

No. 161

**SYSTEMES EXPERTS D'AIDE
A LA PREVISION**

par

Jacques Ambühl, Genève

Mars 1991

Systemes experts
Prévision météorologique

681.32
551.509

**Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute**



No. 161

**SYSTEMES EXPERTS D'AIDE
A LA PREVISION**

par

Jacques Ambühl, Genève

Mars 1991

Systèmes experts
Prévision météorologique

681.32
551.509

Résumé

Après une introduction suggérant l'une des perspectives dans lesquelles un système expert peut être appliqué à la prévision météorologique, une description simple de la logique sous-tendant un tel système est présentée, formalisée dans le langage Prolog.

Deux systèmes expert développés au CMG sont ensuite décrits, le premier établissant une prévision de nébulosité sur la Suisse romande, le second, doté d'une logique plus subtile, réalisant une prévision simple pour le vol à voile et l'aile delta sur la même région.

Une courte réflexion abordant le problème de la relation entre l'homme et la machine est donnée en guise de conclusion.

Zusammenfassung

In der Einleitung wird eine Anwendungsmöglichkeit von Expertensystemen im Vorhersagedienst beschrieben. Die zum Aufbau eines solchen Systems verwendete Logik, formuliert in der Programmiersprache Prolog, wird dargelegt.

Es folgt die Beschreibung zweier Expertensysteme, die im CMG entwickelt wurden. Das erste liefert eine Bewölkungsvorhersage für die westlichen Landesteile der Schweiz. Das zweite, mit einer anspruchsvolleren Logik versehene System ergibt eine vereinfachte Prognose über die Segel- und Drachenflugbedingungen in der gleichen Region.

Zum Schluss geht der Autor auf die Beziehung zwischen dem Mensch und der Maschine ein.

Riassunto

Dopo un'introduzione che suggerisce una delle prospettive in cui un sistema esperto potrebbe essere impiegato nella previsione meteorologica, si descrive sommariamente la logica sottostante un tale sistema, formalizzata nel linguaggio Prolog.

Vengono descritti due sistemi esperti sviluppati al CMG: il primo serve a prevedere la nuvolosità nella Svizzera romanda, il secondo, dotato di una logica più raffinata, fornisce una previsione semplice per il volo a vela e delta nella stessa regione.

Una breve riflessione sulla problematica della relazione tra uomo e macchina conclude il presente rapporto.

Summary

After an introduction suggesting one of the possible applications for which an expert system may be used in weather forecasting, a simple description of the underlying logic of such a system, formulated in the Prolog language, is presented.

Two expert systems developed at the CMG are then described, the first is designed to forecast cloudiness in the French speaking part of Switzerland, the second, equipped with a smarter logic, deals with simple gliding and hang-gliding forecasts for the same region.

A short reflection on the man-machine relationship concludes the paper.

1. Introduction.

Un système expert est un programme informatique réalisant l'automatisation d'un processus de diagnostic, de pronostic ou de décision, en faisant usage de l'expérience codifiée d'un expert humain du domaine sur lequel portent le diagnostic, le pronostic ou la décision.

Afin d'acquérir une certaine expérience en cette matière, nous nous sommes décidés à attaquer un problème bien formalisé du point de vue météorologique, intéressant la prévision en Suisse romande, susceptible enfin d'être abordé avec les moyens disponibles au CMG. Notre choix s'est porté sur le problème de l'évaluation de la nébulosité sur la Suisse romande, en faisant usage des règles proposées par Y. Ganter. Celles-ci prennent en compte la circulation générale prévue à 500 hpa et déterminent une catégorie d'ensoleillement/nébulosité sur une région déterminée. Le fait de disposer de règles rigoureuses nous a permis, en évacuant dans un premier temps le problème météorologique, de ne porter notre attention que sur l'élaboration du système, en choisissant aussi souvent que possible les solutions techniques les plus simples.

Ayant installé un logiciel de développement Turbo-prolog sur la HP Vectra du CMG, nous avons rapidement pu mettre au point un prototype de système écrit en Prolog et faisant usage des propriétés naturelles de ce langage: résolution en logique du premier ordre et unification.

Parallèlement, nous avons tenté le développement d'un système de prévision pour le vol à voile faisant appel à un protocole plus complexe de décision hiérarchisée.

Enfin, toujours dans le cadre du CMG, B. Dunand s'est attaqué au développement d'un système de prévision des vents sur les lacs et L. Fontannaz à un système d'interprétation des situations Perret.

Le présent rapport n'est pas un cours d'intelligence artificielle portant sur les systèmes experts. Il ne fait que décrire les problèmes rencontrés et les solutions envisagées, sans aucune prétention à l'exhaustivité.

2. Perspectives d'applications en météorologie.

Un bon nombre d'applications des systèmes experts, et plus généralement de l'intelligence artificielle, peuvent être envisagées en météorologie. Citons, sans être exhaustif, l'élaboration automatique des métars, des tafs, des "Significant Weather Charts", des dispositifs évaluant les occurrences de brouillard, de cisaillement de vent, ...

Le présent travail a été envisagé dans la perspective d'une stratification (très schématique) en quatre niveaux de l'activité de prévision météorologique, illustrée à la figure 1.

- Le premier niveau est celui d'un modèle numérique de prévision météorologique. Les grands principes de la météorologie dynamique et de la physique de l'atmosphère, formalisés dans le modèle numérique, y sont pris en compte. Les produits livrés par le modèle numérique ont un caractère global et déterministe.
- Le deuxième niveau est celui de l'interprétation statistique. Le dispositif statistique, essentiellement basé sur un acquis climatologique, joue le rôle d'intermédiaire entre le caractère global et déterministe des prévisions numériques et la prévision locale du temps, souvent exprimée sous forme probabiliste.
- Le troisième niveau est celui du prévisionniste. Il correspond à la prise des décisions de prévision, basée d'une part sur les informations livrées par les deux niveaux précédents, d'autre part, et de manière fondamentale, par l'exploitation de toutes les données d'observation disponibles (satellite, radar, réseau d'observation, ...)
- Au quatrième niveau correspond le contrôle de qualité des prévisions. Cette tâche n'est pas nécessairement comprise dans le flux des opérations effectuées en temps réel dans les niveaux supérieurs, elle intervient cependant directement dans l'élaboration des méthodes de travail appliquées par le prévisionniste et, à fortiori, dans l'élaboration de la base de connaissance du système expert.

Le système expert, dans cette perspective idéale, est installé au troisième niveau. Il accède aux informations élaborées dans les deux niveaux supérieurs, ainsi qu'à toutes les observations disponibles.

Le prévisionniste partage la responsabilité de l'élaboration des prévisions avec le système expert qui est en mesure de délivrer ses propres bulletins automatiques.

Tant la prise en compte des données livrées par les deux premiers niveaux que celle des observations est délicate: le système expert doit, entre autres, pouvoir tenir compte des biais systématiques introduits par les modèles numériques et statistiques, et par les instruments d'observation. Une aptitude aigüe à la reconnaissance des formes (images satellite, radar, champs physiques livrés par le modèle numérique), remarquablement développée dans le cerveau du prévisionniste, fait généralement défaut aux dispositifs actuels d'intelligence artificielle.

Cette limitation nous a conduit, dans cette première étape, à limiter les fonctions du système expert au schéma exhibé à la figure 2. Le prévisionniste est responsable de l'interprétation des données disparates héritées d'une part des deux niveaux supérieurs, d'autre part des dispositifs d'observation. Il n'utilise le système expert que comme consultant et conserve toute la responsabilité des prévisions élaborées.

Il apparaît clairement en examinant les figures 1 et 2 que "l'intelligence de la prévision" n'est intégralement contenue ni dans l'esprit du prévisionniste, ni dans le système expert, mais qu'elle résulte au contraire de l'interaction coordonnée des éléments figurant dans tous les niveaux.

Cette absence de localité de l'intelligence trace la limite d'application du système expert, ou plus généralement de l'intelligence artificielle, à l'art de la prévision.

