

sisippa 89

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED APPROACHES
TO WATER POLLUTION PROBLEMS
SYMPOSIUM INTERNATIONAL SUR DES SOLUTIONS INTÉGRÉES
POUR DES PROBLÈMES DE POLLUTION DE L'EAU
SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SOLUÇÕES INTEGRADAS
PARA PROBLEMAS DE POLUIÇÃO DA ÁGUA

RAISONNEMENT QUALITATIF EN HYDROBIOLOGIE : APPLICATION A L'INTERPRETATION DE DONNEES ET D'OBSERVATIONS.

QUALITATIVE REASONING IN HYDROBIOLOGY : APPLICATION TO DATA AND OBSERVATIONS INTERPRETATION.

François GUERRIN ¹

RESUME

Face à l'insuffisance actuelle de modèles mathématiques pour répondre efficacement aux besoins de gestion à court terme des milieux aquatiques, nous présentons ici un travail basé sur la représentation du raisonnement de l'hydrobiologiste, par nature, qualitatif. La maquette de "système expert" dérivée de cette modélisation est capable de simuler l'interprétation d'un ensemble hétérogène de mesures, analyses et observations effectuées sur une lagune d'épuration d'eaux usées domestiques dont l'effluent est utilisé à des fins aquacoles.

Mots-clés : lagunage, aquaculture, Intelligence Artificielle, raisonnement qualitatif, Prolog.

ABSTRACT

It is well known that efficient mathematical models providing help in short-term management of aquatic ecosystems are not yet available. In this paper, we present a work based on the proper representation of hydrobiologist's reasoning, which is qualitative by nature. The "expert system" prototype derived from this approach can simulate the interpretation of an heterogeneous set of measurements, analysis and observations carried out on an integrated domestic waste-water treatment aquaculture system.

Key-words : waste-water treatment ponds, aquaculture, Artificial Intelligence, qualitative reasoning, Prolog.

¹- DEA d'Ecologie, Ingénieur d'Etudes - Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Station de Biométrie et d'Intelligence Artificielle, Toulouse (France).

1 - INTRODUCTION

Le travail de base de l'hydrobiologiste consiste essentiellement en deux tâches successives :

- recueillir des données sur l'écosystème étudié, à partir de mesures, d'analyses et d'observations pratiquées sur le terrain ou sur des échantillons traités au laboratoire,
- interpréter l'ensemble de ces données pour répondre à un problème posé (connaissance scientifique, étude d'impact, détection de pollution, aménagement piscicole...).

Quelque soit le pas de temps fixé pour l'échantillonnage, les processus continus, internes à l'écosystème, ne peuvent être appréhendés que de façon discrète et externe. La réalité que nous mesurons est donc toute relative. Pourtant, l'interprétation rapide des phénomènes est une obligation, lorsqu'une intervention doit être réalisée par le gestionnaire. *In fine*, l'hydrobiologiste aura la démarche typique d'un "expert", telle qu'elle est décrite par les sciences cognitives, VOGEL (1988) :

- construction progressive de règles de jugement ou d'action par l'expérience personnelle,
- traduction des données disponibles en termes qualitatifs,
- application des règles aux données traduites,
- interprétation (diagnostic, prédiction, choix d'action de contrôle...) subjective, impliquant une prise de décision vis à vis de l'objectif poursuivi.

Cette activité d'interprétation du réel perçu est par nature opérationnelle, car orientée en direction de l'action. Elle est de "haut niveau", car elle intègre une connaissance globale seule capable de simplifier la complexité pour la rendre intelligible et le système sous-jacent contrôlable, RASMUSSEN (1985). Sa modélisation est donc susceptible de pallier dans une certaine mesure le manque de modèles mathématiques qui, dans le meilleur des cas, ne représentent qu'une trop petite fraction de la réalité naturelle pour pouvoir servir de base à sa gestion, VINCENT et SKOWRONSKI (1981). Ceci paraît d'autant plus vrai dans le cas d'écosystèmes à dynamique rapide et à forte instabilité, comme les étangs, CHAHUNEAU et DES CLERCS (1980).

