regle, un ou plusieurs parametres, servant a definir son ordre de priorite. Parmi les parametres on peut citer:

- son "age" : plus une regle est "agee", plus elle est importante.

- son efficacite : Les regles donnant trop souvent lieu a des strategies insatisfaisantes sont penalisees.

...

#### C)

- Utilisation du principe du "PARTIAL MATCHING" ( Unification partielle ) : Il n'est pas necessaire pour activer une regle que les premisses soient remplies a 100% ,en s'assurant toutefois qu'un pourcentage minimal des conditions sont remplies. - Dans notre cas, le pourcentage minimal requis pour l'activation d'une production est 50% - .

Il est ainsi assure, que dans la presque totalite des cas, une regle peut etre activee (ie le systeme est capable de produire un resultat).

### III) RESUME

Un systeme de productions (SP) comporte differents niveaux de savoirs, lesquels sont inscrits de maniere differentes dans le systeme :

- Un savoir de faits : stocke dans un fichier nomme WORKING MEMORY.
- Un savoir de regles : stocke dans un fichier nomme (REGELBASIS).
- Un savoir de controle, qui organise le declenchement des diverses regles , et permet de modifier le savoir de faits en fonction des conclusions obtenues : stocke dans des algorithmes de traitement.

Remarque :

Le savoir de regles se subdivise lui-meme en deux categories :

- Le savoir proprement dit.
- Le meta-savoir.

Le *savoir* se definit formellement comme l'ensemble des regles dont l'activation induit une modification de la base de fait.

Le *Meta-savoir* se definit formellement comme un ensemble de regles dont l'activation induit une modification de la base de regles.

Cette distinction est fondamentale, pour la comprehension des systemes capables d'apprentissage, lesquels contiennent un meta-savoir.

ORDINATEUR ----->> OBJET (= RESEAU)

SAVOIR	MOTEUR D'INFERENCE	Ensemble de parametres ayant des valeurs fixees
META-SAVOIR		
BASE DE REGLES	SAVOIR DE CONTROLE	BASE DES FAITS

Schema 5

*Le savoir de controle* est fige dans des algorithmes programmes qui forment le moteur d'inference. Il n'est pas susceptible de modifications, aussi doit-il etre le plus general possible pour eviter toute restriction d'utilisation.

*Le savoir (la base) de regles* explicite le type d'actions a mener sur l'objet (reseau). Il doit pouvoir etre modifie ou adapte dans le cas ou l'objet est lui-meme modifie. (agrandissement du reseau,

modification des caracteristiques des bassins versants, modifications dans l'appareillage de controle ...).

Remarque :

Dans les sytemes hautement developpes, un interface de dialogue est disponible, qui permet la modification ou l'extension de la base de regles, en fonction des desirs de l'operateur.

*Le savoir de faits* , decrit l'etat de l'objet sur lequel on travaille.

La tache du SP est de modifier et d'etendre ce savoir.

# APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

I) *Apprendre recouvre différents sens* . On distingue :

- La collecte d'un savoir de faits ( *Faktenwissen* ).
    - L'organisation d'un nouveau savoir, selon une représentation opérationnelle.
  - La prise en compte de faits nouveaux et leurs réunions par observation et expérimentation.
- ...

Nous comprendrons sous le vocable *Apprentissage automatique* une modification définitive du système, par mise en oeuvre d'un programme, visant à accroître l'efficacité du système vis à vis de l'objet observé.

Dans le cas d'un système à base de règles, l'apprentissage automatique signifie que le système est capable de modifier lui-même sa propre base de règles, pour accroître sa capacité à résoudre les problèmes qui lui sont soumis.

Remarques :

- 1) Une simple modification du savoir de faits ( correspondant à un savoir "par coeur" ), est exclue du concept d'apprentissage.
- 2) On s'intéressera essentiellement, aux systèmes à base de règles, utilisant un raisonnement en chaînage avant ( cas du système prototype de BREMEN ).

II) De manière théorique, un système à base de règles, en chaînage avant, est un sextuplet  $S(V, DB, PR, RI, P, L)$

V: L'ensemble non vide et fini, des symboles manipulés (contient des constantes et des variables).

DB: L'ensemble des états possibles de l'objet .Il contient en fait des états impossibles puisque tous les paramètres n'évoluent pas indépendamment les uns des autres.

PR: Un ensemble fini et non vide de productions de la forme :  
 $pk = ( lk_1, \dots, lk_n \longrightarrow lk_0 )$  ou  $lk$  est un "atome" ( ou mot en langage formel ).  
PR est la base de règles.

RI: Le moteur d'inférences, fonctionne en chaînage avant.

P: L'ensemble des états possibles relativement au problème posé.  
Un élément de PCDM s'appelle un fait.

L: L'ensemble des états modifiés possibles - domaine des solutions-, relativement aux faits existants. Un élément de L,  $l$  s'appelle un résultat ou une solution.

Remarque:

Le domaine des solutions du problème du sextuplet  $S$ , est le produit cartésien  $P \times L$ . De ce produit, seuls les éléments  $(p, l)$  tels que le résultat  $l$  est accessible au fait  $p$ , sont intéressants. Leur ensemble forme l'ensemble des solutions relatives au fait donné note LR .

Soit  $S=(V,DB,PR,RI,P,L)$  un systeme a base de regles.

$p_0 \in P$  un fait ( etat donne du systeme ).

LR l'ensemble des solutions  $p_0$ -relatives ie l'ensemble des couples  $(p_0,li)$  pour lesquels  $li$  est un etat resultant possible de l'etat initial  $p_0$ .

Remarque:

Lorsque les changements d'etat de l'objet, sont effectues de maniere deterministe, LR est defini par une fonction.

*Le but du systeme, consiste , partant d'un fait  $p_0$  a trouver un resultat  $l$  (apres action sur l'objet), lequel resultat est non seulement possible mais acceptable relativement aux objectifs qui sont fixes .*

Pour ce faire, le systeme opere selon *une procedure deductive .*

Soient:

-  $S$  un systeme a base de regles

-  $p_0$  un fait quelconque

*Une procedure deductive (dp) est une suite d'etats  $\langle di,pi,ui \rangle$   $i=1,n$  dans lesquels ,*

*-  $di$  est un etat de l'objet ( $di \in DB$ )*

*-  $pi$  est un element de la base de regles .*

*-  $ui$  est l'etape d'unification dans laquelle les premisses de  $pi$  sont comparees a l'etat actuel du systeme.*

Si l'etape d'unification est reussie, de nouvelles conclusions sont accessibles et l'etat du systeme est alors  $di+1$  avec :

$di+1 = di \cup ( ui (conclusion(pi))$

Le proces de deduction se definit par les etapes suivantes :

- Choix d'un ensemble de mots  $(li1,...,lik)$ .

- Choix de  $pi$ , parmi l'ensemble des productions. *Si aucune regle n'est applicable le proces est interrompu sans qu'un resultat n'ait pu etre etabli (base incomplete).*

- Definition et application de l'unificateur  $ui$  .

-  $di+1 = di \cup ( ui(conclusion(pi))$ .

Si  $di+1 = di$ , le proces est itere -ie retour a l'etape 1-.

Sinon existe-t-il un  $l \in di+1$  qui soit un etat possible de l'objet  $(d_0,l) \in LR$  ?

Si oui,  $l$  est le resultat .

Sinon, le proces est itere - ie retour en etape 1 -.

On reconnait le schema general du *recognize-act cycle* auquel il a ete fait reference plus haut.

III) Deux conditions cependant doivent être impérativement remplies pour qu'un tel schéma fournisse des résultats dignes de foi.

- La cohérence de la base de règles
- La complétude de la base de règles.

Soit  $S=(V, DB, PR, RI, P, L)$  un système à base de règles

S est dit cohérent si :

- $dp=\langle dj, pj, uj \rangle$   $j=1, n$  un processus de déduction quelconque admissible
- Pour tout  $p \in P$  (un état possible du système = état de référence)
- Pour tout  $li$  (résultat issu de  $p$  et d'un processus de déduction  $dp$  quelconque)

il est IMPOSSIBLE qu'il y ait ( $li \in dl$ ) ET ( $NON-li \in dn$ ) pour des étapes  $l$  et  $n$  du même processus de déduction  $dp$ .

S est dit complet si pour tout état de référence de l'objet, le système peut produire au moins un résultat  $l$  admissible.

IV) L'ACCROISSEMENT DES PERFORMANCES DU SYSTÈME s'effectue selon 3 grands types de transformations :

- 1) *élargissement quantitatif*
- 2) *amélioration qualitative*
- 3) *gain d'efficacité par réduction de la complexité*

Ces 3 points sont appelés des catégories d'apprentissage :

1) L'ÉLARGISSEMENT QUANTITATIF :

Il consiste, à partir d'un système donné  $S=(V, DP, PR, RI, P, L)$  avec un espace de solution  $LR$ , à trouver un système  $S'=(V', DB', PR', RI, P', L')$  muni d'un espace de solutions  $LR'$  tel que :  $P' \supset P$  et  $LR'(P) = LR(P)$

*Le système  $S'$  peut traiter un ensemble plus grand de problèmes que le système  $S$ , mais avec la même information initiale que  $S$ , sur le même problème.  $S'$  produit la même solution.*

2) L'ÉLARGISSEMENT QUALITATIF

À partir d'un système donné  $S=(V, DB, PR, RI, P, L)$  ayant un espace de solutions  $LR$ , on construit un système  $S'=(V, DB, PR', RI, P, L')$  ayant un espace de solutions  $LR'$  tel que  $LR'$  contienne des solutions meilleures que  $LR$ .

Autrement dit

$\forall p \in P$  (un état de l'objet), le résultat produit par un processus de déduction  $dp'$  dans  $S'$  est meilleur que le résultat produit par le processus de déduction  $dp$  dans  $S$  correspondant (Meilleur au sens des objectifs pré-établis).

On obtient un tel résultat, par transformation de la base de règles ( $PR \longrightarrow PR'$ ) dans laquelle au minimum une règle  $PR$  a été effacée pour être remplacée par une règle plus performante.

3) LA RÉDUCTION DE COMPLEXITÉ :

La complexite  $c$ , d'un systeme de regles  $S$  est une mesure imprecise de ses exigences en place memoire et en temps calcul.

La reduction de complexite consiste a partir d'un systeme donne  $S=(V,DB,PR,RI,P,L)$  , a construire un systeme  $S'=(V,DB,PR',RI,P,L)$  tel que *le proces de deduction sur un cas  $p$ , se deroule plus rapidement et plus economiquement dans  $S'$  que dans  $S$ , sans que le resultat en soit modifie.*

Un tel resultat peut s'obtenir de deux manieres:

- Un ensemble donne de regles dans  $PR$  est remplace par une seule regle equivalente du point de vue fonctionnel (macrosubstitution).
  
- On produit des meta-regles qui pilotent le choix des regles dans le proces de deduction. Dans ce cas, le temps de recherche d'un resultat est reduit puisqu'on introduit une heuristique permettant de shunter certaines verifications.

V) SELON UNE AUTRE TYPOLOGIE, ON DISTINGUE LES CLASSES D'APPRENTISSAGE EN :

- Apprentissage *par instructions*
- apprentissage *par utilisations d'exemples*
- apprentissage *par observation*
- apprentissage *par experimentation*

*Les categorie sont ordonnees par ordre croissant de complexite du processus d'apprentissage  $\longrightarrow$  une autonomie plus grande du systeme.*

Naturellement, une autonomie plus grande du systeme implique qu'il renferme une plus grande quantite d'informations sur lui-meme et le monde exterieur.

PROBLEMATIQUE SPECIFIQUE D'UN SYSTEME DE PILOTAGE  
DE RESEAU D'ASSAINISSEMENT.

## I) LES METHODES DISPONIBLES POUR LE PILOTAGE DE RESEAU

Soit un objet dont l'etat, a l'instant  $t$ , est connu par un vecteur d'etat  $X(t)$ .

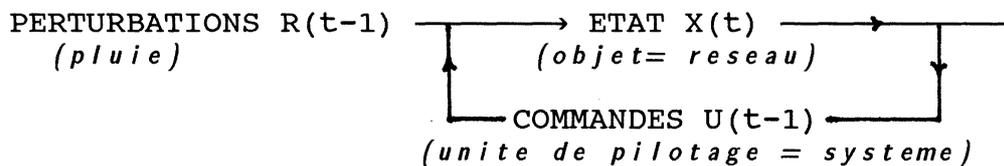
Son evolution est donnee par la quantite  $dx/dt$ .

Le but du pilotage consiste a pouvoir determiner cette quantite  $dx/dt$ , en fonction d'objectifs pre-etablis ie influencer la modification d'etat de l'objet dans une direction privilegiee.

Ceci s'effectue par determination des valeurs de certains parametres que l'on nomme *parametres de commande* et qui sont regroupes dans un *vecteur de commande*  $U()$ .

Le vecteur de decision  $U()$ , est determine en fonction :

- de l'etat du systeme a l'instant donne decrit par  $X(t)$
- des *perturbations* auxquelles le systeme est soumis que l'on regroupe dans un *vecteur des perturbations*  $R()$ .