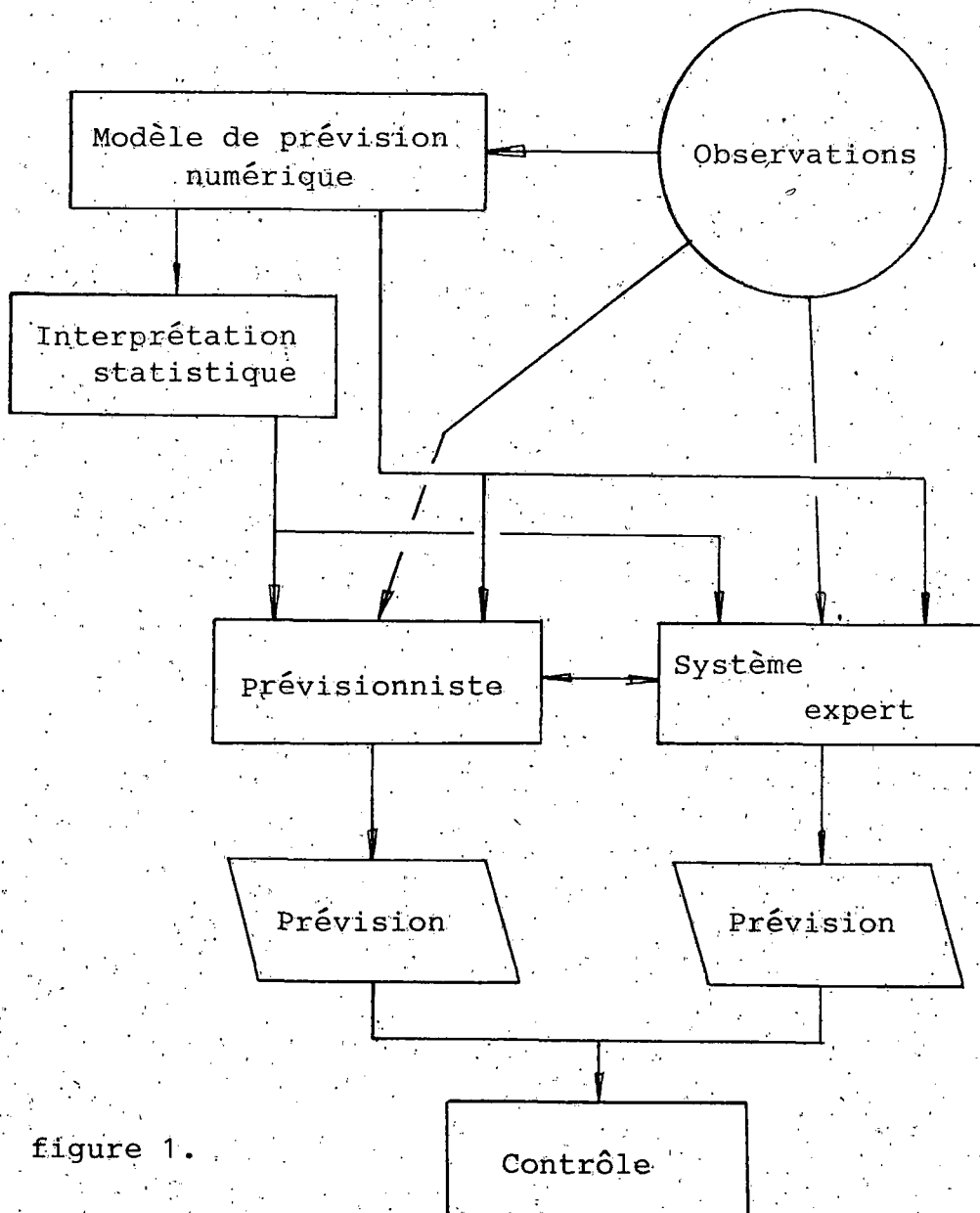


figure 1.

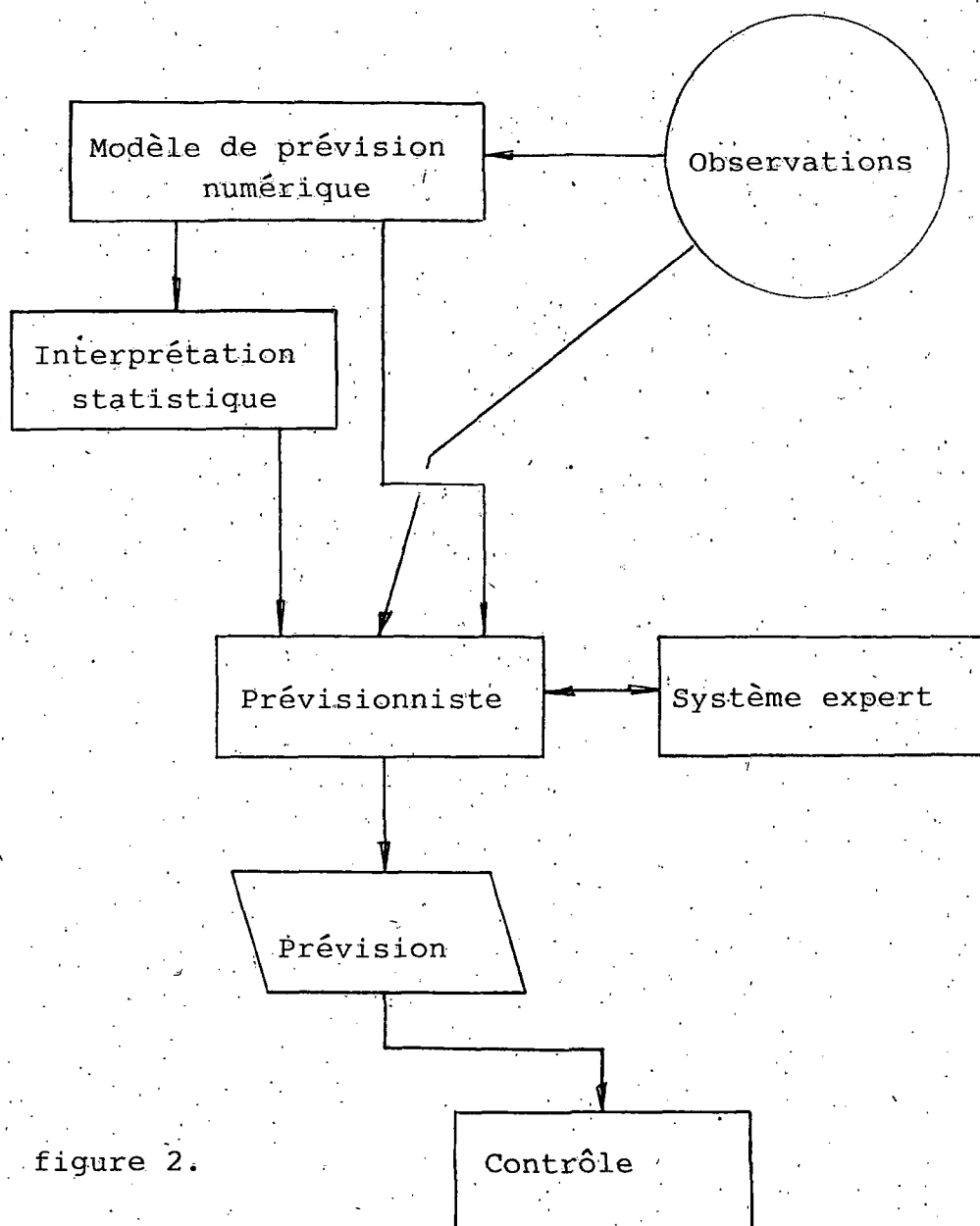


figure 2.

3. Prolog : "The ghost in the machine".

Le langage Prolog, développé vers la fin des années 70 à l'université de Marseille pour résoudre des problèmes d'intelligence artificielle, se distingue notamment des langages classiques utilisés en informatique :

Il est conçu pour manipuler des objets symboliques dotés de propriétés qualitatives (couleur d'une fleur, type d'un nuage,...) plutôt que des objets numériques (nombres, vecteurs, matrices,...).

Il est déclaratif plutôt qu'impératif. Contrairement à un langage classique impératif (Pascal, Ada,...) requérant une description rigoureuse de la séquence des opérations devant être réalisées par l'ordinateur, Prolog autorise la construction de programmes formés des définitions des objets introduits et des relations établies entre ces objets.

Ainsi, pour exprimer que le temps est en général ensoleillé sur le Valais (classe Opko 4) lorsque les conditions suivantes sont simultanément réalisées :

- . la cyclonalité est faible à 500 hpa
- . l'axe d'un éventuel thalweg est situé à l'extérieur de la bande délimitée par les longitudes 0 degrés et 10 degrés est
- . la direction du vent à 500 hpa est comprise dans un secteur s'étendant de l'est au sud, à l'ouest, au nord-ouest
- . la vitesse du vent à 500 hpa est comprise entre 20 et 29 noeuds

on écrit simplement :

```

nébul_valais(classe 4):-
    cyclonalité(faible),
    axe_thalweg(ext0_10_est),
    dir_vent(e_s_w_nw),
    vit_vent(kt_20_29).

```

Le microscopique exemple suivant, exhibant la filiation entre quelques personnes, décrit les deux processus fondamentaux selon lesquels opère Prolog : la résolution et l'unification. Il représente de surcroît un exemple complet de programme Prolog.

DOMAINS

```

personne = reference
    antoine; henry; myriam; pierre; françoise

```

PREDICATES

```

père_de(personne, personne)
grand_père_de(personne, personne)

```

CLAUSES


```
père_de(françoise,henry).
père_de(myriam,pierre).
père_de(henry,antoine).
père_de(pierre,henry).
```

```
grand_père_de(X,Y):-
  père_de(X,Z),
  père_de(Z,Y).
```

Les prédicats `père_de(,)` et `grand_père_de(,)` expriment des relations qui ne peuvent être que vraies ou fausses entre les éléments sur lesquels ils opèrent, les personnes, elles mêmes collationnées dans le domaine.

L'ensemble des connaissances dont on désire doter notre petit programme, spécifié dans les clauses, est divisé en deux catégories : les faits : "Henry est le père de Françoise" et les règles de raisonnement, dont l'unique exemple ici illustré spécifie la transitivité de la relation de filiation.

Lorsqu'on pose au système les questions suivantes, il répond :

<code>père_de(françoise,henry)</code>		<i>oui</i>
<code>père_de(françoise,pierre)</code>		<i>non</i>
<code>père_de(myriam,X)</code>	<i>X=pierre</i>	<i>oui</i>
<code>père_de(X,antoine)</code>	<i>X=henry</i>	<i>oui</i>

Le système cherche toutes les valeurs qu'il peut attribuer à la variable `X` pour satisfaire l'ensemble des clauses décrivant le prédicat `père_de(,)`. C'est un exemple élémentaire d'unification, par lequel sont extraites de l'ensemble des clauses des informations relatives aux personnes, éléments du domaine.