S'agissant de la reproduction d'un raisonnement humain par un modèle informatique, nous nous sommes intéressés aux méthodes de développement de "Systèmes Experts", et plus généralement aux possibilités offertes par la programmation symbolique, BOBROW et STEFIK (1986). L'approche adoptée est inspirée des travaux menés en Intelligence Artificielle dans le cadre de la "Physique Qualitative", KUIPERS (1986), et du "Raisonnement Qualitatif", CALOUD (1988).

Après avoir défini le problème à résoudre, nous présenterons les méthodes employées pour la conception du modèle, et les principales fonctionnalités du logiciel écrit en Prolog, dont il faut préciser qu'il est une maquette de recherche destinée à tester de nouvelles idées pour la modélisation de processus biologiques.

2 - DEFINITION DU PROBLEME

2.1 - Système biologique

L'application traitée est tirée de travaux réalisés il y a quelques années, dont nous avons effectué une synthèse récente, GUERRIN (1988). Le système étudié est constitué par une station d'épuration des eaux usées domestiques par lagunage naturel, où l'on essaye de valoriser par l'aquaculture (larves et juvéniles de Cyprinidés) la production biologique (phyto- et zooplancton). Pour cela deux voies principales ont été testées :

- l'admission directe d'effluent du lagunage dans les bassins de pisciculture,
- la collecte du zooplancton produit dans les lagunes, suivie de sa distribution comme proies vivantes aux poissons.

Dans les deux cas, le jeu consistait à obtenir la production piscicole maximale sans autre apport

alimentaire. Notre expérience nous a confronté aux difficultés du contrôle de ces écosystèmes hautement instables : les fortes biomasses planctoniques déversées dans les bassins à poissons constituent leur unique source alimentaire et favorisent donc leur croissance, mais en même temps induisent des conditions limites de qualité de l'eau, susceptibles de créer des mortalités importantes dans l'élevage. D'autres parts, si l'on observe de très forts pics de production de zooplancton à certaines périodes, ils sont souvent très éphémères. Un élevage basé sur leur exploitation est donc sujet au risque d'une rupture inopinée du stock disponible.

2.2 - Fonctions de base nécessaires au contrôle du système biologique

La personne chargée de la supervision du système a besoin d'effectuer une prévision de son évolution à court terme (une journée à quelques jours). Il est entendu qu'elle ne peut avoir un accès fréquent aux animaux en élevage pour juger de leur état, afin de ne pas les stresser. Il raisonnera donc de façon indirecte à partir de l'ensemble des observations, mesures et analyses, dont il peut disposer à un instant donné. Il lui faudra pour cela choisir les paramètres les plus aptes à refléter l'état du système en fonction de ses objectifs. N'étant pas forcément un hydrobiologiste expérimenté, il doit pouvoir bénéficier de l'explication des phénomènes observés pour l'aider dans sa prise de décision d'intervention.

3 - OBJETS MANIPULES PAR LE RAISONNEMENT

3.1 - Valeurs d'entrée et variables qualitatives du modèle

On distinguera parmi les grandeurs manipulées :

- les valeurs d'entrée : mesure-pH = 6.5 , mesure-NH₄ = 3 mg/L, observ-couleur = vert sombre...
- les variables qualitatives : pH = {faible}, NH₄ = {fort}, couleur = {très fort}...

3.2 - Relations entre variables qualitatives

Quelles sont les inférences élémentaires qui peuvent être faites sur chacune des variables choisies ? Raisonçons sur un exemple simple : si l'on mesure un pH de 9.5 on pourra en déduire qu'il est élevé. Quelle peut en être la cause ? Dans le cas de l'écosystème étudié un pH élevé provient très généralement de la photosynthèse intense qui abaisse d'autant le taux de CO₂ présent principalement sous forme d'acide carbonique. Quelle en sera la conséquence ? Une augmentation de la proportion d'ammoniac non ionisé (NH₃), donc une dégradation de la qualité de l'eau pour le poisson, donc un risque de mortalité accru, donc une baisse de la production piscicole... On a ainsi défini une chaîne de relations causales entre plusieurs variables :

photosynthèse-->CO₂-->pH-->NH₃ -->Qualité de l'eau-->risques de mortalité-->production piscicole.