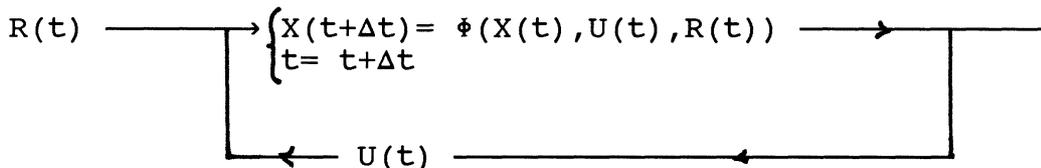
Schema 6

$$dx/dt = \phi'(x, U, R, t)$$

Apres discretisation on obtient :

$$x(t+\Delta t) = \phi(X(t), U(t), R(t))$$

D'ou l'on deduit :



Schema 7

Si l'on considere un intervalle de temps  $(t_1, t_n)$ , l'objectif de pilotage consiste a minimiser un *fonction-cout*  $F$

$$F = \sum_{i=1, n} f_i(U(t_i), X(t_i))$$

avec des conditions aux limites de la forme :

$$g_i(U(t_i)) = 0 ; h_i(U(t_i)) = 0 ; i=1, n \text{ (numero des pas de tps)}$$

Deux methodes sont etudiees :

- l'optimisation numerique
- les methodes derivees de l'intelligence artificielle (IA) ie utilisation d'un systeme de productions.

## II) L'OPTIMISATION NUMERIQUE :

Le principe de ces methodes, consiste, a rechercher toutes les suites de decisions possibles dans l'intervalle (t1,tn) et reperer la suite qui donne le cout minimal.

*Si le fonctionnement de l'objet est parfaitement connu et simple a modeliser , l'optimisation comporte certains avantages :*

- L'optimisation est rapide.
- Le resultat obtenu est precisement l'optimum des possibilites.

Dans le cas contraire :

- Le temps de calcul de la solution, croit beaucoup plus vite que l'accroissement du nombre de variables du probleme ou le nombre de pas de temps sur lesquels l'optimisation est effectuee.

Au cas ou pour gagner du temps, une heuristique est employee, l'auscultation de l'arbre des decisions n'etant plus exhaustive, ne permet pas d'assurer dans tous les cas, (sauf demonstration du contraire) l'obtention de l'optimum reel.

De meme, si la description de l'objet a ete simplifiee, les approximations engendrent elles aussi des incertitudes sur la determination de l'optimum reel.

Dans ces deux cas, *on est oblige d'abandonner le concept d'optimum stricto sensu, au profit de celui de "bonne solution".*

- D'autre part, il est tres souvent, difficile de modifier les algorithmes d'optimisation, conformement a des modification intervenant sur l'objet.

## III) PILOTAGE PAR L'INTERMEDIAIRE D'UN SYSTEME DE PRODUCTIONS

Comme il a deja ete explique, les systeme de productions se caracterisent, par une separation nette des faits (stockes dans un fichier nomme WORKING MEMORY) , des regles (stockees dans un autre fichier RULES BASIS ), et des algorithmes de declenchement de ces regles et d'inscription des nouveaux faits obtenus.

Les resultats obtenus par le systeme de productions (dans le cas du pilotage du reseau de BREMEN), compares a ceux obtenus en optimisation (quadratique), ont montre que lorsque les productions sont judicieusement choisies, les ecartes sont faibles.

#### IV) CONCLUSIONS

Dans le cas ou la taille du probleme est petite (peu de variables d'etat et peu de variables de commande), *une optimisation est preferable, car plus rapide et moins couteuse a implementer.*

Au contraire, dans le cas de systeme complexe, et dont la description ne peut etre que simplifiee, les systemes a regles de production deviennent plus interessants.

Les caracteristiques suivantes entrent alors en jeu .

- ROBUSTESSE :

- *Un savoir flou (ou insuffisamment fonde) peut etre nonobstant pris en compte*

- *Le systeme peut de meme se garantir facilement contre toute perte d'informations (pannes d'appareil de mesures, de controle...)*

- LISIBILITE :

- *D'eventuelles modifications dans la description de l'objet (ou les prescriptions de pilotage) peuvent etre tres simplement inscrites sans que les algorithmes de mise en oeuvre de ces memes regles doivent etre modifiees.*

- *On peut retracer l'ensemble du raisonnement qui a induit telle ou telle decision , en stockant la suite des regles appliquees.*

- DES POSSIBILITES D'APPRENTISSAGE du systeme peuvent etre envisagees qui se concretisent par une modification de ses regles de production .

LE RESEAU DE BREMEN SUR LA RIVE GAUCHE DE LA WESER

## I) INTRODUCTION :

*Le but du present travail est de construire un systeme a regles de production, capable d'apprentissage automatique pour piloter un reseau d'assainissement en temps reel.*

Le reseau choisi est le reseau d'assainissement de la ville de BREMEN sur la rive gauche de la WESER.

Les raisons de ce choix sont les suivantes:

1) Le reseau remplit les conditions pour lesquelles l'utilisation d'un systeme a regles de productions est theoriquement avantageuse -ie c'est un objet complexe dont le comportement n'est pour une bonne part apprehende que de maniere empirique -

2) On dispose d'une chronique de mesures et pilotage du reseau relativement importante.

3) L'interet d'un systeme de pilotage a regle de productions peut etre precisement evalue par comparaison

- avec les resultats obtenus en pilotage manuel ( Chroniques de pilotage)

- avec les resultats obtenus par optimisation (Un systeme prototype de pilotage automatique fonde sur une optimisation quadratique a ete realise pour ce reseau par M. SEMKE)

## II) DESCRIPTION DU RESEAU

Le reseau considere est situe sur la rive gauche de la WESER a BREMEN. C'est un reseau dont les plus anciens troncons datent de la fin du XIX ieme siecle. Il est non separatif.

Il draine 1000 ha en zone urbaine ( dont 470 ha de surface impermeabilisee). La capacite totale de stockage dans le reseau est 54000 m<sup>3</sup> (dont environ 7500 m<sup>3</sup> sont occupes en permanence par les ecoulements de temps sec).

On dispose de 2 reservoirs ayant chacun une capacite de 10000 m<sup>3</sup>.

Actuellement, il existe 5 exutoires directs du reseau dans la WESER. Mais etant donne leurs situations en amont du collecteur principal, et la hauteur des seuils de surverse, ils ne diffusent qu'une faible quantite d'eau et n'ont pas ete pris en compte dans le modele de simulation. (De plus, la suppression definitive de ces exutoires est prevue).

Le terrain est extremement plat a BREMEN, aussi faut-il utiliser des pompes pour refouler l'eau en direction de la station d'epuration et quand c'est necessaire en direction des bassins de retention, ou encore du milieu exterieur.

Les *organes de pilotage* sont :

- les pompes a HAUPTPUMPWERK LINKES WESERUFER (HPLW)
- les pompes a la station PUMPWERK KRIMPEL (PK)

Ces installation permettent le remplissage des bassins de retention.

L'installation HPLW est pilotee.

Par temps sec, le pilotage est manuel.

Par temps de pluie, le remplissage des bassins de retention est commande automatiquement. *le principe de pilotage repose sur la comparaison des seuils de hauteur avec des valeurs-limites pre-etablies.* Apres remplissage complet des bassins, le pilotage redevient manuel.

L'intervalle minimal de renouvellement des consignes est 2.5 minutes.

Le centre de traitement des donnees recoit de maniere continue:

- les valeurs mesurees de hauteur d'eau en 23 points du reseau
- les valeurs d'intensite pluvieuse en 3 points
- les consignes de pilotage sur les pompes.

## III) MODELISATION DU COMPORTEMENT DU RESEAU

Le reseau comprend 3300 points d'entree.

Pour des raisons de temps calcul et de place memoire, le nombre de points-entrees du reseau a ete reduit a 65 points d'entree.

En modifiant les parametres de surface, les diametres des canalisation, leur longueur et leur pente, de maniere appropriee on essaie d'obtenir la meilleure correspondance avec le comportement reel enregistre.

Les pompes sont regroupees en 5 ensembles :

Pour chacun des ensembles a ete etablie une gradation de pilotage qui comporte de 2 a 4 etats :

- etat 1 correspond au plus faible debit refoule disponible
- etat maximal correspond au debit refoule maximal.

Le pas le plus eleve de pilotage, ne correspond pas toujours, au debit maximal considere dans le modele de simulation (probleme de conditions aux limites).

Les etats intermediaires de pilotage sont mis en oeuvre autant qu'il est possible.

Pour l'ensemble HPLW, le debit maximal refoule en direction de la station d'epuration, a ete fixe a deux fois la valeur par temps sec (capacite maximale de la station atteinte).

La vidange des bassins de retention est opere :

- pour HPLW par la pompe P6
- pour PK par la pompe P7.

Tableau des gradations de pilotage

No de la pompe	capacite suivant les niveaux ( en dm3/s)			
	niveau 1	niveau 2	niveau 3	niveau 4
P1	0	500	900	1250
P2	0	2000	5000	-
P3	0	2000	-	-
P4	0	115	350	700
P5	0	600	1530	3060
P6	0	500	-	-
P7	0	500	-	-

## V) CRITERES D'EVALUATION DU PILOTAGE

3 criteres sont pris en compte :

- presence de debordements dans le reseau
- decharge d'eau polluees dans le milieu
- cout d'utilisation des pompes

L'ordre d'enumeration correspond a l'ordre des priorites retenu.

1) EN CAS DE DEBORDEMENT, la capacite de stockage au point considere est epuisee ; l'eau remonte en surface et produit l'inondation.

Les quantites d'eau qui debordent ne sont pas mesurees et ne peuvent etre evaluees qu'a l'aide des modeles de calcul.

### 2) DECHARGES POLLUANTES DANS LE MILIEU

- A HPLW, cela se produit lorsque les pompes continuent de refouler en direction du bassin de retention alors qu'il est completement rempli.

Le surplus est refoule en direction de la WESER par une pompe de capacite 2 m<sup>3</sup>/s. S'il rentre plus de 2 m<sup>3</sup>/s , l'eau s'ecoule vers une zone inondable.

- A PK, l'eau en surplus s'ecoule directement dans la WESER.

### 3) LES DEPENSES DE POMPAGE.

Celles-ci comprennent :

- les couts courants (connus)
- des couts supplementaires (non precises).

Les couts courants, se decomposent eux-memes en :

- le cout de l'energie depensee
- le cout d'utilisation

Le premier correspond au prix des KWh depenses. De maniere approximative, on suppose qu'il croit lineairement en fonction du cout d'utilisation des pompes.

Le cout d'utilisation, quant a lui, se calcule a partir de la moyenne des 3 pics energetiques maximaux du mois considere. La valeur d'un pic energetique mensuel, est la plus grande depense d'energie enregistree pendant le mois, sur un quart d'heure de pilotage.

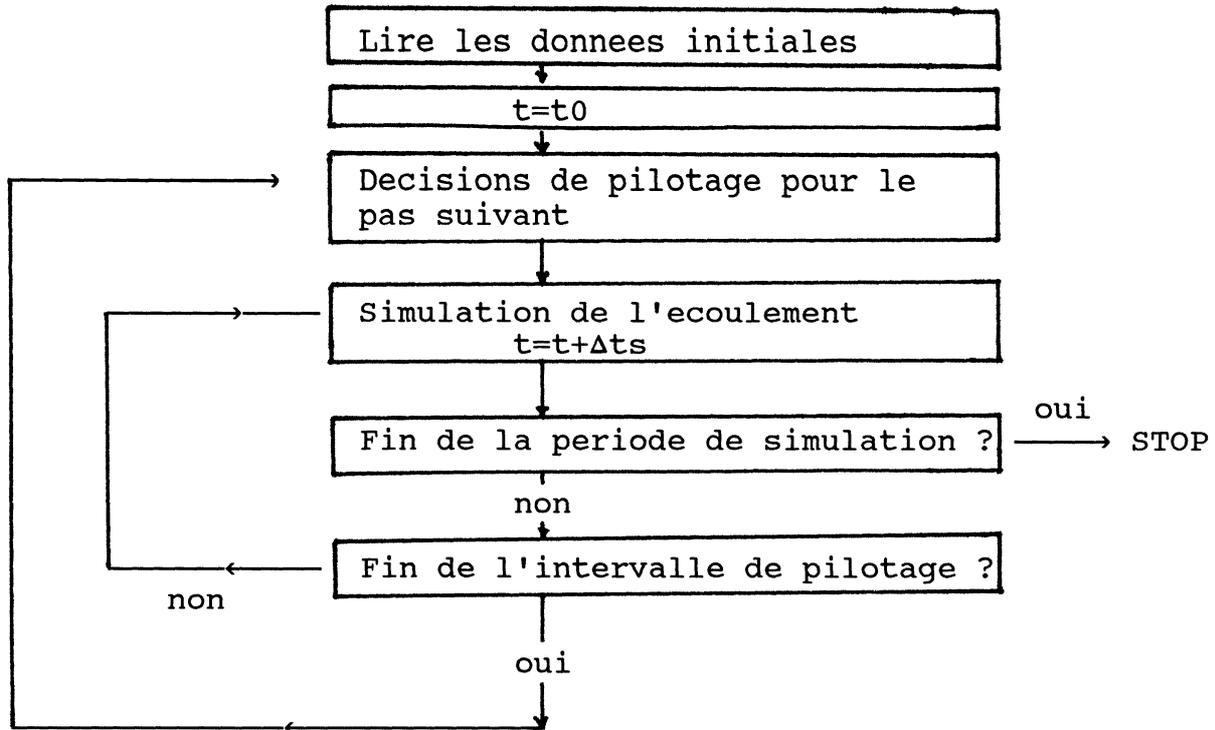
Le cout courant est fortement dependant de ce cout d'utilisation (d'ou une forte penalisation d'une strategie de pilotage requerant une grande depense d'energie sur peu de temps). Le pilotage doit donc eviter au maximum les pics d'energie.

LA SIMULATION DU RESEAU

## I) ORGANISATION GENERALE DES TACHES

Le developpement d'un systeme de pilotage du reseau, requiert l'utilisation d'un modele de simulation qui calcule les valeurs des parametres d'etat en fonction des parametres de commande et de perturbation.

La gestion du transfert d'information entre le module de simulation et le module de pilotage proprement dit, est assuree par le programme "CONTROL".