Lorsqu'on pose au système la question suivante, il répond :

<code>grand_père_de(X,Y)</code>	<i>X=françoise Y=antoine</i>	
	<i>X=pierre Y=antoine</i>	
	<i>X=myriam Y=henry</i>	<i>oui</i>

Deux processus sont simultanément à l'oeuvre : `Grand_père_de(,)` n'est vrai que si tous les prédicats énumérés dans le corps de la règle (après le connecteur `:-`) le sont simultanément. C'est un exemple de résolution, mécanisme de raisonnement logique apparenté au *modus ponens*. De plus, la présence dans le corps de la règle des trois variables libres `X`, `Y`, `Z` figurant dans deux couples `(X,Z)` et `(Z,Y)` impose l'intervention de l'unification lors de l'évaluation des clauses `père_de(,)`. Enfin, le système opère en chaînage arrière, du niveau le plus élaboré, ici `grand_père_de(,)`, en direction des faits plus élémentaires, ici les clauses `père_de(,)`.

Cet exemple nous conduit au schéma-bloc du plus simple des systèmes expert, exhibé à la Figure 3.

Le moteur d'inférence forme le coeur du système. Il manipule les règles contenues dans la base de connaissance en faisant appel au chaînage arrière (dans les systèmes les plus simples), via la résolution et l'unification.

Les connaissances spécifiques livrées par l'expert humain lors du développement du système sont formalisées dans la base de connaissance selon un protocole décrit plus bas.

Au cours de la résolution d'un problème, le moteur d'inférence évalue les prédicats portant sur des faits spécifiques au cas traité. Le module de communication pose alors des questions au monde extérieur, soit en dialoguant avec l'opérateur, soit en consultant directement des fichiers informatiques disponibles sur l'ordinateur hôte, ou enfin des instruments de mesure.

Les faits spécifiques au cas traité, déduits par le moteur d'inférence et entreposés dans la base de faits dynamiques, sont appelés lors de l'évaluation des prédicats rencontrés durant les parcours en chaînage arrière dans les arbres de la base de connaissance.

Le module de communication assure finalement la présentation des résultats au consultant.

Etant donné que le système Prolog réalise naturellement les fonctions d'un moteur d'inférence opérant en chaînage arrière, le programmeur n'a pas à se soucier de la réalisation d'un tel moteur. Le développement de la base de connaissance requiert en revanche un gros effort de formalisation de la part du programmeur, ainsi qu'une bonne concertation avec l'expert du domaine abordé.

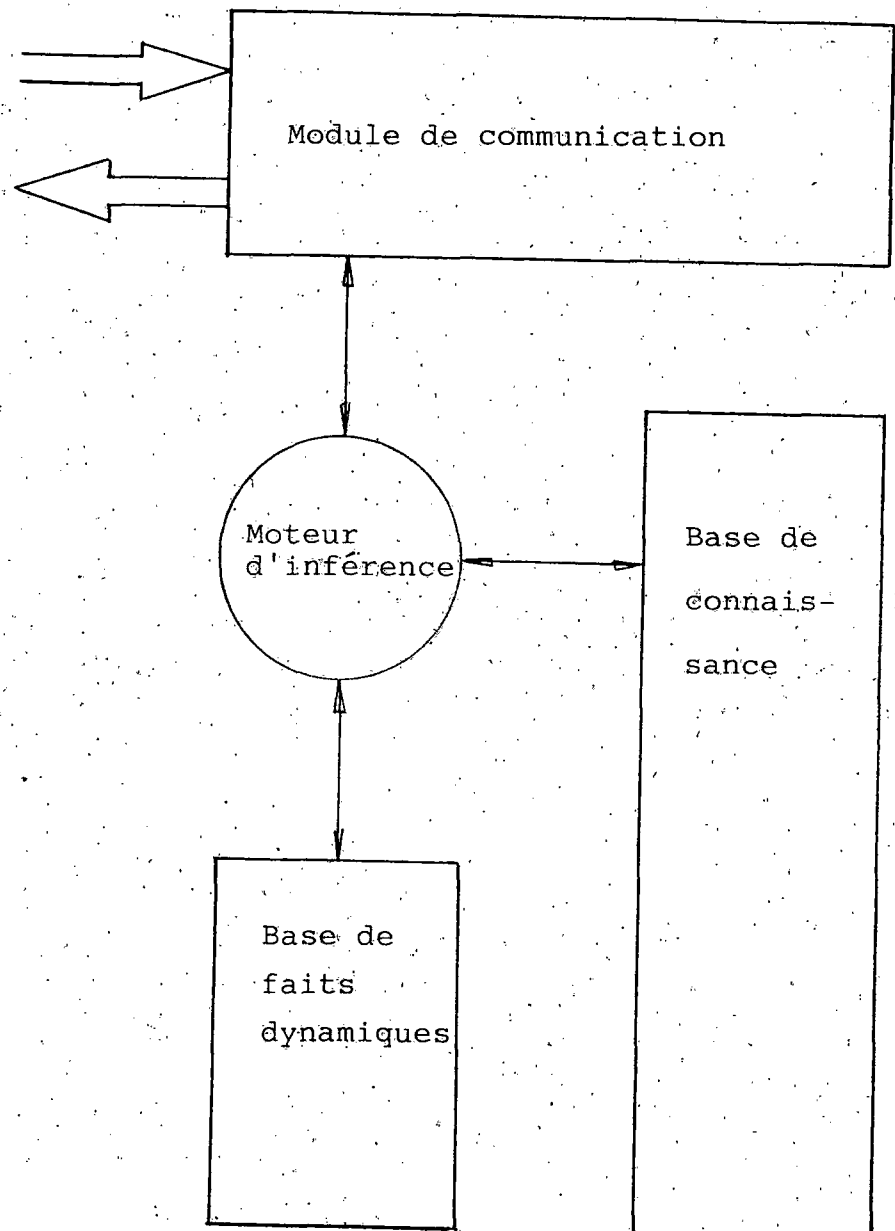


figure 3.

4. Elaboration d'une base de connaissance simple : Le cas de l'ensoleillement/nébulosité sur le Valais.

La formalisation des règles décrivant le domaine abordé, ici l'évaluation de la nébulosité en Valais, a été réalisée aussi simplement que possible à partir des éléments de décision mis en évidence par l'expert, à savoir :

- . la cyclonalité du flux à 500 hpa sur les Alpes, pouvant être forte ou faible.
- . la position d'un éventuel thalweg dans un secteur compris entre 0 et 10 degrés est à la latitude des Alpes.
- . deux secteurs possibles dans lesquels est orienté le vent à 500 hpa, le premier couvrant les régimes de nord-nord-ouest, nord, nord-est, le second les régimes compris entre l'est, le sud, l'ouest et le nord-ouest.
- . la vitesse du vent à 500 hpa sur les Alpes, divisée selon la partition: moins de 20 kt, 20 à 29 kt, 30 à 39 kt, 40 à 50 kt, plus de 50 kt.
- . la présence ou non d'un jet soufflant du nord-ouest à l'ouest des Alpes à 500 hpa.

les catégories d'ensoleillement/nébulosité utilisées sont celles d'Opko, le système de contrôle objectif des prévisions utilisé en Suisse, (Schönbächler 1991). Les classes suivantes d'ensoleillement/nébulosité y sont distinguées :

- . classe 0 : couvert, nébulosité abondante
- . classe 1 : le plus souvent très nuageux, peu de soleil
- . classe 2 : passages nuageux importants, partiellement ensoleillé
- . classe 3 : peu nuageux, assez ensoleillé
- . classe 4 : en général ensoleillé
- . classe 5 : ensoleillé

Les domaines ainsi distingués sont immédiatement écrits en Prolog :

DOMAINS

```

cyclo      = reference
            faible;      forte
axthal     = reference
            in0_10est;  ext0_10est
wnddir     = reference
            nnw_ne;    e_s_w_nw
wndvel     = référence
            kt_ms20;   kt_20_29;   kt_30_39;
            kt_40_50;  kt_ps50
ouinon    = reference

```

```

                oui;                non
nebul           = reference
                classe_0;   classe_1;   classe_2;
                classe_3;   classe_4;   classe_5;
                nil.

```

Les prédicats correspondants sont alors :

```

cyclonalité(cyclo)      axe_thalweg(axthal)
dir_vent(wnddir)       vit_vent(wndvel)
jet_du_nw(ouinon)     nebul_valais(nebul).

```

Les cas distingués par l'expert, mentionnés consécutivement dans un vocabulaire quasiment naturel, constituent les règles qui composent la base de connaissance :

CLAUSES

```

nebul_valais(classe_0):-
  cyclonalité(forte),      axe_thalweg(in0_10est),
  !.
...
nebul_valais(classe_3):-
  cyclonalité(faible),    axe_thalweg(ext0_10est),
  dir_vent(e_s_w_nw),     vit_vent(kt_30_39),
  !.
nebul_valais(classe_3):-
  cyclonalité(forte),     axe_thalweg(ext0_10est),
  dir_vent(e_s_w_nw),     vit_vent(kt_20_29),
  !.
...
nebul_valais(classe_5):-
  axe_thalweg(ext_010est), dir_vent(nnw_ne),
  !.
nebul_valais(nil).