3.3 - Représentation conceptuelle

3.3.1 - Choix d'un formalisme adapté

Comme pour l'élaboration de modèles mathématiques, la réalisation de diagrammes conceptuels permet de clarifier le problème à traiter, de mettre en évidence des redondances ou des circularités inutiles, JØRGENSEN (1986). Nous n'avons pas employé les formalismes quelquefois utilisés en écologie (diagrammes de Forrester ou Odum) parce que trop orientés en vue d'un traitement quantitatif. Nous avons besoin d'une vue de haut niveau permettant de saisir

l'ensemble des variables et leurs relations. Nous avons finalement adopté un formalisme inspiré des réseaux de causalité (*causal networks*, voir GEIGER et PEARL (1988)).

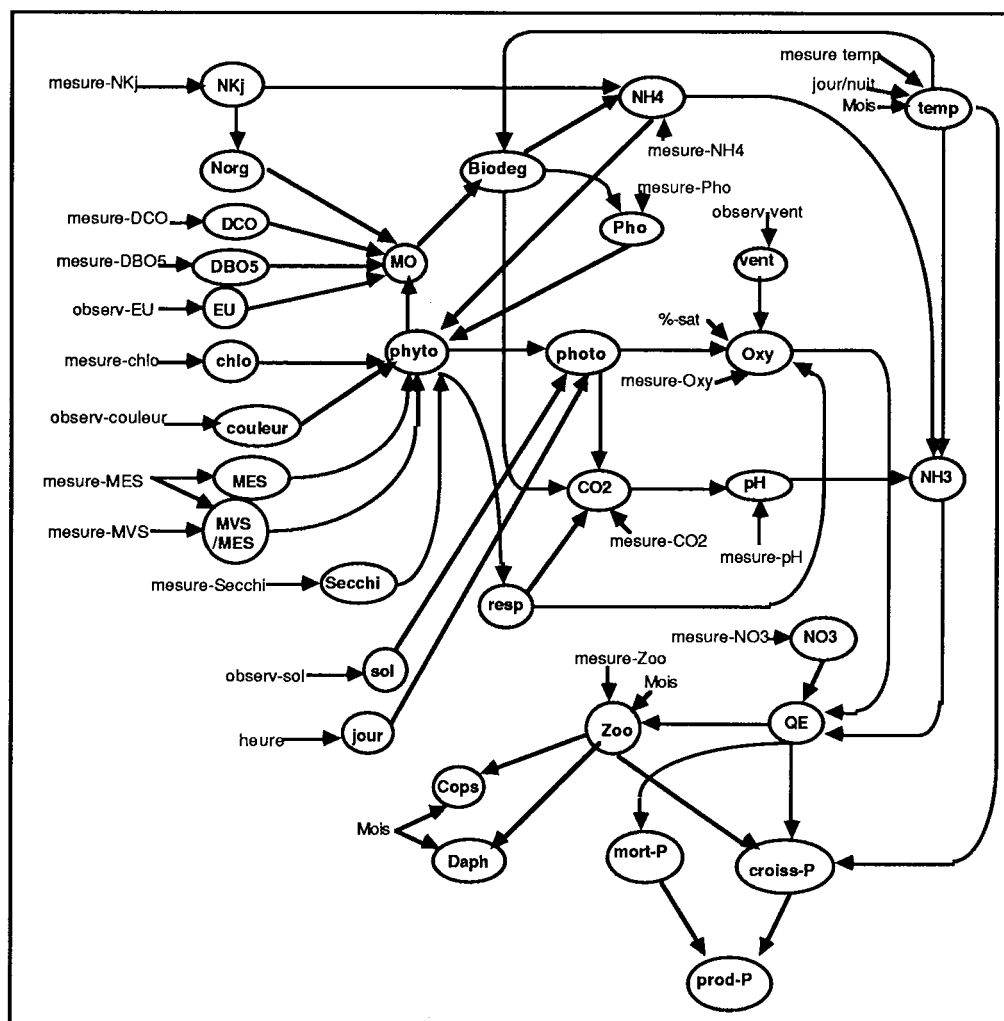


Fig. 1 - Réseau de causalité entre variables qualitatives d'un modèle d'interprétation de données et d'observations sur un écosystème aquatique.