Schema 8

$\Delta t_s$  : pas de temps de simulation

$\Delta t_p$  : pas de temps de pilotage (fixe a 5 minutes).

Remarque:

On suppose que  $\Delta t_p \gg \Delta t_s$ .

## II) LE MODULE DE SIMULATION DES ECOULEMENTS.

Le module s'appelle EXTKON. Il s'agit de la reunion et du developpement de deux modules utilises a l'Institut für Wasserwirtschaft de Hannover, HYSTEM et EXTRAN.

HYSTEM est un modele hydrologique de simulation du ruissellement et ecoulement en surface . Le calcul se fait en deux etapes :

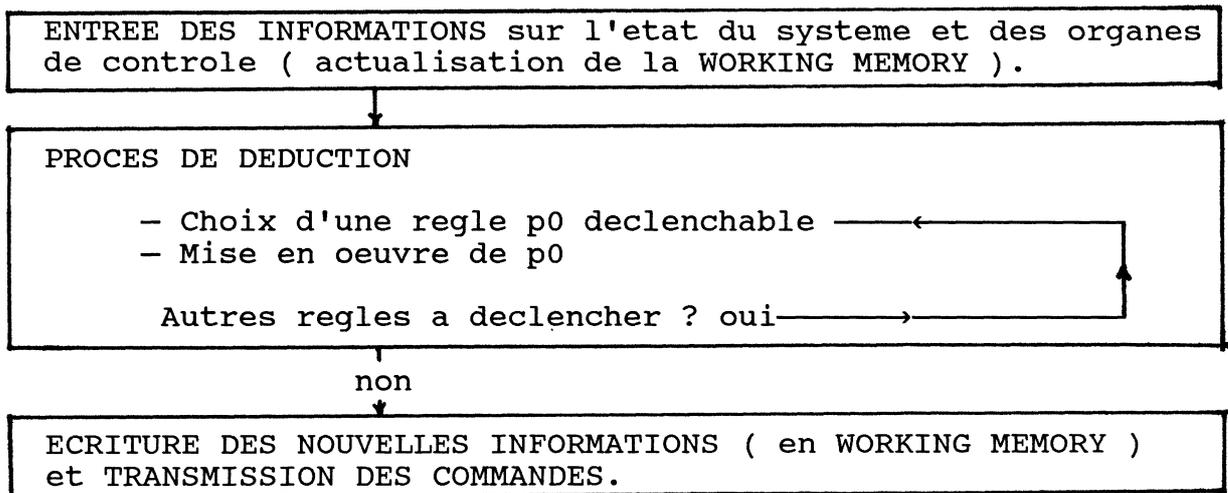
- Calcul de "la pluie efficace".
- Concentration et transfert des flux.

EXTRAN est un modele de simulation des ecoulements en conduite fonde sur la resolution des equations de SAINT-VENANT.

## III) ARCHITECTURE DES TRAITEMENTS D'INFERENCE .

Le systeme developpe est un systeme de productions, independant dans une large mesure (mais non totalement) du reseau considere et mis en oeuvre selon le principe du chainage avant.

Le systeme est ecrit en FORTRAN 77. Il opere selon l'algorithme suivant :



Schema 9

#### IV) LA BASE DE FAITS ( WORKING MEMORY = WM )

La base de faits (WM) est *la memoire courte du systeme* .Toutes les informations sur l'etat instantane du reseau y sont stockees.

Elle se presente sous la forme d'un tableau d'entiers WM(100,5) ayant la configuration suivante :

ENREGISTREMENT PRECEDENT

CHAMP1 No	CHAMP2 PARAMETRE	CHAMP3 OPERATEUR	CHAMP4 VALEUR	CHAMP5 No
--------------	---------------------	---------------------	------------------	--------------

ENREGISTREMENT SUIVANT

#### Schema 10

Les valeurs inscrites, dans les champs 2,3,4 de l'enregistrement sont des valeurs codees, le plus souvent.

Dans un fichier de coddage ,il est, par exemple, stipule que :

- le parametre H9 (limnimetre numero 9) est code 9
- le parametre P1 (pompe numero 1) est code 201
- ...
- l'operateur > est code 4
- l'operateur >R est code 24
- ...
- la valeur LOW est codee 21
- la valeur FALSE est codee 14

Plus precisement, les parametres et les operateurs sont obligatoirement codes, avant l'inscription en WM.

Pour ce qui est des valeurs, on en distingue deux categories :

- *les valeurs predicatives*
- *les valeurs de quantite*

L'ensemble des predicats disponibles (LOW, HIGH, TRUE, FALSE, ZERO, 1, 2,...) est lu au depart en fichier de decodage et ne peut etre modifie en cours de fonctionnement .

Remarque :les valeurs 1,2,3,4 correspondent aux 4 niveaux de fonctionnement, au maximum, disponibles pour les pompes en service.

L'ensemble " des valeurs de quantite" n'est limite que par la precision de calcul disponible.

C'est l'operateur qui permet de faire la difference entre une "valeur-predicat" et une "valeur-quantite" .

L'operateur simple est utilise dans le cas de valeur-predicat.

Ex : >, <, >, <, =, ...

Dans le cas de valeur-quantite on ajoute a l'operateur la lettre R (comme reel).

Ex : >R, <R, >R, <R, =R, ...

Exemples d'enregistrements avant coddage :

Ex1:

(1111122233333) —————> no des champs de lecture  
 ( H9 =R 10) —————> ce qui est ecrit  
 TRADUCTION : la hauteur au limnimetre numero 9 atteint 10 m.

Ex2:  
 (1111122233333)  
 ( P1 = 2)  
 TRADUCTION : La pompe numero 1, est regulee au niveau 2.

Remarque:  
 Au depart, un troisieme type d'operateur etait prevu premettant la comparaison directe, des valeurs de deux parametres. Du point de vue du moteur d'inference, il s'agit en effet, d'un autre type de comparaison.

Ainsi on pourrait ecrire :  
 ( P1 =P P10) avec la signification: P1 est regulee de la meme maniere que P10.  
 Les operateurs utilises seraient, par exemple, dans ce cas =P, »P, >P, >P, <P, ...  
 Ce raffinement n'a pas ete pour l'instant juge indispensable. Il a par consequent, ete mis de cote.

MODULE DE SIMULATION Consequences previsi- bles de la strategie en cours	WORKING MEMORY Etat instantane du reseau	MODULE DE PILOTAGE Recherche des nou- velles decisions
---	--	--

Schema 11

## V) LA BASE DE REGLES

*La base de regles contient l'ensemble des regles de pilotage disponibles. C'est la memoire longue du systeme.*

Les regles se decomposent en deux parties :

- une partie conditions
- une partie conclusions (ou actions)

Schema general de la production  $p_i$  :

$p_i : A_1 A_2 A_3 \dots A_k \longrightarrow B_1 B_2 \dots B_n$

- $A_1 \dots A_k$  sont les  $k$  conditions de validite de la production  $p_i$ .
- $B_1 \dots B_n$  sont les  $n$  conclusions que l'on doit en tirer.

Chaque  $A_k, B_n$  est structure identiquement en 3 champs :

CHAMP1 PARAMETRE	CHAMP2 OPERATEUR	CHAMP3 VALEUR
---------------------	---------------------	------------------

Schema 12

Exemple de production :

( H9 >R 5) -> ( P1 = 2)

Traduction : Lorsque le limnimetre No 9 atteint le niveau 5 m, alors reguler la pompe No 1 au niveau 2.

Remarque:

Pour une meilleure lisibilite, la production a ete ecrite , telle qu'elle le serait en fichier de productions initial .

De meme que pour les informations stockees en base de faits, le moteur d'inference ne traitant que des informations numeriques, il est necessaire de coder toutes les regles. Elles sont ensuite stockees, dans un tableau d'entiers, nomme PRDMEM ( pour PRODUCTION MEMORY ).

Le codage ne modifie pas, la structure par champs, ni leur signification intrinseque.

*Du aux limites du moteur d'inference, les parametres introduits dans le premier champ, ne peuvent etre que des constantes. (ie les conditions ou actions ne peuvent s'appliquer qu'individuellement a chaque organe de mesure ou de controle).*

Les operateurs disponibles sont :

- pour les valeurs predicats :  $<, \leq, =, \geq, \triangleright$
- pour les valeurs quantites :  $<R, \leq R, =R, \geq R, \triangleright R$
- Comparaison directe entre 2 parametres :  $<P, \leq P, =P, \geq P, \triangleright P$

Ces operateurs de comparaison, sont bien sur, les memes que ceux utilises pour construire la base de faits ( WORKING MEMORY ), comme nous l'avons vu precedemment.

## VI) LE MOTEUR D'INFERENCE.

*Le moteur d'inference conduit le proces de deduction.*

Etant donne que dans la base de regles, aucune variable n'est autorisee, l'etape d'unification disparaît. L'algorithme se reduit aux 3 etapes suivantes :

- Choix d'une regle parmi l'ensemble des regles activees.
- Application de la regle et modifications correspondantes de la base de faits.
- Si aucune condition de rupture du cycle n'est rencontree, retour a l'etape 1

### LE CHOIX D'UNE REGLE .

*L'ensemble de toutes les regles de production stockees en memoire, est decoupe en blocs, parmi lesquels un seulement est active a un instant donne.*

Avantages :

- Le temps de recherche est diminue .
- On s'assure que pour chaque sous-probleme de pilotage correspondant a un bloc de regles ( ex le pilotage d'une pompe determinee ), une decision est prise.

*A l'interieur d'un bloc, on verifie POUR TOUTES LES REGLES, l'adequation des premisses ( ensemble des conditions ) a l'etat du reseau tel qu'il est decrit dans la base de faits (WM).*

Pour chaque production, on evalue le pourcentage des conditions effectivement verifiees.

Par exemple, si la moitie seulement des conditions sont verifiees - les autres etant fausses ou indecidables - , on dit que les conditions sont verifiees a 50% .

La regle qui detient le plus haut pourcentage de conditions verifiees est activee .

Toutefois si ce pourcentage reste en deca 50%, le risque de declencher une regle completement inappropriee est juge trop grand.

Dans ce cas, aucune decision relative au sous-probleme traite, n'est prise ; ce qui signifie pratiquement pour la regulation , conservation de l'etat de regulation actuel jusqu'au prochain pas de pilotage.

Si deux regles ( R1, R2) entrent en conflit d'activation, deux autres criteres entrent en jeu :

- la frequence d'utilisation note WIEOF (pour Wie oft = "combien de fois")

- le compte associe a la regle note VALUE qui est une mesure de l'efficacite globale de la regle.

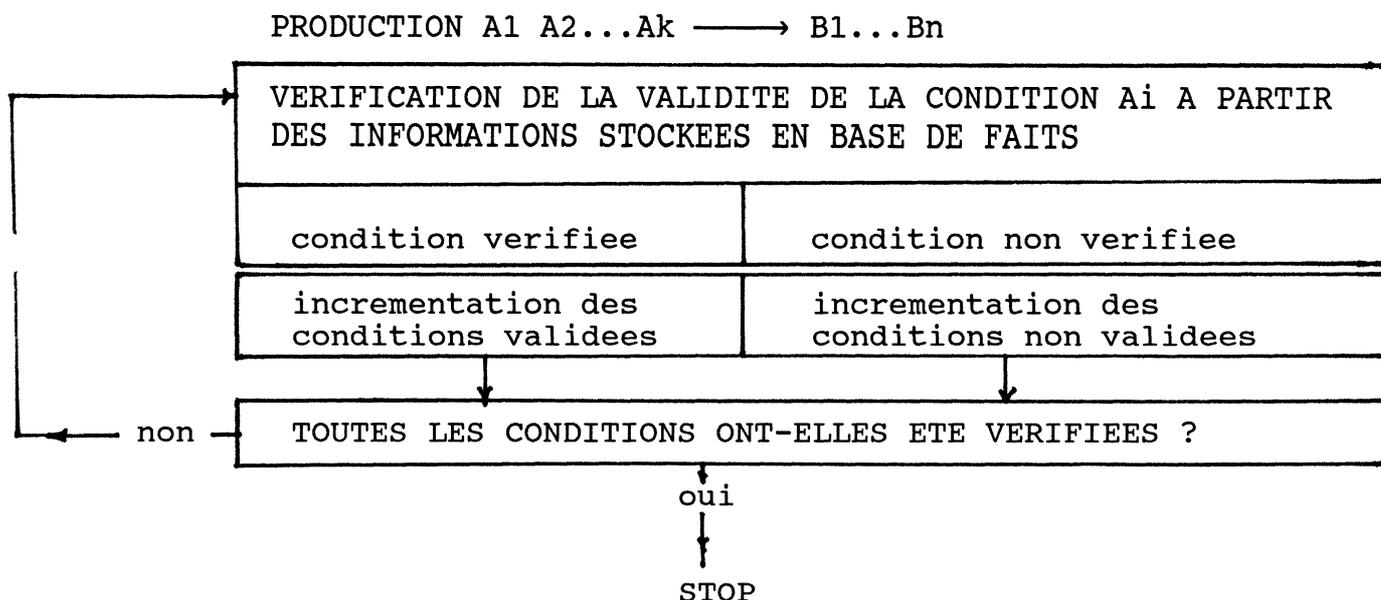
En effet, chaque fois que la regle est jugee avoir ete declenchee de maniere indue ( strategie insatisfaisante), elle est "punie" -ie a son compte associe, est soustrait une somme (la "punition" ou "amende" ). La valeur initiale du compte etant nulle, il s'ensuit que  $VALUE < 0$ .

Ils sont combines de la maniere suivante :

Si les deux regles ont deja ete activees (  $WIEOF \neq 0$  ), on choisit la regle dont l'efficacite moyenne (  $VALUE/WIEOF$  ) est la plus grande.