```

Le moteur d'inférence parcourt consécutivement l'ensemble de ces règles, de la première à la dernière, s'arrête à la première qui lui apparaît satisfaite, pour laquelle tous les prédicats situés après le connecteur ":-" sont simultanément vrais (condition conjonctive). Il interrompt alors sa recherche et attribue la classe de nébulosité contenue dans la tête de la règle à la situation en cours d'examen.

L'ordre des clauses est important : la cyclonalité n'est plus prise en compte pour décrire la dernière qui soit mentionnée dans l'exemple, ici la classe 5, tous les cas relatifs à la cyclonalité ayant été traités antérieurement.

Le point d'exclamation "!" est l'opérateur logique interrompant la recherche lorsque la règle qu'il clôt est satisfaite.

La dernière clause, *nebul_valais(nil)*, est la voiture balai chère aux coureurs cyclistes: si, par un méchant hasard, la combinaison des réponses donnée par l'opérateur n'apparaît pas dans la liste ci-dessus, le processus de recherche déclenche un message d'erreur en tombant sur *nil*.

La présence de cette clause *nil* révèle en fait un problème général et important: Si toutes les combinaisons de toutes les catégories spécifiées dans les domaines étaient possibles, le système devrait explorer le produit cartésien de toutes ces catégories, ce qui constituerait un domaine de recherche énorme. La logique du problème abordé interdit naturellement certaines combinaisons qui ne sont simplement pas mentionnées dans l'ensemble des règles livrées par l'expert. Tomber dans la clause *nil* peut donc signifier que l'opérateur s'est trompé, en décrivant une situation qui est naturellement impossible, ou en tout cas exclue par l'expert.

Mais tomber dans cette clause peut également signifier que l'analyse de l'expert est insuffisante, ou pour le moins que la base de connaissance est incomplète et ne prend pas en compte le cas particulier décrit par l'opérateur.

La valeur des prédicats mentionnés dans les règles doit être spécifiée en cours d'interrogation du système. Cette spécification est réalisée par un protocole de dialogue avec l'opérateur qui, en Prolog, doit être programmé spécialement.

5. Protocoles de dialogue et archivage dans la base de faits dynamiques.

La base de faits dynamiques est un registre dans lequel le système peut accumuler des faits ou des conclusions partielles acquis en cours de raisonnement.

Ainsi, dans le présent exemple, à chaque prédicat est associé un élément de la base de faits dynamiques donné par la convention suivante:

Prédicat		Base de faits
<i>cyclonalité(cyclo)</i>	---->	<i>cyclodba(cyclo)</i>
<i>axe_thalweg(axthal)</i>	---->	<i>axthaldba(axthal)</i>
<i>dir_vent(wnddir)</i>	---->	<i>dventdba(wnddir)</i>
<i>vit_vent(wndvel)</i>	---->	<i>vventdba(wndvel)</i>
<i>jet_du_nw(ouinon)</i>	---->	<i>jetnwdba(ouinon)</i>

dba est une convention d'écriture signifiant "data base".

Lorsque se pose par exemple la question "la cyclonalité est elle forte ?" le prédicat *cyclonalité(X)* vérifie tout d'abord si un élément relatif à la cyclonalité n'est pas disponible en base de faits dynamiques, en y cherchant *cyclodba(_)*. Si cette indication est déjà présente, avec par exemple *cyclodba(faible)*, elle livrée à *cyclonalité(X)* qui, via l'unification, répond :

cyclonalité(faible)

oui, ou

cyclonalité(forte) non, ou
cyclonalité(X) *X=faible* oui.

Si en revanche ce n'est pas le cas, le protocole de dialogue est activé et pose la question à l'utilisateur. Sa réponse, archivée dans la base de faits dynamiques, est alors disponible pour l'évaluation courante et toute évaluation ultérieure de *cyclonalité()*.

Ce dispositif, absolument général, est mis en oeuvre pour tous les prédicats introduits dans la base de connaissance. Sa programmation est illustrée ci-dessous pour le seul cas de la cyclonalité :

```

                                ; Prédicat cyclonalité.
cyclonalité(Y):-
    not(cyclodba(_)), !, ; cyclodba(_) est-il déjà disponible ?
    ask_cyclo,          ; non : questionne l'opérateur ...
    cyclodba(Y).       ; puis unification sur Y.
cyclonalité(Y):-      ; cyclodba(_) déjà disponible
    cyclodba(Y).       ; unification sur Y.

```

```

                                ; Prédicat (ultra-simplifié) de ;
                                ; dialogue avec l'opérateur
ask_cyclo:-
    write("Frappe i si la cyclonalité est faible >"), nl,
    write("Frappe o si la cyclonalité est forte >"), nl,
    readcahr(C),        ; réponse de l'opérateur et
    icyclo(C).          ; complète la base de faits

```

```

                                ; Prédicat d'écriture dans la base de
                                ; de faits dynamiques.
icyclo('i'):-          ; l'opérateur a frappé C='i'
    asserta(cyclodba(faible)).
icyclo('o'):-          ; l'opérateur a frappé C='o'
    asserta(cyclodba(forte)).

```

Par ce dispositif, le système ne pose à l'opérateur que les questions dont il a besoin pour avancer, et il ne les pose qu'une fois.

Il suffit finalement d'un prédicat d'écriture, appelé *scribe(nebul)*, associant à chaque classe Opko la nébulosité ou l'ensoleillement correspondant, et d'un prédicat général, appelé *go*, lançant le dispositif :

```

scribe(classe_0):-
    write("Couvert, nébulosité abondante.").
scribe(classe_1):-
    write("Le plus souvent très nuageux, peu de soleil").
...
scribe(classe_5):-
    write("Ensoleillé").
scribe(nil):-
    write("Désolé, incompatibilité entre vos réponses et"), nl,
    write("les règles disponibles."), nl,

```

```
write("Téléphonez à Yves Ganter : 022 717 82 22 ...").
```

go:-

```
  nébul_valais(Z),
  scribe(Z).
```

La simple exécution de *go* lance tout le dispositif: le chaînage arrière, en opérant à partir de *nébul_valais(Z)*, induit la recherche dans la base de connaissance. Celle-ci requiert l'évaluation des prédicats météorologiques qui, en adressant des questions à l'opérateur, garnissent graduellement la base de faits dynamiques, jusqu'à ce qu'une règle soit satisfaite dans la base de connaissance.

La classe Opko livrée par cette règle, remontée jusqu'à *nébul_valais(Z)* via la variable *Z*, est alors communiquée à *scribe(Z)* qui, par unification, associe le type de nébulosité ou d'ensoleillement choisi.

Le programme complet fait appel à quelques prédicats techniques supplémentaires destinés essentiellement à réaliser une présentation graphique satisfaisante des fenêtres à l'écran.

6. Présentation graphique, extension aux quatre régions climatiques romandes et automatisation des processus.

Le dispositif décrit dans les paragraphes précédents est général et peut être appliqué à d'autres régions climatiques, pour autant que des règles de prévision soient disponibles.

L'expert ayant étendu son analyse aux trois autres régions climatiques distinguées en Suisse romande, à savoir, outre le Valais, le Jura, le Plateau et les préalpes, l'extension du dispositif s'est avérée possible.

Les règles météorologiques dégagées par l'expert étant présentées dans l'annexe 1, portons notre attention sur l'aspect informatique du problème, en mentionnant toutefois l'important changement suivant: seules trois classes de nébulosité, communes à toutes les régions, sont désormais distinguées :

```
classe_0 : le plus souvent très nuageux
classe_1 : partiellement ensoleillé
classe_2 : en général ensoleillé.
```

A chaque région sont affectés un segment de la base de connaissance spécifiant les règles d'évaluation de la nébulosité propres à la région et un prédicat d'évaluation de ces règles :

```
nébul_valais(nébul),   nébul_jura(nébul),
nébul_plateau(nébul), nébul_préalpes(nébul)
```

La partition géographique conduit naturellement à une présentation graphique du résultat, également programmée en Prolog, exhibée à la figure 4.