(Biodeg = intensité de la biodégradation, Chlo = chlorophylle, Cops = copépodes, couleur = couleur de l'eau, croiss-P = conditions favorisant la croissance piscicole, Daph = daphnies, DBO5 = demande biochimique en oxygène en 5 jours, DCO = demande chimique en oxygène, EU = modification de l'apport d'eaux usées à traiter, MES = matières en suspension, MO = matières organiques, mort-P = risques de mortalité piscicole, MVS = matières volatiles en suspension, NKj = azote Kjeldahl, Norg = azote organique, Oxy = oxygène dissous, Pho = phosphates, photo = activité photosynthétique, phyto = biomasse phytoplanctonique, prod-P = conditions favorisant la production piscicole, QE = qualité de l'eau, resp = respiration nette du phytoplancton, sol = ensoleillement, temp = température de l'eau, Zoo = biomasse zooplanctonique).

3.3.2 - Réseau de causalité

La Fig. 1 ci-dessus présente le réseau constitué par les trente-deux variables d'état de notre modèle. La syntaxe en est la suivante :

- une variable qualitative est représentée par un noeud du réseau figuré par un cercle;
- une relation est représentée par un arc orienté du noeud-cause vers le noeud-effet ;
- une valeur d'entrée est représentée par son nom; elle est reliée par un arc à la variable qualitative qui en est la traduction (exemple : mesure-pH --> pH).

3.3.3 - Dédution et induction

A l'inverse des systèmes dynamiques où les variables sont liées par des relations temporelles claires (notion de précédence par exemple), ce qui est le cas des systèmes physiques jusqu'à un certain niveau de complexité, en écologie il est souvent difficile de distinguer l'effet de sa cause :

- soit par manque de connaissance,
- soit parce que la circularité est une caractéristique essentielle des systèmes vivants (fameux problème de la poule et de l'oeuf...).

Dans la mesure où notre but est de modéliser un raisonnement à partir de faits nous avons privilégié le sens de la déduction logique (*modus ponens* guidé par les faits) : une variable qualitative représentant une mesure ou une observation, sera considérée prioritairement comme la cause d'une variable déduite. Celle-ci, effet de la première, pourra être à son tour la cause d'une autre variable. Par exemple : (matières en suspension, fort) et (couleur de l'eau, verte) seront causes de la déduction de (phytoplancton, fort), en l'absence de dosage direct de chlorophylle. A son tour, (phytoplancton, fort) en conjonction avec (ensoleillement, fort) permettra de déduire (photosynthèse, intense). Par contre on demandera au système informatique de pouvoir aussi raisonner par induction : si l'on fait l'hypothèse que (photosynthèse, intense), quelles sont les explications possibles ? On générera (phytoplancton, fort) et (ensoleillement, fort).

4 - Raisonnement qualitatif

4.1 - Espace quantité et état qualitatif

A l'instar de la physique qualitative toute variable du modèle prend sa valeur sur un espace discret de grandeurs qualitatives (*quantity space*), fini, totalement ordonné et ne comportant qu'un petit nombre d'éléments, GARDIN et MELTZER (1989). Dans l'exemple cité au § 3.2, on peut définir un espace quantité à deux valeurs {+, -} :

{+} pour les notions de : positif, intense, élevé, fort, bon...

{-} pour : négatif, bas, faible, mauvais...

Bien que deux valeurs permettent de réaliser un modèle statique non trivial, un enrichissement sémantique est nécessaire pour exprimer des raisonnements plus nuancés, ou pour réaliser un modèle dynamique. Il est utile de pouvoir représenter les notions de :

- excessif, très élevé, excellent...

- moyen, normal, médiocre, pas mauvais...

- très faible, infime, très mauvais...

On définira alors un espace à 5 valeurs : {-, -, 0, +, ++}.

Du point de vue dynamique, les tendances des variables peuvent être qualifiées par le signe de leur dérivée par rapport au temps : {décroissant, stable, croissant}. L'état d'une variable qualitative à l'instant t sera le couple (valeur qualitative, tendance d'évolution) et un état du système sera constitué par l'ensemble des états individuels des variables. La succession des états ordonnés dans le temps permet de représenter l'évolution du système.