Sinon, on choisit la regle dont l'efficacite globale (  $VALUE$  ) est la plus grande.

En cas ou ces criteres ne sont pas determinants, c'est l'ordre d'ecriture de la regle qui fait la decision.



Schema 13

#### APPLICATION DE LA REGLE CHOISIE

*L'application d'une regle signifie, que les conclusions de la regle sont inscrites dans la base de faits (WM) ; les valeurs des parametres correspondants sont mises a jour.*

Initialement l'induction a ete classifiee en deux categories :

- Dans le premier cas ,apres application de la regle et modification de la WM en consequence, les dfaits qui ont servi a etayer les hypotheses de la regle sont elimines de la base de faits. - symbole utilise --> -

- Sinon, on ne procede a aucune elimination d'information meme apres son utilisation pour l'activation de telle ou telle regle. - symbole utilise -> -

En fait, seul le deuxieme symbole est pratiquement utilise. L'elimination d'information sur les faits est en effet, une operation dangereuse.

#### LES CONDITIONS D'ARRET DU PROCES D'INDUCTION

Après assurance qu'une decision a ete prise sur tous les organes de commande - ie une regle a ete choisie et activee pour tous les

blocs de regles, correspondant aux sous-problemes de pilotage -,  
*la condition "ENDE = TRUE" est verifiee dans le dernier bloc et  
transferee dans la base de faits.*

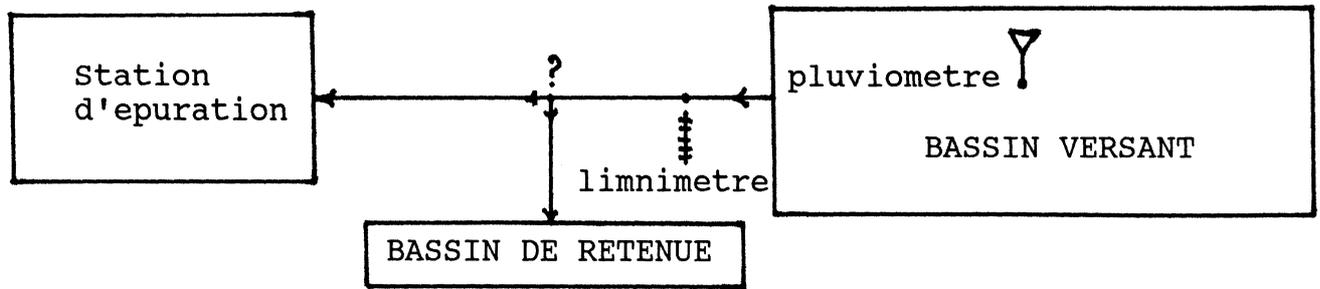
Cette information signifie l'arret du present cycle de recherche  
de strategie.

Remarque :

Le fait qu'il ne soit pas obligatoire qu'une regle de pilotage  
voit ses conditions d'application remplies a 100% pour etre,  
malgre tout, appliquee, assure mieux la completude du systeme ( il  
donne une reponse quelle que soit la situation ).

Notamment en cas de panne sur les appareils de mesure, il peut, en  
premiere approximation, sans qu'aucune regle specifique ne soit  
rentree, continuer de fonctionner.

VII) UN EXEMPLE D'UTILISATION SUR UN CAS SIMPLE .



Schema 14

Soit un bassin versant

- Les eaux ruissellees, sont dirigees vers la station d'epuration laquelle peut traiter un debit maximal de 2 m<sup>3</sup>/s.
- Si le debit est superieur, une pompe P est lancee qui refloue l'excédent en direction d'un bassin de retenue.
- La pompe n'a que deux etats possibles : ARRET/MARCHE (OFF/ON)
- Les donnees sur l'etat du reseau sont : une mesure d'intensite pluvieuse sur le bassin versant notee R , une mesure de hauteur d'eau a l'exutoire du bassin versant notee H.

La base de regles initiale, contient sept regles :

```
( H <= 0.5)      ->   ( H = LOW)
( H > 0.5) ( H <= 1.0) ->   ( H = HIGH)
( H > 1.0)      ->   ( H = OVF)
( H = LOW)      ->   ( P = OFF)
( H = HIGH)     ->   ( P = ON)
( P = ON)       ->   ( ENDE = TRUE)
( P = OFF)      ->   ( ENDE = TRUE)
```

A l'instant t :

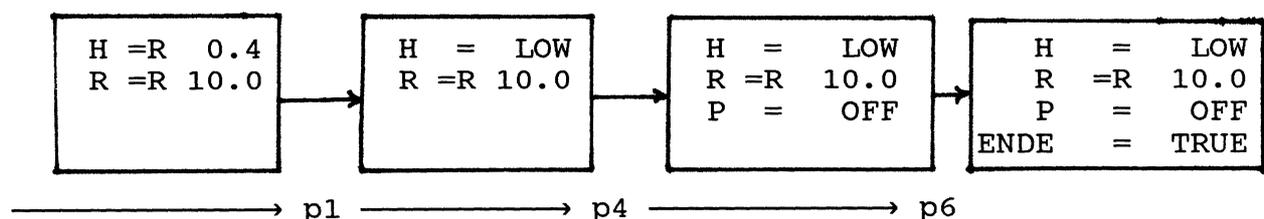
- Le niveau d'eau s'eleve a 0.4 ( H=0.4)
- L'intensite s'eleve a 10 mm/h ( R=10.0).

Ces Valeurs instantanees, sont stockees dans la base de faits (WM).

```
H =R 0.4
R =R 10.0
```

Le proces de deduction est lance qui se poursuit jusqu'a ce que la condition d'interruption soit verifiee "ENDE=TRUE" .

On represente la suite du contenu de la base de faits (WM).



La decision ( P = OFF) est transferee, par la suite, a l'unité de controle .

Remarque :

Dans le jeu de regles ainsi defini, l'information sur la pluie ne joue aucun role.

## VIII) LES INFORMATIONS QUI ONT SERVI A CONSTRUIRE LA BASE DE REGLES

( pour le cas du prototype de BREMEN ) :

Differentes sources d'informations disponibles sur le pilotage du reseau de BREMEN ont ete utilisees :

- Les regles de remplissage automatique des bassins de retention, actuellement en vigueur.
- Les pratiques plus ou moins formalisees, qui ont cours en pilotage manuel (lorsque les bassins sont pleins).
- Les chroniques de pilotage, et remarques pour tous les evenements sur le reseau depuis 1981.

### LES REGLES DE REMPLISSAGE AUTOMATIQUE DU BASSIN :

Elles se fondent sur un ensemble de conditions ( unions ou intersections logiques ) relatives aux niveaux limnimetriques en differents points-cles du reseau.

Pour chacun de ces points-cles, on definit trois seuils caracteristiques :

- un niveau-seuil  $N1(H)$  caracteristique du temps sec
- un niveau-seuil  $N2(H)$  intervenant dans l'ecriture de conditions simultanees sur plusieurs points ( intersection logique de conditions )
- le niveau le plus eleve,  $N3(H)$  atteint en 1 point du reseau declenche une reaction des organes de commande ( union logique de conditions)

Exemples :

- Si  $(H1 \geq N2(H1))$  ET  $(H2 \geq N2(H2))$  ET  $(H3 \geq N2(H3))$  ALORS P est declenchee. ( intersection logique ).
- Si  $(H1 \geq N3(H1))$  OU  $(H2 \geq N3(H2))$  OU  $(H3 \geq N3(H3))$  ALORS P est declenchee. ( union logique ).

Pour definir ces niveaux-seuils  $N1, N2, N3$  , en fonction du modele de simulation utilise ( operant sur un reseau simplifie ), on a distingue 4 etats de remplissage des canalisations.

- |    |  |              |
|----|--|--------------|
| 1. | remplissage des canalisations aux alentours du limni | $\leq 50\%$  |
| 2. |  | $\leq 80\%$  |
| 3. |  | $\leq 100\%$ |
| 4. |  | $> 100\%$    |

Niveau 1 : LOW ( niveau bas )  
Niveau 2 : MID ( niveau moyen )  
Niveau 3 : HIGH ( niveau haut )  
Niveau 4 : OVF ( debordement ).

LES REGLES DE PRODUCTION , EN PILOTAGE MANUEL ONT ETE ECRITES LORSQU'ELLES POUVAIENT ETRE CLAIREMENT FORMALISEES.

L'ensemble de regles constitue la base de regles notee (RBO = base initiale) et contient environ 125 regles.

Des simulations sur les evenements de l'annee 1981, ont montre que le systeme, muni de RBO reproduit sensiblement les strategies de pilotage qui ont reellement ete appliquees.

- tant pour ce qui concerne les instants de mise en marche et arrêt des pompes que pour les quantités déchargées sans traitement ou les quantités stockées en bassin de rétention ( qui sont nos critères d'évaluation de stratégie) - .

Les différences constatées, peuvent être imputées à :

- une prise en compte insuffisante des oscillations du flux d'eaux usées.

- certaines décisions prises en pilotage manuel, qui n'ont pu être référées à un raisonnement facilement traduisible en règles.

D'autres part, aucune donnée en phase de vidange des bassins de rétention n'est répertoriée - les chroniques de pilotage ne durent que le temps de la pluie - . La seule référence est dans ce cas, les résultats obtenus par le modèle de simulation.

Les résultats obtenus par la suite ( module d'apprentissage), montreront que, des modifications, même légères, de la base de règles peuvent entraîner des gains substantiels quant aux résultats de stratégie.

## CARACTERISTIQUES DE L'APPRENTISSAGE

I) A partir de la base de regles initiale RBO , le systeme doit, par apprentissage, ameliorer ses performances. Deux solutions sont possibles :

- Un operateur rentre les ameliorations, par l'intermediaire d'un interface de dialogue.
- l'apprentissage se fait automatiquement, sans intervention exterieure.

C'est la deuxieme solution qui a ete retenue.

Nous avons precedemment defini une typologie de l'apprentissage selon qu'il s'agit d'un elargissement quantitatif, d'une amelioration qualitative ou d'une reduction de la complexite.

La reduction de complexite, n'est pas interessante. Elle ameliore les performances de systeme dans l'application des regles ( gain de temps, de place en memoire machine ). Elle n'ameliore pas les performances de regles elles-memes ( meilleures strategie proposee).

De meme, un elargissement quantitatif est ininteressant , le reseau a piloter est complement donne, des le depart,  
- ie toutes les informations sur la configuration du reseau et les caracteristiques des organes de commande sont connues au depart et ne sont, a priori, pas susceptibles de modifications importantes qui necessitassent l'implantation de modules speciaux - .

*C'est donc une amelioration qualitative qui est mise en oeuvre.*

De meme, si l'on vise un autonomie du systeme, il doit etre capable *d'apprendre par experience* ( et non par rentre d'un jeu d'exemple ou autres...).

## II) L'EVALUATION DU PILOTAGE

La premiere etape d'un processus d'amelioration des regles existantes, consiste a les evaluer.

Les parametres intervenant dans l'evaluation des regles sont :

- La frequence d'utilisation
- L'age
- L'origine
- L'efficacite

*L'influence exacte de l'activation d'une regles donnee, sur les performances de la strategie appliquee, est toujours difficile a evaluer en ce qu'une decision est la consequences d' UN ENSEMBLE de regles dont l'action s'influence reciproquement et dont certaines ont pu etre prises longtemps a l'avance.*

La methode retenue est la suivante :

- Le systeme verifie successivement les parametres ( ou ensembles de parametres ) permettant de juger de l'etat du systeme a l'instant t, ( etat satisfaisant ou insatisfaisant) .

- En cas d'etat insatisfaisant, le systeme en attribue la responsabilite a la mauvaise regulation de tel ou tel organe de commande .

- Le systeme considere alors l'historique des regles prises ( ie il scrute sa memoire de decisions ) et detecte les regles qui ont decide de la regulation successive de l'organe incrimine. Ces regles sont critiquees et eventuellement "punies".

La critique de l'etat du systeme, et l'attribution des dysfonctionnements a la mauvaise regulation de tel ou tel organe de commande est un savoir inscrit dans le systeme, sous forme de regles.

*Ces regles d'evaluation et diagnostic, sont appelees des meta-regles, ceci pour les distinguer de regles de pilotage simples.*

Les regles de pilotage operent sur le reseau. Elles caracterisent le module de pilotage, ie le savoir que le systeme detient sur son objet, le reseau .

Les meta-regles operent sur les regles de pilotage elles-memes. Elles decrivent , une partie du savoir que le systeme detient sur lui-meme autrement appele le *meta-savoir* . Tout systeme susceptible d'apprentissage possede un meta-savoir, quelle que soit la forme sous laquelle il est inscrit dans le systeme (meta-regles, ou directement programmes de traitement).

Plus le moteur d'inference est performant - ie capable de reproduire les proces de raisonnement les plus generaux -, plus le meta-savoir qu'il est possible d'inscrire sous forme de regles (de meta-regles) est differencie , plus le module d'apprentissage est "intelligent", - ie capable de s'adapter aisement aux objets les plus divers -.

Dans notre cas, le moteur d'inference ecrit en FORTRAN, est relativement grossier.

Seul, un type de meta-regles est admissible, et les traitements relativement specialises, que leur application requiert son

directement inscrit dans les programmes constituant le moteur d'inference.