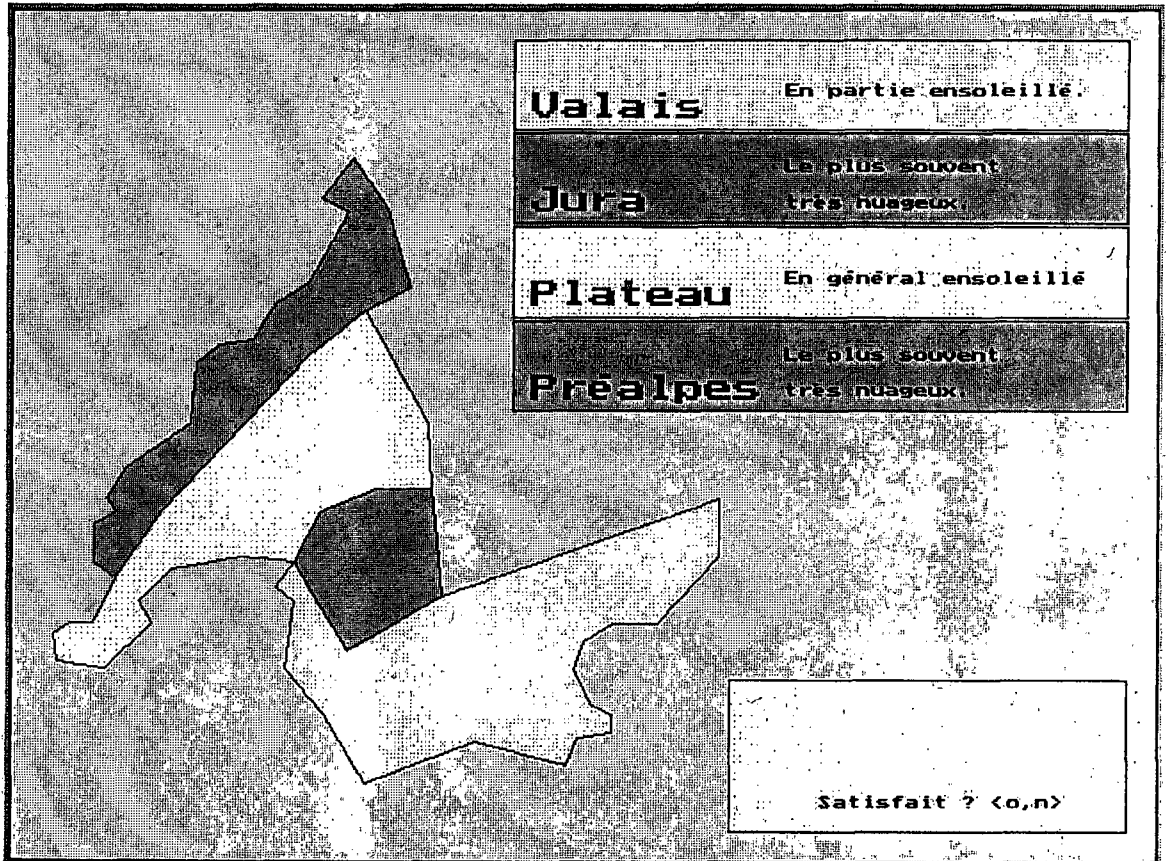


Figure 4.

Outre un bon nombre de prédicats techniques de gestion de l'écran, quatre prédicats graphiques sont introduits pour exposer les résultats :

```
colorie_valais(nébul), colorie_jura(nébul),
colorie_plateau(nébul), colorie_préalpes(nébul).
```

Tout le dispositif est à nouveau lancé par un prédicat *go* dont la simplicité est quasiment évangélique :

```
go:-
    nébul_valais(X),      nébul_jura(Y),
    nébul_plateau(Z),    nébul_préalpes(T),
    colorie_valais(X),   colorie_jura(Y),
    colorie_plateau(T),  colorie_préalpes(T).
```

Le chaînage arrière opère à partir des quatre prédicats d'évaluation de la nébulosité sur les quatre segments de la base de connaissance et attribue par unification aux variables *X*, *Y*, *Z*, *T* les classes de nébulosité choisies, assignant ainsi les coloriages et les textes correspondants, tels qu'ils sont présentés à la figure 4.

Les questions sont posées à l'opérateur sur un mode graphique, selon les figures 5 à 7, au fur et à mesure que les prédicats météorologiques correspondants sont évalués lors du parcours des segments de la base de connaissance. A nouveau, le stockage en base de faits dynamiques des prédicats météorologiques, ré-utilisés d'un segment à l'autre, assure que les questions ne sont posées qu'une fois.

Initialisation : **mardi** **20 novembre 90**

Choix de l'échéance de prévision

Echéances disponibles :

Echéance	24	h.	: frappe	1
Echéance	36	h.	: frappe	2
Echéance	48	h.	: frappe	3
Echéance	60	h.	: frappe	4
Echéance	72	h.	: frappe	5
Travail totalement manuel			: frappe	9

Figure 5.

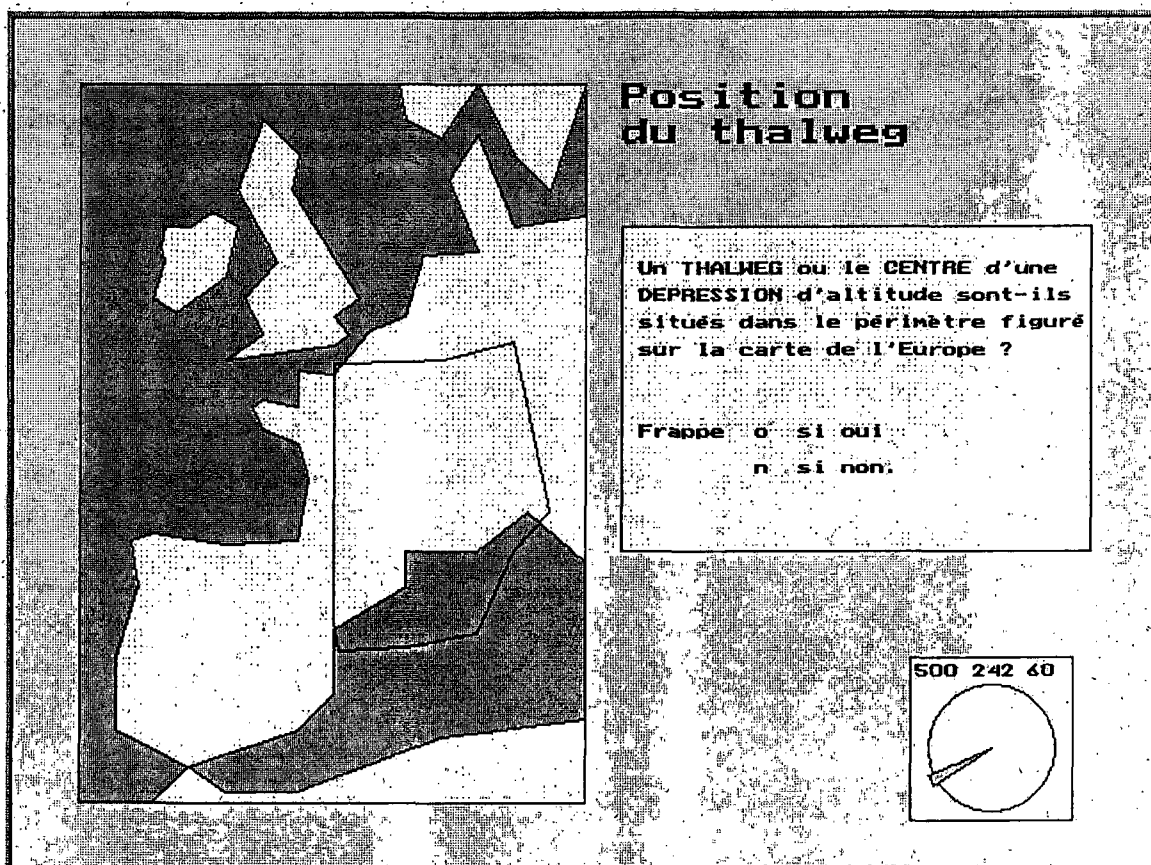


Figure 6.

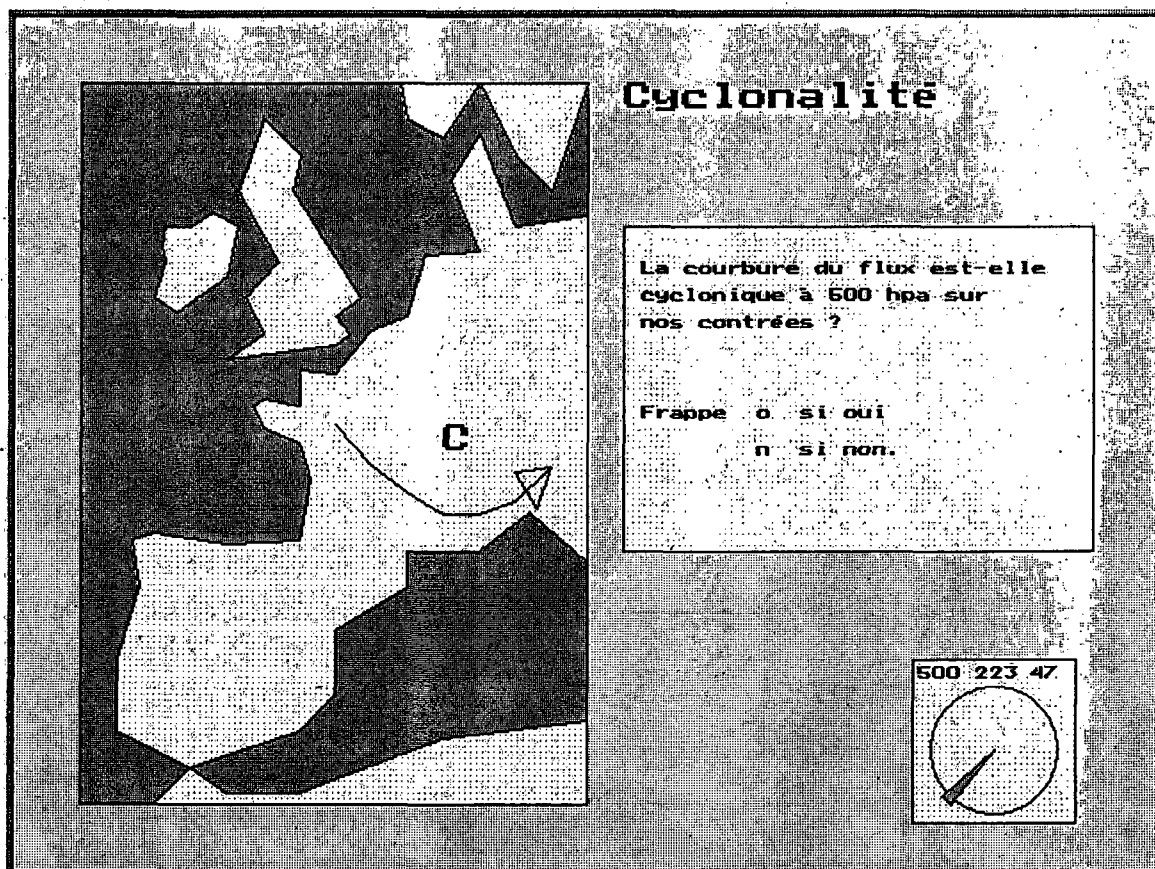


Figure 7.