4.2 - Règles de transfert

4.2.1 - Formalisation des connaissances

A chaque relation (arc du réseau de causalité) est associé un ensemble de règles permettant le calcul de la variable effet à partir de la valeur de sa cause. Ces règles de connaissances jouent

donc le rôle des fonctions de transfert utilisées en automatique, CALOUD (1988). Le raisonnement consistera, partant d'un nombre quelconque de variables initiales, à propager leurs valeurs qualitatives à travers le réseau (Fig.1) en appliquant les règles de transfert dont on distinguera deux types :

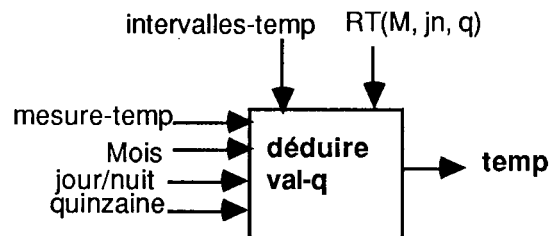
- celles permettant la traduction des valeurs d'entrée (numériques) en valeurs qualitatives par comparaison avec des intervalles de valeurs seuils;

- celles permettant d'inférer la valeur de l'effet à partir de la valeur qualitative de la cause.

Afin de faciliter l'écriture des règles de connaissances, nous avons employé une représentation proche des "actigrammes" de la méthode de spécification de logiciel SADT² (DICKOVER *et al.* (1978)), suivie de la transcription des "intervalles d'entrée", des règles de transfert (RT) et de règles d'action (RA).

4.2.2 - Traduction qualitative de valeurs d'entrée numériques

Prenons pour exemple la variable température de l'eau "temp". Le diagramme représente l'ensemble des données d'entrée et des règles nécessaires à la déduction de sa valeur qualitative :



On a comme valeurs d'entrée possibles :

- la mesure de la température si elle a été effectuée ("mesure-temp"), traduite à l'aide des intervalles "intervalles-temp";

- les indications du mois, de la quinzaine et de la période de la journée qui, par application des règles de transfert notées RT(M, jn, q) permettront en l'absence de mesure de déduire "temp".

Les intervalles de température seront notés en (1) sous le diagramme :

(1) - intervalles-temp (mesure-temp = t, entier, $1 \leq t \leq 35$ °C)

$0 < t \leq 10$ °C => temp = {--}

$10 < t \leq 15$ °C => temp = {-}

$15 < t \leq 18$ °C => temp = {0}

$18 < t \leq 25$ °C => temp = {+}

$t > 25$ °C => temp = {++}

La température est un entier compris entre 1 et 35 et cinq intervalles, équivalents à des ordres de grandeur, sont mis en correspondance avec les éléments de l'espace quantité.

Les règles de transfert (RT) seront notées en (2) sous un en-tête exprimant que le mois est un entier compris entre 1 et 12, la période de la journée jour/nuit une grandeur prenant pour valeur, soit jour, soit nuit, et la quinzaine un entier ne pouvant prendre pour valeur que 1 ou 2 :

(2) - RT(Mois = M, entier, $1 \leq M \leq 12$; jour/nuit = jn, chaîne, jn = {jour, nuit}; quinzaine : q, entier, $q = \{1, 2\}$).

Les règles s'écriront :

$M = \{12, 1, 2\} \Rightarrow \text{temp} = \{--\}$

qui indique que l'on considère par défaut que la température de l'eau est très froide (inférieure à 10°C) pendant les mois de Décembre, Janvier et Février;

² - Structured Analysis and Design Technique, marque déposée de Softech et IGL Technology.