HIERARCHISATION DES SAVOIRS ET DES REGLES

inscription	META-SAVOIR	SAVOIR	OBJET -RESEAU
fichiers	bloc de meta-regles	blocs de regles	base de faits
programmes	moteur d'inference	simulation	

Schema 15

Exemple de meta-regles :

```
( H9 = OVF)          ->(P2WASTOO LOW)(STRAF =R 5.0)
(ZURUK =R 30)
```

LORSQUE le limnimetre No 9 depasse le seuil de debordement,  
ALORS

- la pompe P2 a ete activee a un niveau trop bas
- la punition (die STRAFE) des regles, ayant regule P2 a un niveau insuffisant, est calcule a partir de la valeur initiale STRAF (decroissance de 5% . STRAF a chaque remontee d'un pas de temps de pilotage).
- l'interval de scrutation dans la memoire de decisions (DECISION MEMORY = (DECMEM)) vaut 30 minutes a compte de l'instant t d'application de la (meta-)regle, ( intervalle t-30mn,t ).

Dans le prototype realise a BREMEN, environ 20 regles d'evaluation et diagnostic ont ete ecrites qui correspondent aux deficiences, les plus graves.

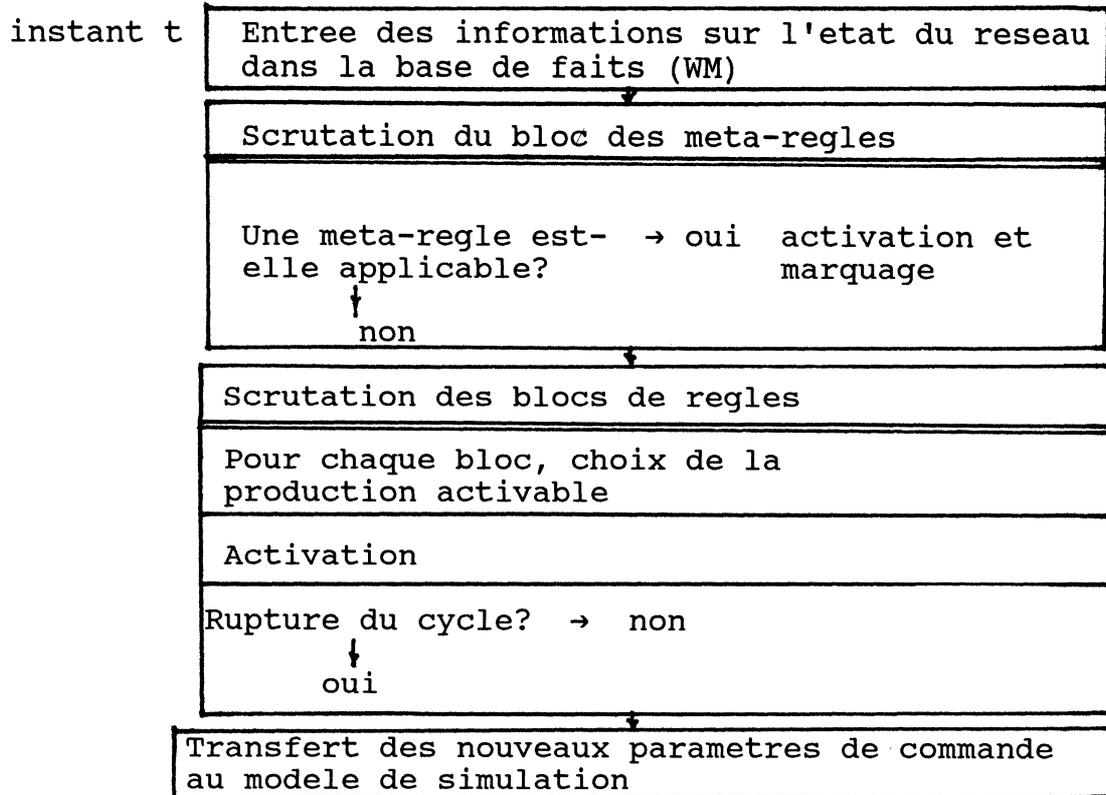
Ces deficiences correspondent a :

- une constatation de debordement dans le reseau alors que la capacite de stockage du reseau et celle de refoulement des pompes ne sont pas epuisees, dans cette meme partie du reseau.
- une decharge dans le milieu exterieur, alors qu'aucun debordement n'a eu lieu.
- une utilisation exageree des pompes conduisant a depasser les pics mensuels de consommation d'energie alors que ni debordement, ni decharge n'a ete constate sur la partie correspondante du reseau.

### III) MISE EN OEUVRE DES PRODUCTIONS D'EVALUATION ( LES META-REGLES).

A l'ancien algorithme de pilotage (presente dans un chapitre anterieur) est ajoutee la partie, consistant a verifier si des meta-regles sont applicables - contrairement aux regles, une meta-regle n'est applicable que si toutes ses premisses sont verifiees -.

#### NOUVEL ALGORITHME DE PILOTAGE



Schema 16.

Supposons qu'au pas de temps  $t_0$ , la meta-regle suivante soit applicable:

( H9 = OVR)                    ->        (P1WASTOO LOW)(STRAF = 5.0)  
(ZURUK = 30)

Pour chaque pas de temps de pilotage, situe entre  $t-30mn$  et  $t$ , on opere les traitements suivants :

1) Construction de l'arbre des decisions par scrutation de la memoire des decisions ( renfermant entre autres, la liste des regles qui ont ete actives a chaque pas de pilotage ).

A chaque pas, la regle qui a conduit a definir la regulation sur la pompe P1 est detectee.

2) Si la regle en question, induit une regulation qui peut etre amelioree du point de vue du diagnostic, elle est punie.

Dans le cas d'exemple, cela signifie que si la regle en question ne determine pas une regulation de la pompe P1 au niveau maximum, elle est punie.

La punition consiste a soustraire au compte qui lui est associe, une certaine somme se montant a  $(STRAF).(t_0-t_{k-1}).(0.05)$ .

$t_k$  est le pas de temps d'activation de la regle a punir.

Des tests ont été effectués sur des bases de règles, auxquelles il avait été ajouté des règles complètement absurdes sciemment. Le système muni de sa base de méta-règles, a été capable de discriminer les règles inadéquates et a redéfini ses priorités de sélection ( utilisation du concept d'efficacité moyenne ) de manière à les exclure.

#### IV) EXEMPLE D'APPLICATION.

On reprend l'exemple donne precedemment, de pilotage d'un bassin versant comportant un bassin de retention et une station d'epuration.

On rappelle les sept regles utilisees :

```
( H<=R 0.5)      ->      ( H = LOW)
( H >R 0.5)( H<=R 1.0)  ->      ( H = HIGH)
( H >R 1.0)      ->      ( H = OVR)
( H = LOW)       ->      ( P = OFF)
( H = HIGH)      ->      ( P = ON)
( P = ON)        ->      ( ENDE = TRUE)
( P = OFF)       ->      ( ENDE = TRUE)
```

#### INTRODUCTION DES META-REGLES

```
( H = OVR)      ->      ( PWASTOO LOW)(STRAF =R -1)
(ZURUK =R 15)
```

On suppose que le debordement a l'emplacement du limnimetre, est du a l'incapacite de la pompe d'evacuer, plus de debit, vers le bassin de retention.

Supposons que :

au pas de temps de pilotage  $t$ , un debordement est constate, le niveau limnimetrique est 1.1 et l'intensite pluviometrique est 10 mm/h.

En base de faits (WM) , sont inscrites en langage code, les informations suivantes :

```
( H =R 1.1)
( H = OVR)
( R =R 10.0)
```

Une evaluation de ces resultats est effectuee ie les conditions d'application de la meta-regle sont verifiees.

Dans notre cas la verification est positive, la regle est activee. La base de faits (WM) est modifiee .

```
( H =R 1.1)
( H = OVR)
( R =R 10.0)
( PWASTOO LOW)
(STRAF =R -1)
(ZURUK =R 15)
```

Le traitement suivant consiste a rechercher sur les 3 derniers intervalles de temps de pilotage  $\Delta t$  ( $\Delta t=5$  mn), quelles regulations ont ete decide sur la pompe P . Le systeme scrute les 3 derniers blocs d'enregistrement, en memoire des decisions (DECMEM) .

Supposons que la memoire des decisions contiennent les informations suivantes :

Pas de temps	Base de faits reconstituee	Suite des regles activees
t-3	( H =R 0.4) ( R =R 10.)	1; 4; 6;
t-2	( H =R 0.6) ( R =R 11.)	2; 5; 7;
t-1	( H =R 0.8) ( R =R 12.)	2; 5; 7;

Seul au pas de temps t-3, une regle est activee (la regle numero 4), qui regule P a l'etat OFF. Cette regle est punie. Elle paie une amende correspondant a la valeur (STRAF).(t-tk-1).(0.05)  
 $= (-1).(2).0.05 = -0.1$

L'activation de la meta-regle est achevee. Le traitement evaluation de strategie est acheve.  
 Les blocs de regles de pilotage sont actives.

## V) DEVELOPPEMENT AUTOMATIQUE DE NOUVELLES REGLES.

L'evaluation des regles n'est pas suffisante. Il faut, de plus, posseder (stocker) des informations sur l'etat du reseau, au moment ou les defections sont constatees.

On peut ainsi, effectuer des statistiques sur l'etat du reseau, en periode d'insuffisance et critiquer la pertinence des parametres qui ont effectivement ete introduits dans les regles de pilotage.

Pour ce faire, a chaque bloc de regles de pilotage est affecte un ensemble de parametres d'etat du reseau, susceptibles de jouer un role dans la resolution du sous-probleme correspondant au bloc.

Chaque fois qu'une regle  $P_i$  d'un bloc  $B_j$  est punie, les valeurs de tous les parametres d'etat associes au bloc  $B_j$  sont stockees dans un tableau sequentiel note PAWETA ( Parameter Werte Tabelle = Tableau des valeurs des parametres ). Ce tableau fait office de memoire des punitions.

Dans ce tableau, sont stockes :

- le numero de la regle punie
- la valeur de la punition
- le numero de la meta-regle utilisee
- la valeur des parametres  $B_j$ -associes.

Dans le cas, ou la place memoire, reservee au tableau PAWETA est insuffisante, les informations correspondant a l'occurrence de punition minimale, sont perdues .

Apres chaque evenement, la memoire des punitions PAWETA est relue, selon l'algorithme suivant :

- Choix d'une regle de pilotage  $P_j$  et estimation de la somme totale des amendes infligees.

- Si la somme des amendes reste inferieure a un certain seuil, le traitement est interrompu, on passe a la regle suivante.  
sinon,

- Estimation de l'esperance mathematique et de la variance des parametres d'etat associes.

- Developpement d'une nouvelle regle a partir de la regle deficiente  $P_i$  .

α) On reprend la partie conditions de la regle  $P_i$  .

β) On definit une nouvelle condition a partir du parametre de plus petite variance  $x_j$  , condition du type (  $x_j \geq \text{val}(x_j)$  ) ou  $\text{val}(x_j)$  est la valeur moyenne de  $x_j$  lorsque  $P_j$  est punie.

Les deux seuls operateurs possibles, sont  $\leq$  ou  $\geq$  . Le choix depend d'informations supplementaires sur le sens de variation du parametre dans le contexte du sous-probleme.

γ) La nouvelle condition est prise en compte de maniere a ce que les premisses correspondant a la nouvelle regle soient plus restrictives et tout en restant coherentes.

Notamment, au cas ou le parametre  $x_j$  n'est pas deja pris en compte dans  $P_i$ , le traitement consiste a ajouter, purement et simplement, la nouvelle condition, a l'ensemble existant.

δ) On reprend la partie action de la regle  $P_i$  et l'on modifie (augmente ou soustrait, selon le diagnostic donne par la

meta-regle ), le niveau de regulation qu'elle determine pour l'organe .

- On efface du tableau memoire des punitions ( PAWETA), toutes les informations qui ont ete utilisees .

- On attribue a la nouvelle regle un credit initial ( normalement 0).

Le probleme de la coherence de la nouvelle de regle, n'est pris en compte qu'au niveau individuel. On s'assure que les nouvelles regles ne comportent pas de conditions contradictoires.

Pour ce qui est de la completude, le probleme reste resolu de la meme maniere, a savoir, une regle de pilotage peut etre declenchee alors que ses premisses ne sont remplies qu'entre 50% et 100%.

Les operations consistant a collecter l'experience pour la redefinition de nouvelles regles, necessite une place memoire importante et les resultats sont d'autant meilleurs que l'experience sur la regle a modifier est grande (la regle a ete punie un grand nombre de fois avant d'etre modifiee).

De plus, le temps necessaire au calculateur pour reconstruire la base de faits est important.

## VI) EXEMPLE DE DEVELOPPEMENT DE NOUVELLES REGLES.

On reprend notre exemple de pilotage du reseau comportant un bassin versant, comportant en exutoire, une station d'epuration et un bassin de retention alimente par une pompe .

Les deux premieres etapes sont effectuees :

- Elaboration des regles de pilotage
- Elaboration des regles d'evaluation.

Supposons qu'au pas de temps t, la situation soit la suivante. En fichier memoire-punition PAWETA, la regle 4 a ete plusieurs fois punie.

On rappelle que la regle 4 s'ecrit :

( H = LOW) -> ( P = OFF)

Soit :

Lorsque le niveau d'eau est faible, la pompe reste a l'arret.

Valeur des punitions	valeur des parametres associes	
	H	R
-1.5	LOW	9.
-0.5	LOW	10.
-3.0	LOW	8.
-5.0	LOW	11.

Or il apparait que, chaque fois que la regle est fautive, le niveau d'intensite est eleve. La nouvelle regle enonce donc que, bien que le niveau d'eau soit bas, si l'intensite est elevee la pompe doit etre mise en marche.

On reprend, la partie premisses de l'ancienne regle (4).

On introduit la condition sur le parametre supplementaire .

Le choix de l'operateur de comparaison approprie ( >= ou <= ) est effectuee par le moteur d'inference lui-meme, qui relit dans un fichier special, les concordances de variation entre parametres.