Le vent prévu en force et direction à 500 hpa intervient de manière cruciale dans les règles développées par l'expert (cf annexe 1). Il est donc judicieux d'envisager un dispositif introduisant automatiquement ces valeurs dans la base de faits dynamiques à partir des champs prévus par un modèle numérique.

La solution choisie au CMG pour réaliser cette communication est basée sur l'exploitation des données numériques livrées en prévision par ECMWF et destinées initialement au dessin des TEMPs en prévision, selon le programme élaboré par Pierre Eckert.

La figure 8 présente le dispositif mis en place. Le fichier TEMPNE, acheminé au CMG depuis ECMWF/Reading, est utilisé d'une part pour le dessin du sondage en prévision, partie gauche de la figure, et d'autre part par un programme Pascal qui, à partir des données strictement numériques de ce fichier, élabore les prédicats Prolog correspondants et les accumule dans un nouveau fichier formant une base de faits dynamique externe accessible au système expert.

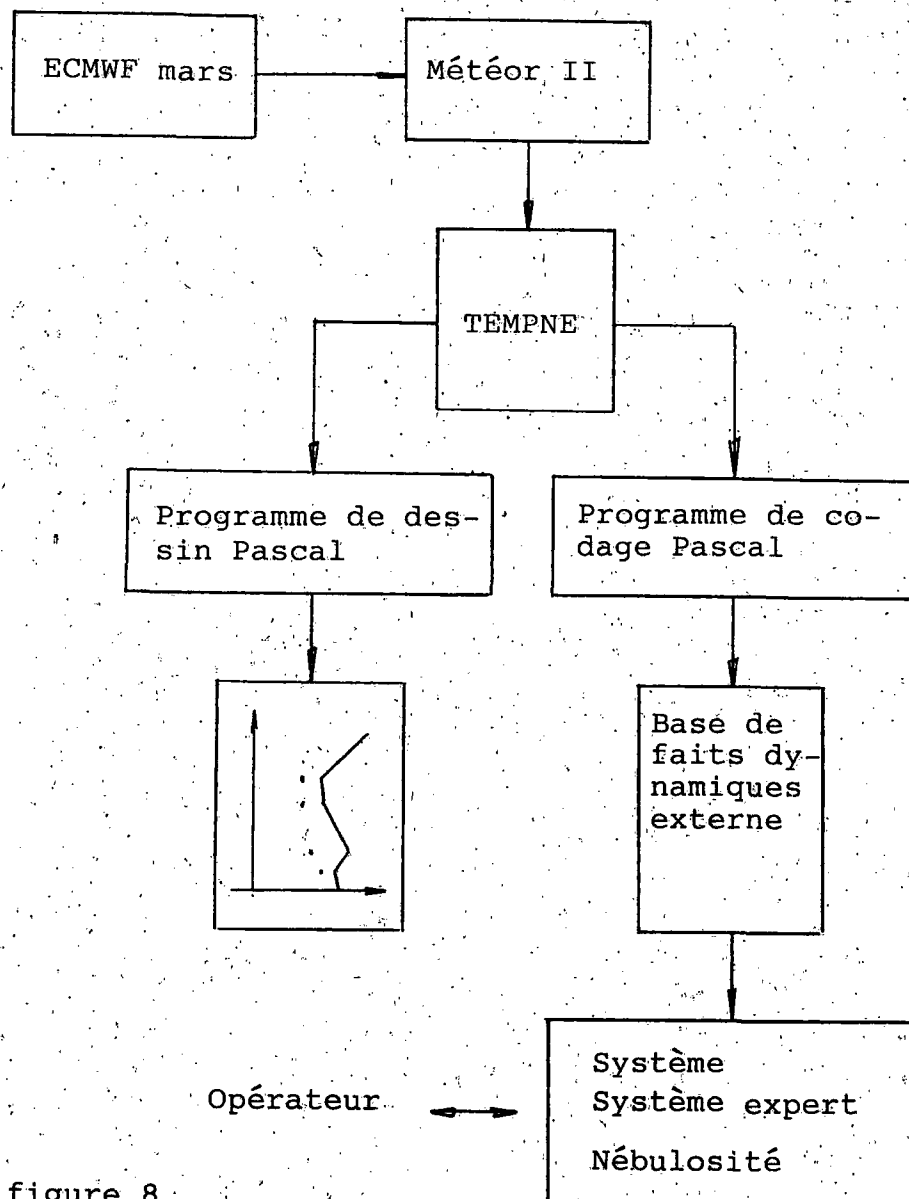


figure 8.

Un exemple de cette base externe est présenté ci-dessous.

```

initdbx(date(jeu, 22, nov, 90))
winddbx(24, 500, wind(194, 24))
winddbx(24, 700, wind(225, 8))
winddbx(24, 850, wind(307, 6))
neigdbx(24, 600, -3)
winddbx(36, 500, wind(277, 20))
winddbx(36, 700, wind(217, 18))
winddbx(36, 850, wind(178, 7))
neigdbx(36, 500, -4)
winddbx(48, 500, wind(241, 37))
winddbx(48, 700, wind(245, 29))
winddbx(48, 850, wind(172, 14))
neigdbx(48, 800, -3)
winddbx(60, 500, wind(197, 33))
winddbx(60, 700, wind(204, 25))
winddbx(60, 850, wind(146, 11))
neigdbx(60, 900, -2)
winddbx(72, 500, wind(187, 26))
winddbx(72, 700, wind(191, 18))
winddbx(72, 850, wind(146, 8))
neigdbx(72, 1200, 0)

```

Outre les valeurs du vent à 500 hpa, données en prévision à +24, +36, +48, +60 et +72 h, figurent les vents prévus aux mêmes échéances à 700 et 850 hpa, ainsi que les température à 850 hpa et les altitudes de la limite des chutes de neige calculées selon la règle empirique de Patrick Hächler (Annexe II).

Toutes ces informations sont exploitées par le système expert qui présente ainsi, en sus du diagnostic de nébulosité, des valeurs en prévision du vent à 850 et 700 hpa, une température à 850 hpa, et une estimation de la limite des chutes de neige. Les figures 9 et 10, parties a et b, illustrent l'application de tout le système à deux situations réelles.

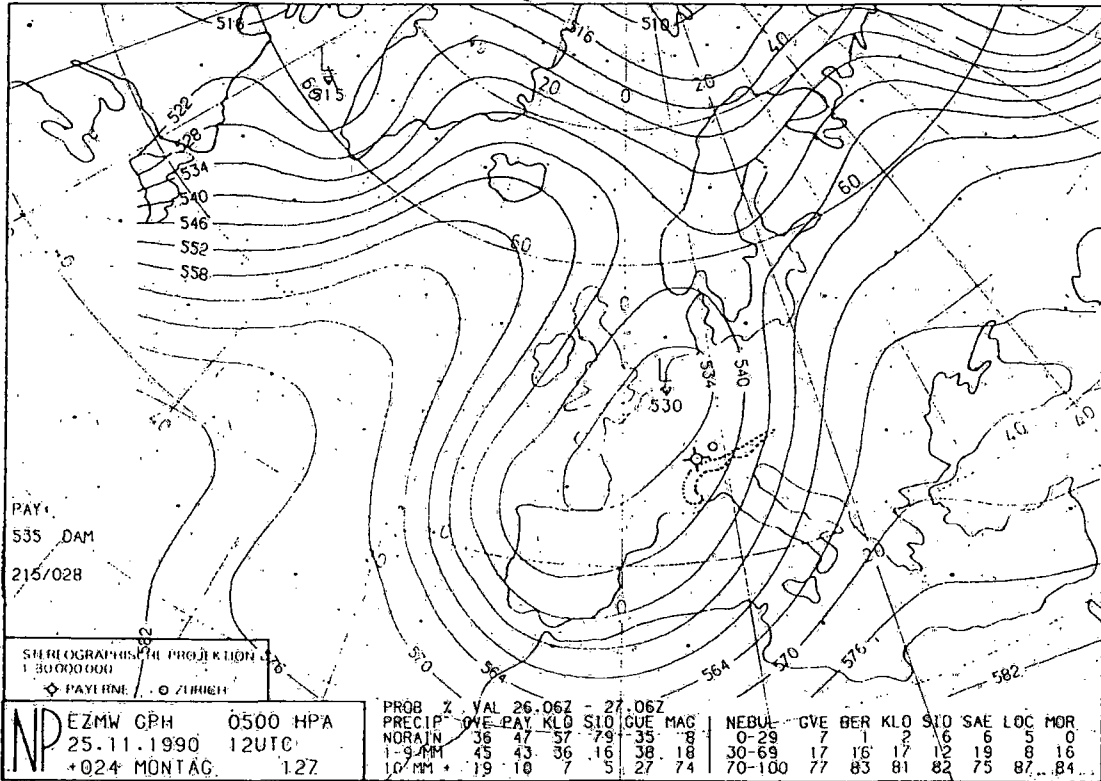


Figure 9.a.