M = {4}

q = {1}

jn = {nuit} => temp = {-} qui indique qu'au cours de la première quinzaine d'avril, la température de l'eau sera prise par défaut pour froide (comprise entre 10 et 15°C) pendant la nuit . D'autres règles détailleront tous les cas possibles. Les règles d'action (RA) précisent l'utilisation des données d'entrée et des règles de transfert pour déclencher déduire val-q :

(3) RA :

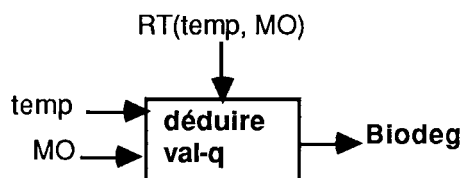
mesure-temp intervalles-temp => temp

(mesure-temp) Mois jour/nuit quinzaine RT(M, jn, q) => temp

qui signifie qu'il est nécessaire de disposer d'une mesure de température et des "intervalles-temp" pour déterminer "temp"; qu'en l'absence de mesure, on doit alors avoir les valeurs de "Mois", "jour/nuit" et "quinzaine" ainsi que les règles de transfert relatives à ces trois grandeurs.

4.2.3 - Transfert entre variables qualitatives

Exemple : variable "Biodeg", correspondant à la biodégradation des matières organiques; nos commentaires d'explication sont indiqués entre " " .



" entrées : variables temp (température) et MO (matières organiques) "

(1) - "absence d'intervalles entrée"

(2) - RT(temp, var-q, EQ ; MO, var-q, EQ)

"temp et MO sont des variables qualitatives qui prennent leur valeur dans l'espace quantité"

temp = {--} => Biodeg = {--}

MO = {--} => Biodeg = {--} "temp et MO très faibles, facteurs limitants de Biodeg"

temp = {-} "inhibition de Biodeg par temp faible"

MO = {-} => Biodeg = {--}

MO = {0} => Biodeg = {-}

MO = {+} => Biodeg = {0}

MO = {++} => Biodeg = {+}

temp = {0} => Biodeg = MO "par temp moyenne, Biodeg est déterminée par MO"

temp = {+, ++} "par temp forte ou très forte activation de Biodeg"

MO = {-} => Biodeg = {0}

MO = {0} => Biodeg = {+}

MO = {+, ++} => Biodeg = {++}

(3) - RA

temp MO RT(temp, MO) => Biodeg

"pour déterminer Biodeg on doit avoir les valeurs de temp, MO et les règles de transfert correspondantes".

4.3 - Cas de variables dont on connaît l'évolution dans le temps

La photosynthèse est la seule variable dépendant véritablement du temps dans le modèle que nous avons développé. L'action du temps sur "photo" se fait par l'intermédiaire de la variable "jour" déterminée par la valeur d'entrée "heure". Celle-ci est comparée avec des intervalles horaires ayant une signification biologique³ (indiquée entre " ") :

³ - On considèrera ici l'heure solaire.

- (1) - intervalles-heure (heure = h, entier, $0 \leq h \leq 24$ H)
- $0 < h \leq 6 \Rightarrow$ jour = {--} "fin de nuit, photosynthèse nulle, O2 et pH minimaux"
 - $6 < h \leq 9 \Rightarrow$ jour = {0} "début de matinée, la photosynthèse reprend, O2 et pH croissants"
 - $9 < h \leq 11 \Rightarrow$ jour = {+} "fin de matinée, accélération importante de la photosynthèse"
 - $11 < h \leq 13 \Rightarrow$ jour = {++} "midi, photosynthèse à son maximum"
 - $13 < h \leq 16 \Rightarrow$ jour = {+} "début d'après-midi, photosynthèse forte mais en baisse"
 - $16 < h \leq 20 \Rightarrow$ jour = {0} "fin après-midi, photosynthèse moyenne, O2 pH encore forts"
 - $20 < h \leq 24 \Rightarrow$ jour = {-} "début de nuit, photosynthèse \approx nulle, baisse de O2 et pH"

5 - MODELE INFORMATIQUE

5.1 - Choix de Prolog

Nous avons choisi Prolog II, GIANNESINI et *al.*(1985)⁴, pour réaliser le modèle informatique reproduisant les principes spécifiés ci-dessus. Prolog est aujourd'hui l'un des principaux langages de programmation en Intelligence Artificielle qui possède d'intéressantes caractéristiques :

- un formalisme logique (prédicats du premier ordre réduits aux clauses de Horn) particulièrement apte à représenter des relations entre variables peu différenciées,
- c'est un langage déclaratif de haut niveau laissant au programmeur une grande liberté d'expression symbolique et donnant une grande lisibilité aux programmes,
- son mécanisme d'inférences non déterministe permet l'exploration complète de toutes les solutions d'un problème.