Le systeme sait donc, que dans ce cas, plus il pleut, plus la pompe doit etre regulee a un niveau eleve ie l'oeprateur de comparaison est >= .

La valeur-seuil choisie pour le nouveau parametre, est son esperance mathematique ( ponderation par les valeurs de punition).

Soit :

$$( (9 \cdot 1,5) + (10 \cdot 0,5) + (8 \cdot 3) + (11 \cdot 5) ) / ( 1,5 + 0,5 + 3,0 + 5,0 ) = 9,75 .$$

La nouvelle regle s'ecrit donc :

( H = LOW) ( R >= R 9.75) -> ( P = ON)

La regle (4) a le credit VALUE = -10 (somme des punitions) ; la nouvelle regle (8) se voit donner le credit VALUE = 0.

En cas de conflit la nouvelle regle a la priorite, tant que son credit (lors de la premiere utilisation) puis son efficacite moyenne ( VALUE/WIEOF) reste superieure a ceux de la regle (4).

## VII) EFFACEMENT DES REGLES DE PILOTAGE

La memoire dans laquelle sont stockees les regles, n'etant pas illimitée, il faut decider d'une methode selon laquelle il est procede a l'elimination des regles " les moins desirables" . Lorsque la memoire disponible dans la base de regles ( tableau memoire des productions (PRDMMEM), contenant l'ensembles des regles codees ) est epuisee, un dixieme des regles sont effacees.

Le critere de choix de ces regles a effacees ( qui ne peuvent etre que des regles de pilotage et jamais des meta-regles) est le suivant :

$$W = ( WIEOF \cdot HERKU / ALT)$$

- WIEOF = Wie oft = frequence d'utilisation.

- HERKU = Herkunft = Origine .

Ce parametre sert a distinguer les regles rentrees par l'expert de celle construites par le systeme.

- Pour les regles implementees automatiquement, HERKU prend la valeur 1;

- pour les autres HERKU est rentre directement et depend de l'importance que l'expert attache a la regle ( plus il considere que la regle est importante plus HERKU est donne grand, moins la regle est susceptible d'etre eliminee).

- ALT = Alter = age

(WIEOF/ALT) est la frequence moyenne d'utilisation dans un intervalle de temps, unite.

L'expert peut attribuer a un regles un age infini. Dans ce cas, il s'assure qu'elle ne sera pas eliminee ( concept de regle "immemoriale" ).

Les regles dont W est minimal sont eliminees.

## VIII) CONCLUSION

Trois plans de savoir (gnoseologiques) ont été distingués :

- Un savoir factuel (stocké en fichier note base de faits ou mémoire de travail WM).
- Un savoir de règles (stocké en fichier note base de règles ou mémoire de productions PRDMMEM).
- Un savoir procédural (stocké dans les algorithmes de traitements eux-mêmes, dont l'ensemble forme le moteur d'inférence).

La base de faits, contient les paramètres de description du réseau indispensables pour décider d'une stratégie, au pas de temps courant .

La stratégie décidée, par le système (les valeurs des paramètres de commande), est elle-même stockée en base de faits.

Il existe d'autre part, un autre fichier (appelé mémoire des décisions DECMEM), qui permet, entre autres, de reconstruire la base de faits, à n'importe quel pas de temps, avant l'utilisation de telle ou telle règle.

La base de règles se décompose en deux parties :

- les règles de pilotage (modifiables par le système)
- les règles d'évaluation ou méta-règles (non modifiables par le système).

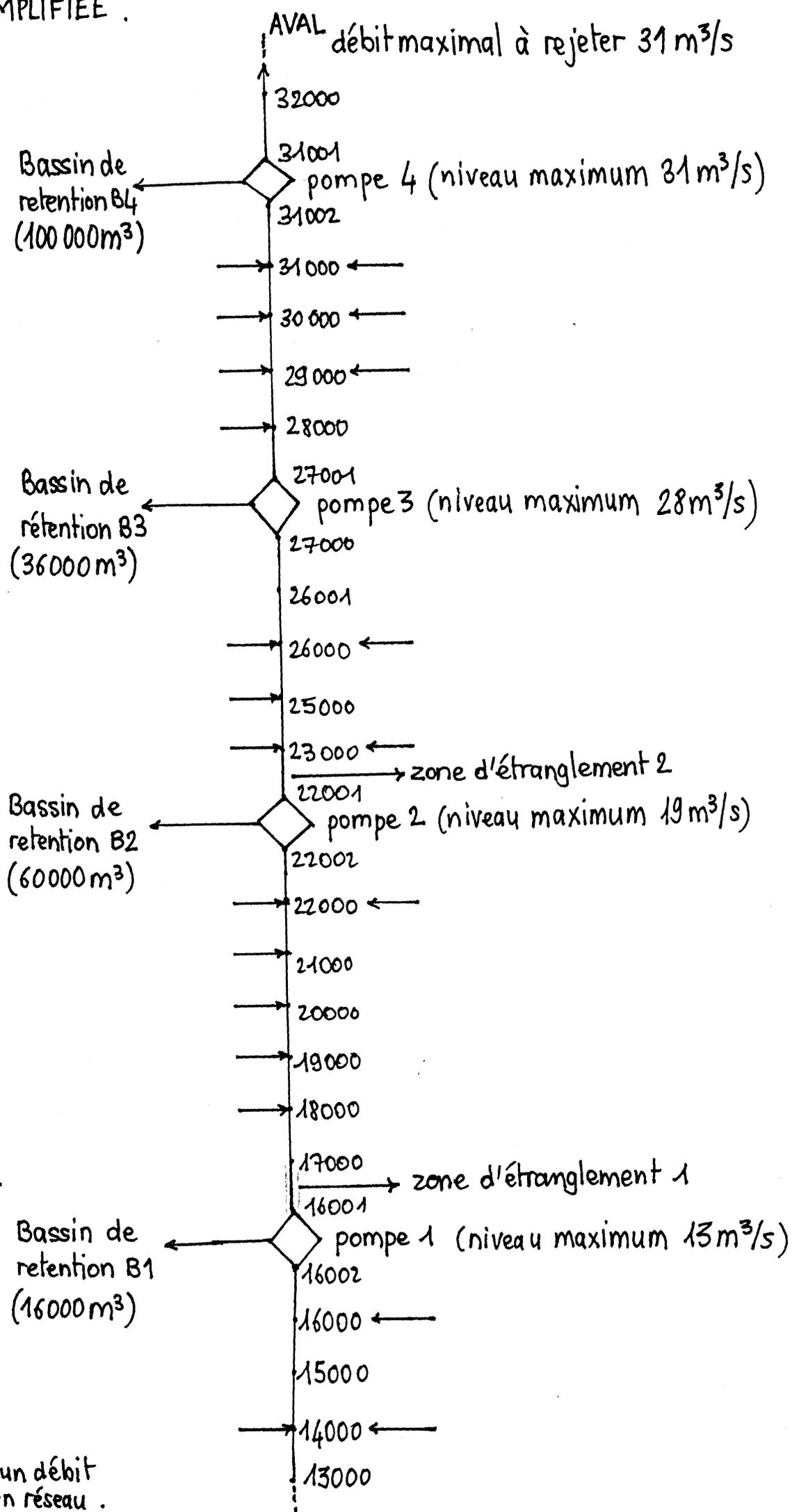
Le moteur d'inférence est écrit en langage FORTRAN et ne peut pas, bien entendu être modifié par le système lui-même.

Étant donné les difficultés rencontrées pour établir la communication avec le modèle de simulation, il n'a pas été possible d'écrire des programmes, reproduisant des processus de pensée aussi généraux qu'il serait souhaitable, pour permettre un transfert du système, au pilotage d'un autre réseau, par simple modification de la base de faits et de règles.

De plus, aucune tentative n'a été faite de produire un outil d'évaluation des méta-règles elles-mêmes ; il s'agirait, dans ce cas, d'un méta-savoir du second degré, ou méta-méta savoir.

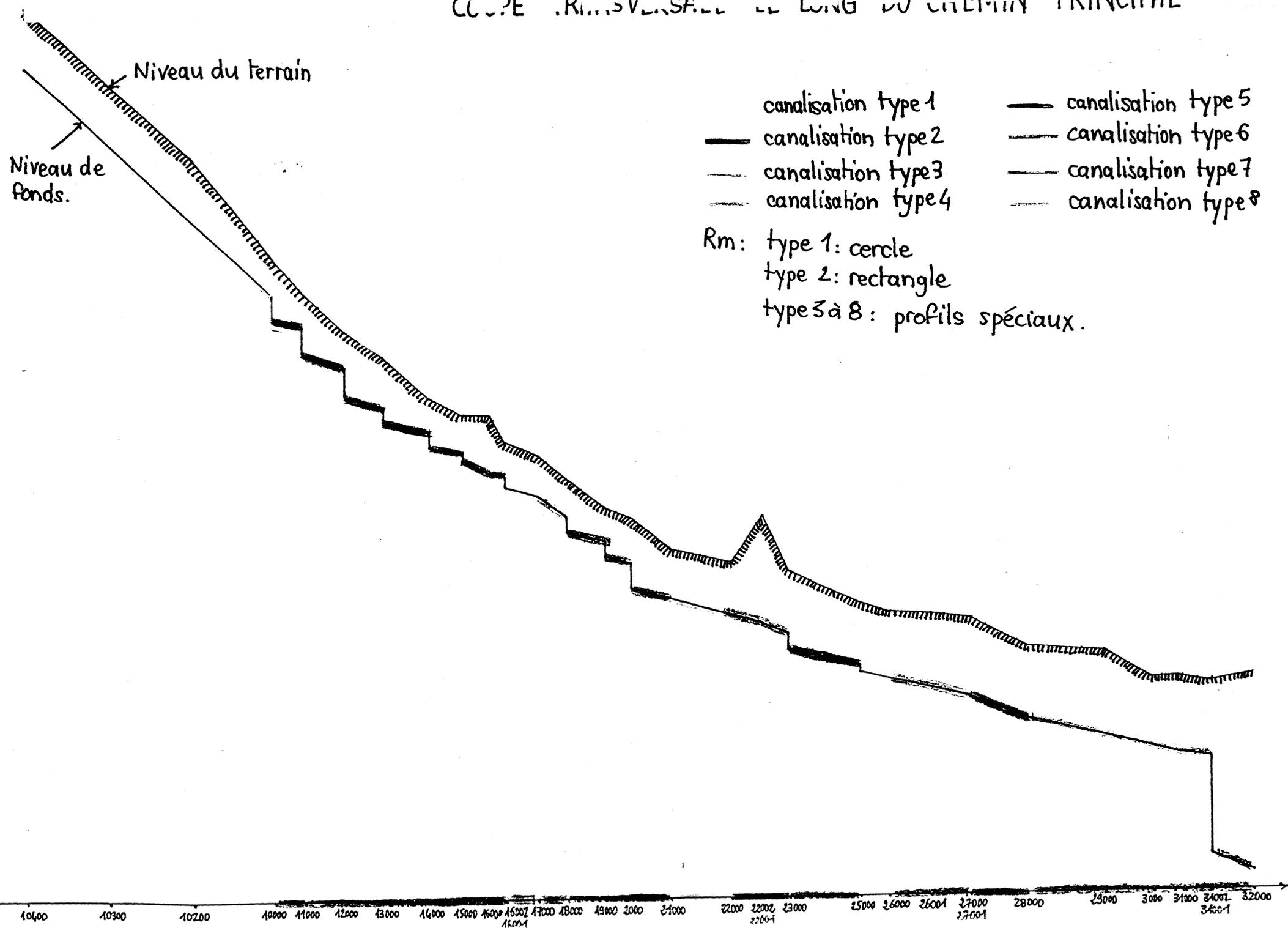
**ANNEXE 2**

DESCRIPTION SIMPLIFIEE .



→ : indique un débit entrant en réseau .

# COUPE TRANSVERSALE LE LONG DU CHEMIN PRINCIPAL



Niveau du terrain

Niveau de  
Fonds.

- canalisation type 1
- canalisation type 2
- canalisation type 3
- canalisation type 4
- canalisation type 5
- canalisation type 6
- canalisation type 7
- canalisation type 8

Rm: type 1: cercle  
 type 2: rectangle  
 type 3 à 8: profils spéciaux.

10400 10300 10200 10000 11000 12000 13000 14000 15000 16000 17000 18000 19000 20000 21000 22000 23000 24000 25000 26000 27000 28000 29000 30000 31000 32000

# Description des types de canalisation utilisés.

Les profils spéciaux: types 3, 4, 5, 6, 7, 8

La section est découpée en 26 parties, pour chacune desquelles les valeurs de largeur, surface et rayon hydraulique sont données.