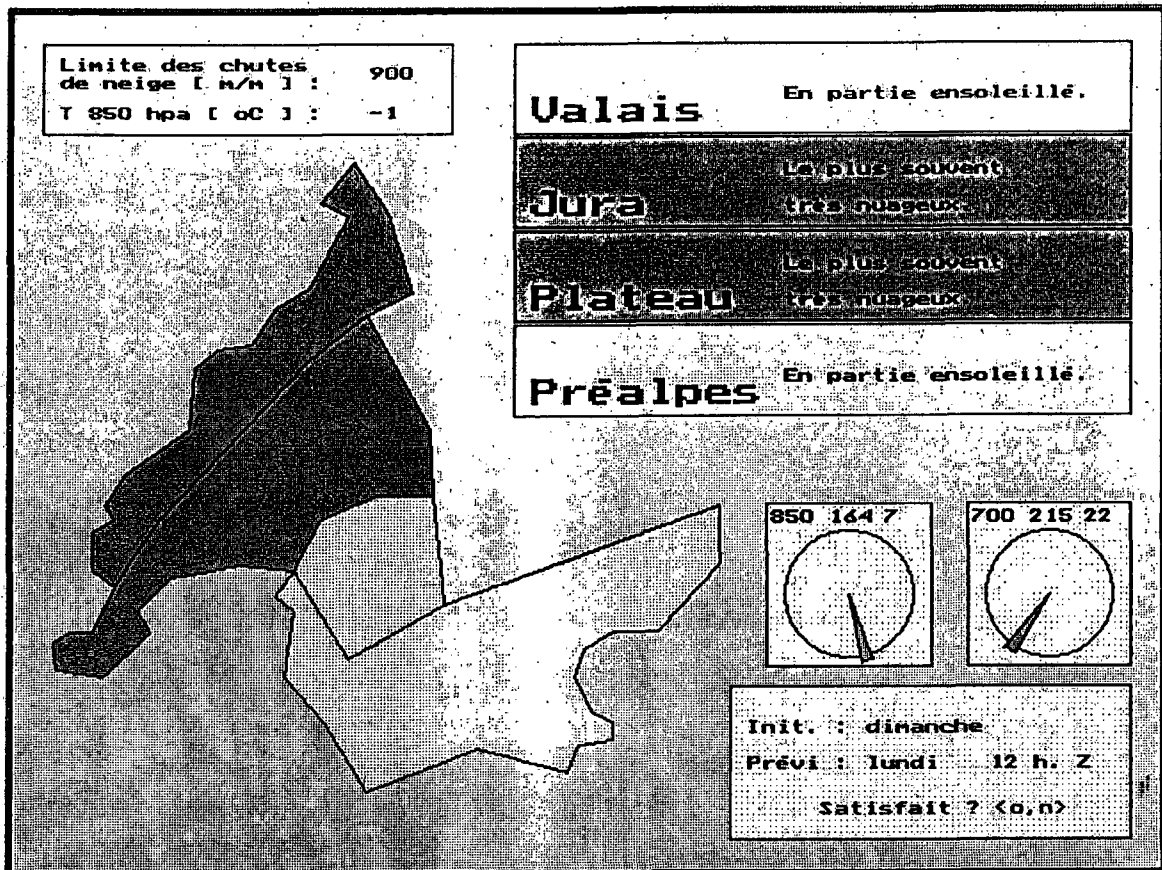


Figure 9.b.

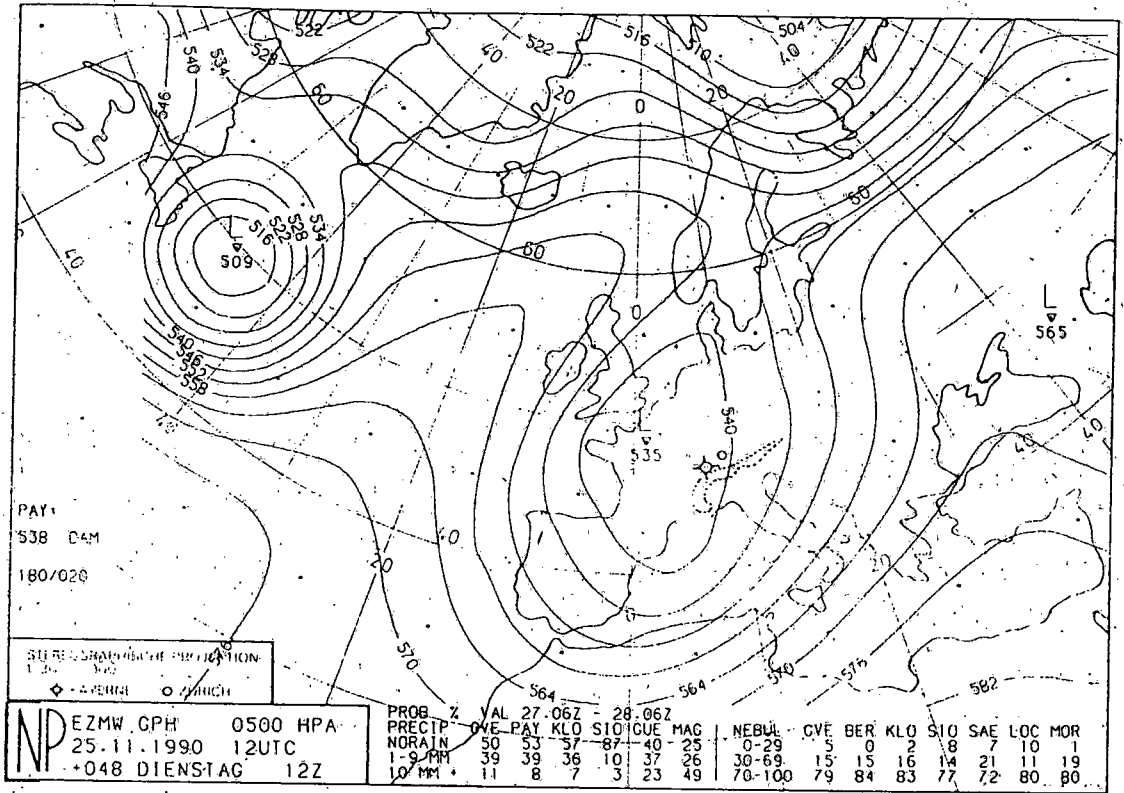


Figure 10.a.

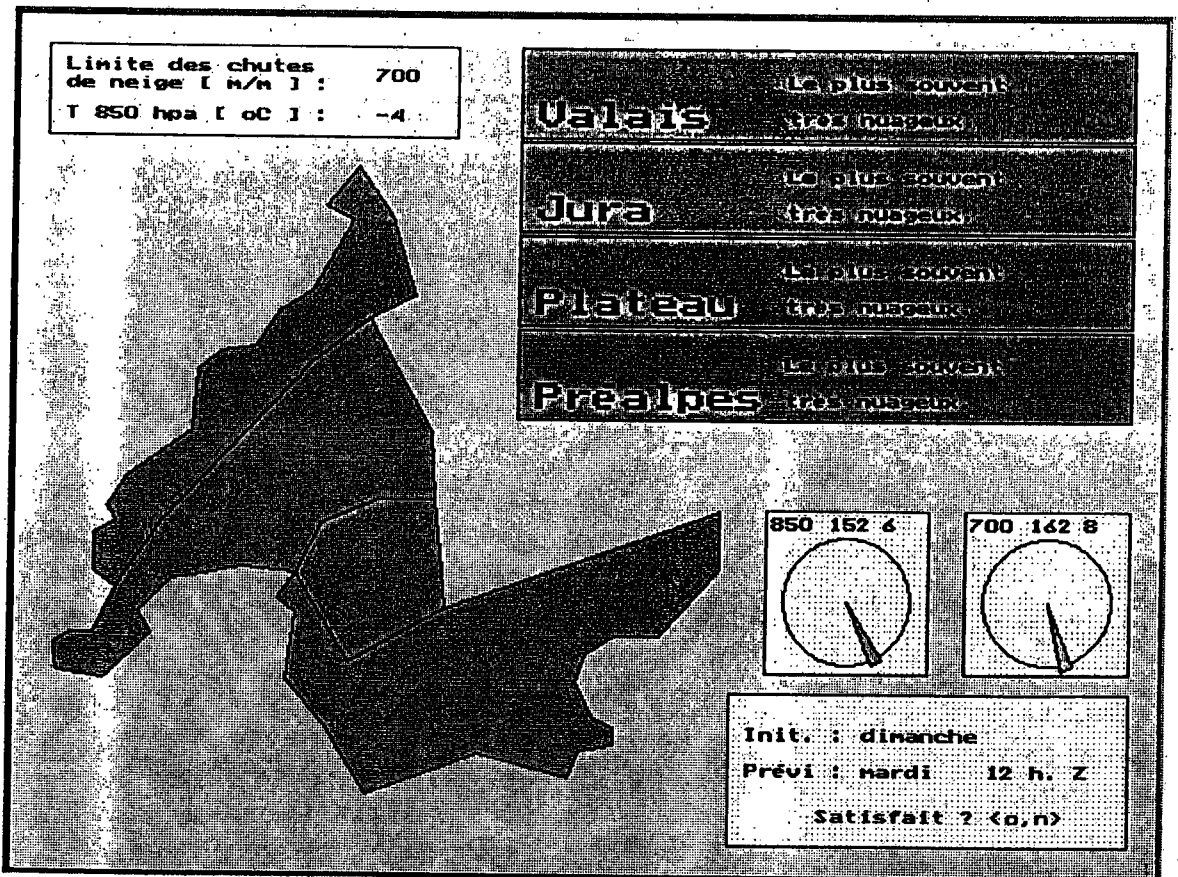


Figure 10.b.