Si son mode de fonctionnement sous-jacent est basé sur le *backtracking* (chaînage arrière), il est possible de simuler un fonctionnement inverse par assertion dynamique de clauses (prédicat prédéfini *assert*). Ceci, allié à la suppression de clauses (*suppress*), permet au programme de manipuler lui-même ses connaissances (règles ou faits) et d'effectuer sur elles un méta-raisonnement.

5.2 - Principe de fonctionnement

Un ensemble de valeurs d'entrées (numériques ou observations) sont saisies par l'utilisateur à la demande du système et traduites qualitativement. Les résultats du calcul sont générés sous forme de faits <variable, valeur> pouvant être édités. L'utilisateur dispose ainsi de l'interprétation qualitative des variables initiales.

Le système propose ensuite la liste des variables déductibles parmi lesquelles l'utilisateur effectue un choix; le système cherche alors à établir la valeur de chacune des variables choisies :

- en chaînage avant à partir de conjonction ou de disjonction de faits initiaux,
- en chaînage arrière par recherche des variables dont l'établissement préalable est nécessaire au calcul de la variable cherchée.

Ainsi s'établit dans ce mouvement avant - arrière, la base de faits. Chaque fait comporte les références de la dernière règle déclenchée, la variable-cause et la variable déduite, accompagnées de leur valeur respective.

⁴ - On distingue deux syntaxes de Prolog : Marseille et Edimburgh; Prolog II, basé sur la syntaxe de Marseille, est distribué par la société Prologia.

5.3 - Explications

C'est la possibilité, à tout moment, de transcrire dans un langage compréhensible par l'utilisateur la suite d'inférences logiques ayant conduit à l'établissement des faits dans la base.

5.4 - Analyse de la base de faits

- comptage pour chaque variable du nombre de faits établis pour une valeur déterminée : plusieurs faits portant sur une même variable peuvent avoir été générés par le raisonnement. S'ils sont identiques, le nombre de leurs occurrences mesure d'une certaine façon la crédibilité qui peut leur être accordée (convergence vers une même conclusion de plusieurs voies de raisonnement); s'ils divergent (valeurs différentes calculées pour une même variable) cela permet de détecter des incohérences pouvant exister dans les règles de transfert ou dans les données initiales.

- liste des variables ayant conduit à l'assertion d'un fait : donne la liste des variables successivement utilisées pour établir la valeur d'une variable présente dans la base de faits. Cette facilité est complémentaire du module d'explications.

5.5 - Création d'état

Toutes les variables qualitatives établies dans les faits sont indexées par rapport au temps (valeur de "jour") et mises sous forme de nouveaux faits "état (temps, variable, valeur)", ou de listes de variables pour une valeur déterminée par exemple (jour ={++}, {+}, temp.photo.Oxy...), (jour ={++}, {-}, CO2...).

5.6 - Analyse des règles de transfert

Cette fonctionnalité permet de trouver pour chaque variable, les différents chemins capables de conduire à son calcul dans le graphe de causalité. L'utilisateur peut ainsi obtenir des réponses à des questions telles que :

- de quelles données a-t-on besoin pour déterminer telle variable ?
- si l'on dispose de tel ensemble de mesures, quelles variables peut-on déduire ?
- quelles sont les étapes permettant de passer de telle variable à telle autre ?

Pour le concepteur, elle donne une vue critique du modèle de connaissances représenté par les règles de transfert.

5.7 - Analyse qualitative de séries de données

L'utilisateur saisit la suite de mesures d'un paramètre en fonction du temps sous la forme de couples < mesure, temps >. La liste des mesures est analysée selon les tendances qu'elle dénote : croissance, décroissance, stabilité, par identification des séquences élémentaires qui la composent. La reconnaissance de formes caractéristiques d'évolution telles que "pic-pointu", "pic-aplati", "creux-en-vé", "creux-aplati", "plateau", "toboggan" est possible, par combinaison des tendances des séquences élémentaires. Ce module a été conçu indépendamment des fonctionnalités décrites ci-dessus. Son intégration en cours doit permettre la prise en compte des informations que recèlent les historiques de données.