## SONDERPROFIL TYP/KLASSE 3

		HOEHE												BREITE	FLAECHE	HYDR. RADIUS
		3.15												3.36	7.092	1.354
PROFILWERTE IN SCHRITTEN VON 4% DER HOEHE:																
BREITE *	.01	.04	1.22	1.54	2.00	2.28	2.00	2.31	3.36	3.33	3.29	3.26	3.20			
		3.13	3.04	2.94	2.82	2.71	2.54	2.38	2.19	1.98	1.65	1.38	.91	.00		
FLAECHE *	.000	.078	.163	.342	.579	.856	1.094	1.370	1.794	2.116	2.633	3.046	3.452			
		3.848	4.235	4.611	4.974	5.320	5.652	5.962	6.247	6.497	6.714	6.899	7.039	7.092		
HYDR. RADIUS *	.001	.154	.227	.369	.494	.630	.713	.780	.757	.888	1.000	1.109	1.201			
		1.277	1.343	1.393	1.434	1.467	1.494	1.513	1.524	1.520	1.509	1.492	1.441	1.354		

## SONDERPROFIL TYP/KLASSE 4

		HOEHE												BREITE	FLAECHE	HYDR. RADIUS
		4.50												15.50	35.380	3.880
PROFILWERTE IN SCHRITTEN VON 4% DER HOEHE:																
BREITE	.01	.54	1.08	1.62	2.16	2.70	3.24	3.78	4.32	4.86	5.40	5.94	6.48			
		9.02	9.56	10.10	10.64	11.18	11.72	12.26	12.80	13.34	13.88	14.42	14.96	15.50		
FLAECHE	.000	.049	.194	.437	.780	1.215	1.750	2.380	3.110	3.940	4.860	5.880	7.320			
		8.890	10.560	12.330	14.200	16.170	18.220	20.380	22.640	24.990	27.440	29.990	32.630	35.380		
HYDR. RADIUS	.001	.141	.290	.440	.590	.740	.890	1.050	1.200	1.350	1.500	1.650	1.500			
		1.700	1.910	2.100	2.290	2.480	2.660	2.850	3.020	3.200	3.370	3.540	3.710	3.880		

## SONDERPROFIL TYP/KLASSE 5

		HOEHE												BREITE	FLAECHE	HYDR. RADIUS
		3.00												11.00	16.500	1.810
PROFILWERTE IN SCHRITTEN VON 4% DER HOEHE:																
BREITE	.01	.36	.72	1.08	1.44	1.80	2.16	2.52	2.88	3.24	3.60	3.96	4.32			
		6.68	7.04	7.40	7.76	8.12	8.48	8.84	9.20	9.56	9.92	10.28	10.64	11.00		
FLAECHE	.000	.021	.086	.196	.346	.530	.770	1.060	1.380	1.750	2.160	2.610	3.110			
		3.770	4.590	5.460	6.370	7.320	8.320	9.360	10.440	11.560	12.700	13.950	15.200	16.500		
HYDR. RADIUS	.001	.060	.130	.190	.260	.330	.400	.470	.530	.600	.670	.730	.800			
		.720	.830	.930	1.030	1.120	1.220	1.400	1.450	1.480	1.520	1.650	1.730	1.810		

.Breite = largeur

.Fläche = surface

.Hydr. radius = rayon hydraulique

SONDERPROFIL TYP/KLASSE 3

		HOEHE												BREITE	FLAECHE	HYDR. RADIUS
		3.15												3.36	7.092	1.354
PROFILWERTE IN SCHRITTEN VON 4% DER HOEHE:																
BREITE	.01	.84	1.22	1.54	2.00	2.28	2.00	2.31	3.36	3.33	3.29	3.26	3.20			
		3.13	3.04	2.94	2.82	2.71	2.54	2.38	2.19	1.98	1.65	1.38	.91	.00		
FLAECHE	.000	.078	.163	.342	.579	.856	1.094	1.370	1.794	2.116	2.633	3.046	3.452			
		3.848	4.235	4.611	4.974	5.320	5.652	5.962	6.247	6.497	6.714	6.899	7.039	7.092		
HYDR. RADIUS	.001	.154	.227	.369	.494	.630	.713	.780	.757	.688	1.000	1.109	1.201			
		1.277	1.343	1.393	1.434	1.467	1.494	1.513	1.524	1.520	1.509	1.492	1.441	1.354		

SONDERPROFIL TYP/KLASSE 4

		HOEHE												BREITE	FLAECHE	HYDR. RADIUS
		4.50												15.50	35.380	3.880
PROFILWERTE IN SCHRITTEN VON 4% DER HOEHE:																
BREITE	.01	.54	1.08	1.62	2.16	2.70	3.24	3.78	4.32	4.86	5.40	5.94	6.48			
		9.02	9.55	10.10	10.64	11.18	11.72	12.26	12.80	13.34	13.88	14.42	14.96	15.50		
FLAECHE	.000	.049	.194	.437	.780	1.215	1.750	2.380	3.110	3.940	4.860	5.880	7.320			
		8.890	10.560	12.330	14.200	16.170	18.220	20.380	22.640	24.990	27.440	29.990	32.630	35.380		
HYDR. RADIUS	.001	.141	.290	.440	.590	.740	.890	1.050	1.200	1.350	1.500	1.650	1.500			
		1.700	1.910	2.100	2.290	2.480	2.660	2.850	3.020	3.200	3.370	3.540	3.710	3.880		

SONDERPROFIL TYP/KLASSE 5

		HOEHE												BREITE	FLAECHE	HYDR. RADIUS
		3.00												11.00	16.500	1.810
PROFILWERTE IN SCHRITTEN VON 4% DER HOEHE:																
BREITE	.01	.36	.72	1.08	1.44	1.80	2.16	2.52	2.88	3.24	3.60	3.96	4.32			
		6.66	7.04	7.40	7.76	8.12	8.48	8.84	9.20	9.56	9.92	10.28	10.64	11.00		
FLAECHE	.000	.021	.086	.196	.340	.530	.770	1.060	1.380	1.750	2.160	2.610	3.110			
		3.770	4.590	5.460	6.370	7.320	8.320	9.360	10.440	11.560	12.700	13.950	15.200	16.500		
HYDR. RADIUS	.001	.060	.130	.190	.260	.330	.400	.470	.530	.600	.670	.730	.800			
		.720	.830	.930	1.030	1.120	1.220	1.400	1.450	1.480	1.520	1.650	1.730	1.810		

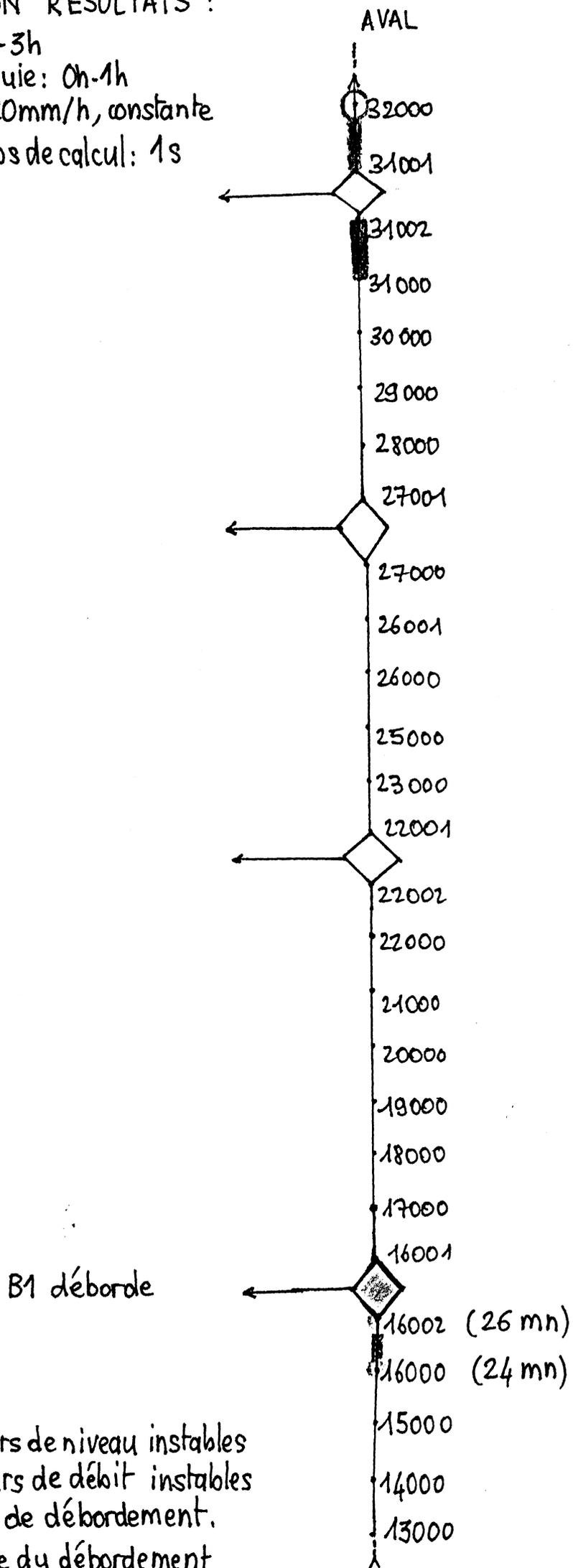
**SIMULATION RESULTATS :**

Jurée : 0h-3h

Durée de pluie : 0h-1h

Intensité : 20mm/h, constante

Pas de temps de calcul : 1s



- ⊙ : valeurs de niveau instables
- ▮ : valeurs de débit instables
- : point de débordement.
- ( ) : durée du débordement

**ANNEXE 3**

## EXEMPLE DE REGLES DE PILOTAGE SUR LE RESEAU DU BORBECKERMÜHLENBACH

### HYPOTHESES DE TRAVAIL :

- Le reseau possede les quatre bassins de retention qui sont prevus, numerotes de 1 a 4 a partir de l'amont ( B1, B2, B3, B4 ).

- En realite, les debits d'entree et de sortie sont regules par des vannes ou des seuils , dont le fonctionnement n'est pas modelise .

La simulation opere selon un principe deja explique dans le chapitre " description du reseau ".

Le troncon sur lequel le bassin Bi se greffe, est suppose coupe en une partie-amont et une partie-aval, reliees par une pompe Pi . Cette pompe commande les debits refloues a l'aval, selon son niveau d'utilisation .

Si les debits en amont sont superieurs a la capacite donnee de la pompe, le remplissage des bassins est opere.

- Une veritable recherche de strategie, n'est realise que sur le bassin de retention B2.

Cela signifie que pour les bassins B1,B3,B4, un seul niveau d'utilisation est defini qui correspond a la capacite maximale admissible de la pompe correspondante (P1,P3,P4).

La capacite maximale admissible est definie en fonction soit des contraintes sur le reseau ( P1, P2 ), soit des objectifs fixes (P3, P4 ).

On suppose que la pompe correspondante P2 est susceptible de regulation suivant 4 niveaux differents , ce qui devrait permettre de definir " une politique de remplissage du bassin ".

Remarque :

Le moteur d'inference tel qu'il est concu, suppose que les pompes sont regules par niveaux, dont le nombre maximal est 4.

Par la suite, il est prevu, de modifier le moteur d'inference de telle sorte qu'il prenne en compte un plus grand nombre de niveaux ou meme qu'il permette de choisir une regulation continue de la pompe.

Tableau des niveaux d'utilisation des pompes (en m3/s) :

Pompes	niveau 1	niveau 2	niveau 3	niveau 4
P1	13	-	-	-
P2 essai1	2	10	19	25
P2 essai2	2	7	13	19
P3	28	-	-	-
P4	31	-	-	-

### EXEMPLES DE REGLES DE PILOTAGE DE LA POMPE P2

1) les regles de pilotage locales

Variables utilisees :

P2 : niveau d'utilisation de la pompe 2 (1,2,3,4)

H2 : niveau d'eau dans le bassin B2

Le principe sous-jacent est simple, remplissage du bassin au maximum, tant que sa capacite le permet .

( H2 = OVR) -> ( P2 = 3)  
 ( H2 = HIGH) -> ( P2 = 2)  
 ( H2 = MID) -> ( P2 = 1)  
 ( H2 = LOW) -> ( P2 = 0)

## 2) Prise en compte de l'intensite pluvieuse.

Les variables supplementaires sont:

R1 : intensite pluvieuse en amont du bassin versant

R2 : intensite pluvieuse en aval du bassin versant .

H4 : niveau dans le bassin B4

Le principe sous-jacent, consiste a partir des intensites pluvieuses, a anticiper les valeurs de debits en amont et aval du reseau et agir sur la bassin B2 en consequence.

( R2 = HIGH)( R1 = LOW) -> ( P2 = 0)  
 ( R2 = LOW)( R1 = HIGH)( H4 < HIGH) ->  
 ( P2 = 3)  
 ( R2 = LOW)( R1 = HIGH)( H4 >= HIGH) ->  
 ( P2 = 1)  
 ( H2 <= HIGH)( R1 = MID)( R2 = LOW) ->  
 ( P2 = 2)  
 ( H2 <= HIGH)( R1 = LOW)( R2 = MID) ->  
 ( P2 = 1)

## 3) prise en compte des debits en amont du reseau

Meme principe qu'en 2).

Variables prises en compte :

Q12 : valeurs du debit a la jonction no 12000

( Q12 = LOW) -> ( P2 = 1)

## 4) prise en compte des niveau de remplissage dans les autres bassins

Le principe consiste a restreindre les flux en direction de l'aval, lorsque les bassins en aval ( notamment B4 ) sont remplis.

( H4 = LOW) -> ( P2 = 3)  
 ( H4 >= HIGH) -> ( P2 = 0)  
 ( H4 = MID) -> ( P2 = 2)

Certaines des regles se contredisent presque. D'autres sont presque redondantes.

Mais, dans la mesure ou le systeme est capable, au cours de son experience, de discriminer entre les " bonnes " et les "mauvaises" regles , il n'est pas necessaire de rechercher la plus grande coherence possible du noyau initial.

Au contraire, l'important est de laisser au maximum, le champ ouvert pour une action efficace du module d'apprentissage.

Cela signifie, en particulier, rentrer le plus possible de regles relevant de principes de pilotage differents, meme si elle peuvent parfois se contredire.

Le systeme fera le tri.

#### EXEMPLES DE META-REGLES

( H2 >= HIGH) ( P2 <= 3) -> (P2WASTOO LOW)  
( H4 >= HIGH) ( P2 >= 1) -> (P2WASTOO HIGH)

**ANNEXE 4**

BUY JACQUET'S VISIT (16.07.67)  
COMPTES-RENDUS OF DISCUSSION

## 1) SOME PRELIMINARIES

1.1) IMPLICATIONS OF THE CHARACTERISTICS OF THE EXPERT-SYSTEM ON THE GENERAL ARCHITECTURE OF THE CONTROL MODULE.