6 - CONCLUSION

Le modèle que nous venons de présenter traite essentiellement le problème de la prédiction

à court terme, quand on peut considérer que l'effet déduit se produira dans un laps de temps relativement court (ici un jour ou deux). Il permet de raisonner sur un ensemble de données ou d'observations ponctuelles. Deux questions méritent cependant d'être abordées pour son amélioration. D'abord, l'élaboration de méthodes formelles de calcul sur les valeurs qualitatives, avec la définition d'opérateurs permettant de délivrer des résultats ayant une signification biologique; ensuite, le traitement de l'incertitude dans la propagation des valeurs qualitatives au sein du réseau de causalité. Au-delà, nous travaillons à la prise en compte dans le raisonnement de dynamiques à plus long terme. Compte tenu de l'instabilité et du caractère peu prévisible de l'écosystème étudié, cette démarche se heurte à l'insuffisance de nos connaissances sur les relations temporelles (retard, délai de propagation) unissant les variables. Il paraît cependant accessible d'effectuer des raisonnements utilisant les mêmes principes que ceux que nous avons exposés sur des échelles de temps différentes : saisonnière ou annuelle. Nous nous attachons dans cette optique à éclaircir la notion de variable pertinente, TANG et MILLOT (1988).

BIBLIOGRAPHIE

- VINCENT T.L.; SKOWRONSKI J.M. - "Preface", in : *Proceedings of a workshop on control theory applied to renewable resource management and ecology*, Christchurch (New Zealand), January 7-11, 1980, pp. V - VIII.
- BOBROW D.G.; STEFIK M.J. - "Perspectives on Artificial Intelligence programming". *Science*, **231**, 1986, pp. 951-957.
- CALOUD P. - *Raisonnement qualitatif ; application à l'aide à la supervision des procédés continus*. Thèse de Doctorat INPG et LIFIA, Grenoble, 1988.
- CHAHUNEAU F.; DES CLERCS S. - "Perspectives de modélisation du réseau trophique en étang; applications potentielles à l'optimisation et au contrôle de la production piscicole", in : Billard R., *La pisciculture en étang*, INRA Publ., Paris, 1980, pp. 129-138.
- DICKOVER M.E.; MCGOWAN C.L.; ROSS D.T. - "Software design using SADT", in : *Infotech state of the art report : Structured Analysis and Design*, **2**, 1978, pp. 99-114.
- GARDIN F.; MELTZER B. - "Analogical representations of naive physics". *Artificial Intelligence*, **38**, n° 2, 1989, pp.139-159.
- GEIGER D.; PEARL J. - "On the logic of causal models", in : *4th workshop on uncertainty in Artificial Intelligence*, Univ. of Minnesota, Aug. 19-21, 1988, pp. 136-147.
- GIANNESINI F.; KANOUI H.; PASERO R.; VAN CANEGHEM M.- *Prolog*. InterEditions, Paris, 1985.
- GUERRIN F.- "Valorisation du zooplancton produit en étangs de lagunage comme base pour l'alimentation de larves et juvéniles de Cyprinidés". *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, n° 311, 4eme trim., 1988, pp.113-125.
- JØRGENSEN S.E. - *Fundamentals of Ecological Modelling; Developments in Environmental Modelling 9*, Elsevier, Amsterdam , 1986.
- KUIPERS B. - "Qualitative simulation". *Artificial Intelligence*, **29**, 1986, pp. 289-338.
- RASMUSSEN J. - "The role of hierarchical knowledge representation in decisionmaking and system management", in : *IEEE transactions on systems, man and cybernetics*, **smc-15**, n° 2, march/april , 1985, pp. 234-243.
- TANG X. et MILLOT P. - "Définition et concentration des informations pertinentes pour les opérateurs en salle de contrôle", in : *Ergo-IA'88 Colloque Européen Ergonomie et Intelligence Artificielle*, AFCET - SELF, 4-6 oct., 1988, Biarritz (France), pp. 159-173.
- VOGEL C. - *Génie cognitif*, Masson , Paris, 1988.