DESCRIPTION OF A COMPUTER AIDED SUPERVISORY SYSTEM (as it was designed in the SEINE-ST-DENIS project).

This one is based upon the distinction between two control levels.

### 1) THE CENTRAL COMPUTER :

After reception of the information, about the state of the network (simulation results, measurement gauges, detected failures ...), and analyse (the taking into account the eventual reciprocal influences of the control elements within the catchment area) , it chooses the control (central) strategy to be followed .

### 2) THE LOCAL INTELLIGENCES

-Each one collects measurement data about the network and sends it to the central computer .  
-It receives control instructions from the central computer and makes them be applied by the control organs .  
-Furthermore, when no central strategy is available, it is able itself to select a local strategy (based upon the locally collected information data).

THE EXPERT-SYSTEM for research of control strategies which was DESIGNED IN THE BREMEN PROJECT, IS NOT A COMPUTER AIDED SUPERVISORY SYSTEM - The distinction between the 2 levels is not made -

It should better be described as a system for would-be fully automatic strategy research and application .  
Subsequently, IT SHOULD EMPHASIZE ON THE SAFETY ASPECTS, that should get a greater priority than the optimal use of the control system ie the system should be able to properly handle in case of failures (measurement failures, power supply cut off, ...)

IN THE BREMEN PROJECT, THE SYSTEM WAS ONLY REALISED, TESTED AND COMPARED IN CASE NO FAILURE OCCURS .

Theoretically ,in this ideal case, the results obtained by the expert-system should be better than the ones obtained by a manual control of the network.

- the first set of rules should correspond to the rules actually used by the operators. In addition, a learning process operates along with the use of the system, and allows to modify the rules when they reveal not to be proper.-

Bremen system tests on several strong events, in the last few

years, have confirmed this fact and even proved the system to give as good results as an optimisation method.

The work planning is divided in 3 parts:

1) Description of the expert-system that was set up for the BREMEN catchment control specially the main concepts to explain what is meant here as 'LEARNING PROCESS'. (already done).

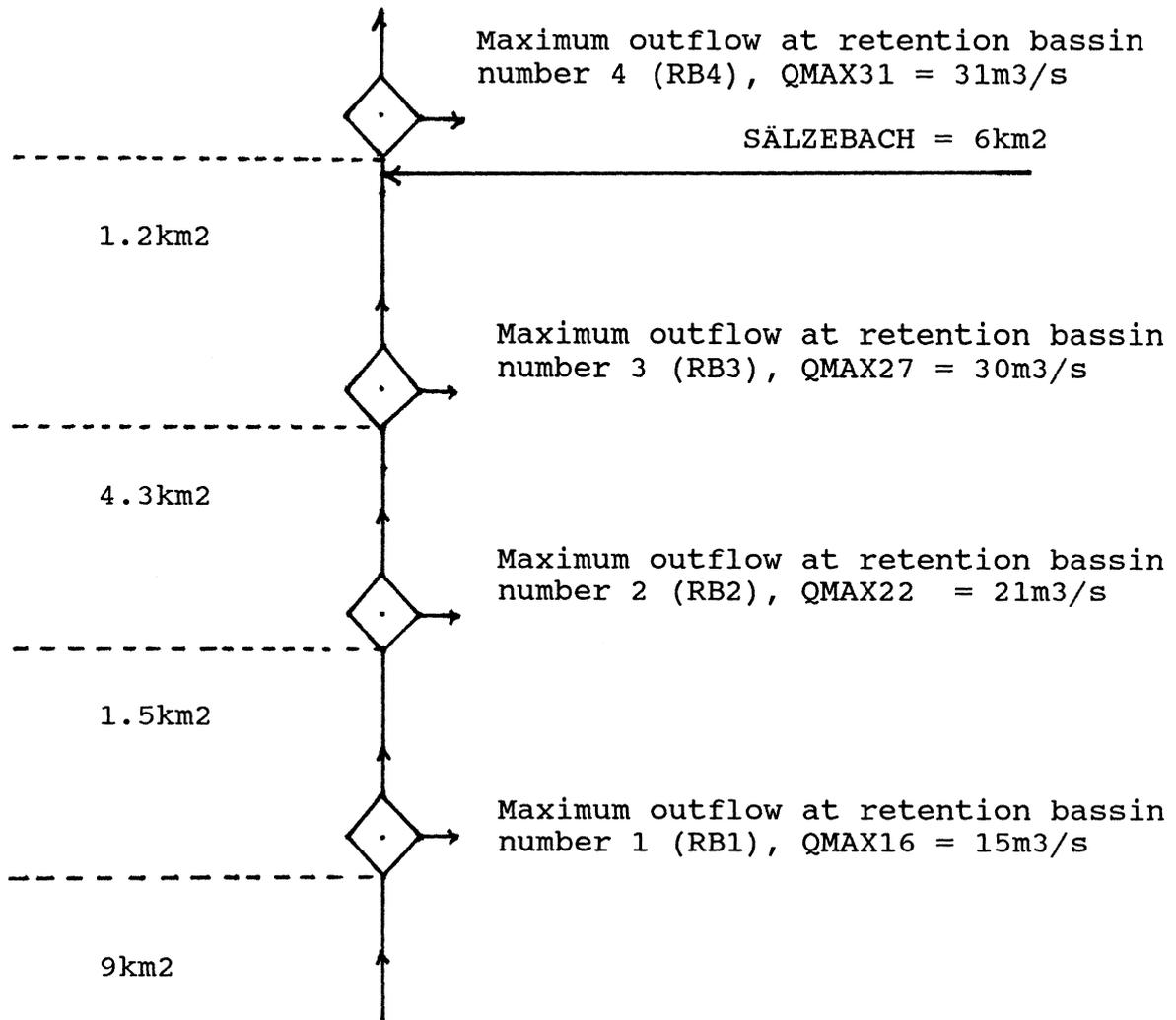
2) Transposition for application to the BORBECKERMÜHLENBACH catchment area, first assuming that no failure should occur in measurement data nor in control gauges. (is currently being done).

This contains :

- a description of the catchment area
- a setting up the control rules
- a setting up the 'meta-rules' for analysing the results and modifying the rules which are identified as improper.

3) Studying what should be done to make the system work even if failures occur in the measurement data. (shall be done).

II) DESCRIPTION OF THE SIMPLIFIED NETWORK :



PROPOSED DESCRIPTORS OF THE NETWORK UPON WHICH THE CONTROL RULES SHOULD BE BUILT :

1) *Rainfall intensity measures*  $R_i$ , given by raingage number  $i$  (state variable) .  
 First, is planned to take into account only 2 raingages :  
 The first ( $G_1$ ) is supposed to describe the rainfall event upstream  
 The second ( $G_2$ ) is supposed to describe the rainfall event downstream.

2) *Water level* (measured or calculated) at the entrance of each retention bassin noted  $H_i$ ,  $i$ =number of the corresponding junction (state variable) .

In our case , it follows :

The first retention bassin (RB1) is located in junction 16 (J16)  
 The second retention bassin (RB2) is located in junction 22 (J22)  
 The third retention bassin (RB3) is located in junction 27 (J27)  
 The fourth retention bassin (RB4) is located in junction 31 (J31)

3) *Stored volume* in each retention bassin noted  $V_i$ ,  $i$ =number of the corresponding junction (state variable) .

4) *The outflow values*, that should be taken for each controlled retention bassin  $Q_i$  -  $i$  is the number of the junction where the retention bassin is located -. (control variable)

5) IN ADDITION there could be used :

- *Forecasting information* about the rainfall intensities, especially the assumed value of the peak rainfall intensity  $R_{MAXi}$ ,  $i$  is the number of the gage.

- binary information about the *validity of the parameter values*

For example :

Validity of  $H_i=0$  ,the value is supposed irrelevant.

Validity of  $H_i=1$  , the value is supposed reliable.

EXAMPLE OF RULES THAT COULD BE ENTERED IN THE BASIS OF RULES, ASSUMING THAT THE SECOND RETENTION BASSIN ONLY CAN BE CONTROLLED.

1)  $R_{MAX2} > xx$  --->  $Q_{22}$  as lowest as possible  
 $xx$  is a limit corresponding to a high intensity

2)  $R_{MAX1} > xx$  and  $R_{MAX2} < yy$  —>  $Q_{22}$  as highest as possible  
 $yy$  is a limit corresponding to low intensity

III) REPORT PLAN (The report should not contain more than 12 pages)

I) INTRODUCTION ( some words about the work planning according to the PROCOPE programm ). (1p).

II) SIMPLIFIED DESCRIPTION OF THE LEARNING PROCESS MODULN AS IT WAS CONCEIVED AND REALIZED FOR THE BREMEN PROJECT. (5p).

II.1 Ground principals  
II.2 examples of rules  
II.3 limits

III) SIMPLIFIED DESCRIPTION OF THE NETWORK CHOICED FOR THE NEW PROJECT (THE BORBECKERMÜHLENBACH CATCHMENT AREA) . (3p).

IV) WORK PLANNING. (2/3 p).

V) CONCLUSIONS. (1p).

ANNEXE 1 : TRANSLATION OF NEWMANN'S REPORT (" DIPLOM ARBEIT ").

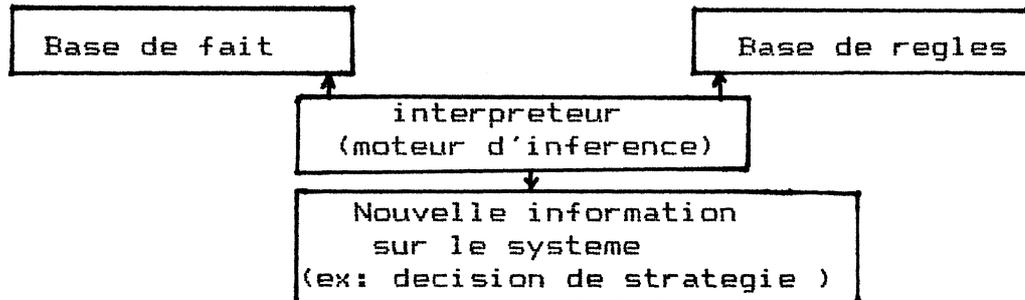
ANNEXE 2 : GRAPHICAL DESCRIPTION OF THE NETWORK.

ANNEXE 3 : EXAMPLES OF SHOULD-BE APPLIED RULES.

**ANNEXE 5**



niveau 3 : Le moteur d'inférence, autrement appelé interpréteur, qui décode la base de règles et définit pour chaque état particulier du système le nouveau savoir ( les conséquences ).



Dans le cas du contrôle de réseau d'assainissement en temps réel, le niveau 1, correspond au savoir des hydrologues urbains, lesquels ont réalisé de nombreux modèles permettant la simulation du fonctionnement du réseau.

Le savoir du niveau 2, correspond au savoir du 'praticien' qui dans les cas réels, propose sa solution et la fait appliquer. C'est le savoir de l'expert qui a donné son nom à la méthodologie.

Par opposition aux méthodes dites d'optimisation, le concept de 'meilleure solution' est abandonné au profit de celui de 'bonne solution' ou de 'solution acceptable'... Aussi bien, les restrictions d'application des méthodes d'optimisation ne permettent pas, en réalité, de définir de manière rigoureuse la 'meilleure solution'.

Par contre, une base de règles, peut contenir sous forme synthétique, un savoir issu de l'expérience et dit intuitif, peut-être difficilement extractible des modèles numériques de simulation du système.

Le savoir de niveau 3, est réservé aux informaticiens et aux logiciens purs, qui s'intéressent aux mécanismes propres mis en jeu dans un processus de raisonnement. Ils définissent les caractéristiques de l'interpréteur.

Voici quelques exemples des questions, qui se posent :

- Raisonnement en chaînage avant, en chaînage arrière,...
  - Comment vérifier la complétude du système de règles ? autrement dit l'ensemble de règles données est-il suffisant pour produire l'information ? Que faire en cas de non complétude ?
  - Comment vérifier la non-contradiction de la base de règles ? Que faire en cas de contradiction ?
  - Utilisation de logique d'ordre 0,1,2 ...
- .....

Cette différenciation du processus de traitement, en différents niveaux, dans lesquels les spécialistes des différentes disciplines conjuguent leurs efforts, est un avantage décisif de cette approche.

Elle renforce notamment la lisibilité du processus de déduction - les règles de production sont formulées explicitement et non 'inscrites'

dans l'écriture des programmes -

Les progres realises dans la conception de moteurs d'inference de plus en plus sophistiques ( utilisation du raisonnement en chainage arriere, utilisation de logiques d'ordre superieur...), associes a une typologie de plus en plus rigoureuse des regles utilisees permettent et permettront, a l'avenir de realiser des systemes-experts de plus en plus performants, et vraisemblablement superieurs aux experts-humains.

Ainsi, les regles introduites dans la base de regles, peuvent non seulement servir a produire une solution mais encore a evaluer les regles utilisees ( strategie satisfaisante, non satisfaisante ) et eventuellement a construire de nouvelles regles.

Ces regles d'evaluation de strategie et construction de nouvelles regles sont appeles des meta-regles.

Les differents niveaux de meta-regles possibles, et la generalite des principes qu'elles traduisent, definissent les capacites d'auto-apprentissage du systeme en fonction de sa propre experience. Actuellement, un gros effort de recherche est fourni dans ce domaine.

A l'IFW, est mis au point un systeme-expert, dans lequel la base de regles comporte des meta-regles d'un type particulier qui assure au systeme une certaine faculte d'adaptation .