De par l'interrogation automatique du fichier TEMPNE, tout le dispositif développé jusqu'ici représente un premier pas en direction du schéma idéal introduit à la figure 1. En revanche, du point de vue de la technique des systèmes experts, le programme Prolog est rudimentaire: à chaque règle de la base de connaissance ne correspond qu'une unique décision livrée sans nuance et, de surcroît, sans justification.

L'application suivante, présentée ci-dessous, est développée en tentant de pallier ces carences.

7. Décision hiérarchique avec justification : application à une prévision courte pour le vol à voile.

L'élaboration d'une prévision véli-vole est une tâche délicate dans le sens où doivent être croisés deux domaines de compétence, formés d'une part des exigences spécifiques au vol à voile, d'autre part des contingences habituelles à la prévision météorologique. Les références mentionnées éclairent l'ensemble du problème. Une fois encore, seul l'aspect logico-informatique est abordé ici, les contingences météorologico-véli-voles étant données dans les références.

La fonction du système expert présenté ici est de répondre à la question suivante :

"Demain sera t-il en Suisse romande une bonne journée pour le vol à voile ?"

La "Suisse romande" est ici essentiellement limitée au Bassin lémanique, au Jura suisse francophone, aux Préalpes, fribourgeoises inclues, et, de manière moins nette, à la partie occidentale du Valais, jusqu'au Col du Sanetch au nord, au bassin des Dranses au sud.

La qualité véli-vole d'une journée n'est pas une notion moins ambiguë. Dans le présent travail, elle est spécifiée en ne tenant compte que des possibilités de vol thermique, le vol d'onde n'étant pas considéré.

- . Une journée est qualifiée de MAUVAISE s'il n'est pas possible de rester au moins une heure en vol à voile thermique en rayon local d'un aérodrome de départ.
- . Elle est considérée comme DEFAVORABLE lorsque seuls des vols locaux d'une heure au moins peuvent être entrepris.
- . Elle est considérée comme FAVORABLE du moment que des vols de distance de l'ordre d'une à deux centaines de kilomètres sont réussis par les bons pilotes.
- . Elle est enfin qualifiée de BONNE si quelques bons pilotes parviennent à parcourir plusieurs centaines de kilomètres.

La décision est prise en procédant à trois diagnostics portant respectivement sur :

- . La situation générale prévue à 500 hpa, notée diagnostic global ci-après.
- . La structure verticale de l'atmosphère, évaluée à l'aide du sondage en prévision, appelée diagnostic local.
- . Quelques éléments d'observation correspondants au diagnostic d'observation.

A chaque diagnostic correspond une décision, exprimée dans l'échelle allant de Mauvais à Bon, élaborée dans les trois cas à partir d'une base de connaissance spécialisée prenant en compte les éléments suivants :

Pour le diagnostic global :

- . La direction du flux à 500 hpa: d'ouest, de nord-ouest, de nord, de nord-est, d'est, de sud-est, de sud, de sud-ouest.
- . La cyclonalité à 500 hpa: positive, négative, nulle.
- . L'origine de la masse d'air: Polaire maritime, polaire continentale, tropicale maritime, tropicale continentale.

La base de connaissance globale devrait être exhaustive, chaque combinaison d'une direction du flux à 500 hpa, d'un type de cyclonalité et d'une origine de masse d'air faisant l'objet d'une règle. Dans la réalité, nombre de combinaisons, telles que "flux du nord, masse d'air d'origine tropicale" sont impossibles. Le module de dialogue est donc programmé en sorte de ne poser à l'utilisateur que des questions relatives à l'origine de la masse d'air qui soient compatibles avec la direction du flux. Cette précaution permet non seulement de réduire le nombre de règles figurant dans la base de connaissance globale, elle garantit également la consistance météorologique des faits accumulés dans la base dynamique.

Le diagnostic local porte sur les éléments suivants :

- . L'intensité du vent prévu à 850 hpa.
- . L'écart moyen entre les points de rosée et de température entre 700 et 800 hpa.
- . L'écart entre la température maximum prévue et le maximum climatologique du mois courant en plaine.
- . Le gradient de température prévu entre le sol et 700 hpa.
- . Le QNH prévu.
- . L'occurrence éventuelle de précipitations frontales, non convectives, prévues par le modèle numérique.

Hormis les précipitations frontales, tous les critères intervenant au niveau local sont quantitatifs. A chaque critère quantitatif est donc affecté une modalité qualitative précisée dans le commentaire de la table ci-dessous :

Elément	domaine	commentaire
QNH	< 1016 hpa	trop bas
	∈ [1016,1024]	favorable
	> 1025	trop haut
Tmax	< Tmoy - 2 C	inférieur à la moyenne
	∈ [Tmoy-2, Tmoy+2]	dans la moyenne

	> Tmoy + 2 C	supérieur à la moyenne
W850	< 10 kt	inférieur à 10 noeuds
	∈ [10 kt, 20 kt]	compris entre 10 et 20 noeuds
	> 20 kt	supérieur à 20 noeuds
T_TD	< 5 C	trop humide
	∈ [5 C, 10 C]	relativement humide
	> 10 C	sèc
dT/dz	< 0.35 C/100m	médiocrement instable
	∈ [0.35, 0.75]	faiblement instable
	> 0.75 C/100m	instable

Une part de l'expertise, implicitement codée dans le choix des partitions, définit pour chaque élément le domaine de valeur dans lequel il est favorable au vol à voile.

Les règles figurant dans la base locale n'expriment donc qu'en termes strictement qualitatifs quelles sont, des éléments locaux, les combinaisons qui sont favorables au vol à voile.

Les commentaires associés aux partitions, stockés dans une table du programme, sont mis à contribution lors de l'élaboration du protocole de justification.

Le diagnostic d'observation porte sur les éléments suivants :

- . L'état du sol, pouvant être sec ou humide.
- . La visibilité en plaine, pouvant être inférieure ou supérieure à 12 km.
- . L'occurrence ou non de précipitations, pouvant être étendues ou isolées, au cours de la nuit précédant la journée sur laquelle porte la prévision.

Chaque diagnostic est établi par un dispositif Prolog analogue à celui qui est présenté aux paragraphes 4 et 5.

Le processus de décision proprement dit opère à partir de ces trois diagnostics, en tenant compte d'une hiérarchie arbitrairement choisie : Le diagnostic global reçoit le statut le plus élevé, suivi dans l'ordre des diagnostics locaux et d'observation.

La première décision, notée D1, compose les diagnostics portant sur les éléments globaux et locaux en appliquant la règle ci-dessous :

		!	Global			
		!	MVS	DEF	FAV	BON
D1(G,L)		!	MVS	DEF	FAV	BON
	-----		-----	-----	-----	-----
Local	MVS	!	MVS	MVS	MVS	DEF
	DEF	!	MVS	MVS	DEF	FAV
	FAV	!	MVS	DEF	FAV	BON
	BON	!	DEF	FAV	BON	BON

Cette règle pénalise de deux points le diagnostic global si le diagnostic local est mauvais, d'un point s'il est défavorable.

Un diagnostic local favorable laisse invariant le diagnostic global. Enfin, un bon diagnostic local améliore d'un point le verdict global.

La décision D2 compose ensuite D1 avec le diagnostic portant sur l'observation :

D2(O, D1(G,L))		D1(G,L)			
		MVS	DEF	FAV	BON
Obs.	MVS	MVS	MVS	DEF	FAV
	DEF	MVS	DEF	FAV	BON
	FAV	MVS	DEF	FAV	BON
	BON	MVS	DEF	FAV	BON

L'effet de l'observation, bénin, ne consiste qu'à pénaliser d'un point la première décision dans le seul cas où les éléments d'observation sont mauvais.

La hiérarchie des diagnostics n'est pas uniquement produite par la séquence d'évaluation des règles de décision. Alors que le faible effet de la règle D2 place naturellement le diagnostic d'observation au bas de l'échelle, la relation entre les diagnostics globaux et locaux est choisie en sorte de minimiser le problème, déjà évoqué, du produit cartésien des catégories.

Le produit cartésien de toutes les catégories envisagées au niveau local constitue en effet un vaste domaine de recherche pour lequel chaque combinaison devrait faire l'objet d'une règle inscrite dans la base de connaissance locale.

L'examen des règles météorologiques et des contraintes véli-voles associées fait apparaître qu'il est relativement aisé de distinguer des conditions extrêmes, soit nettement favorables au vol à voile, soit au contraire nettement défavorables, et qu'elles sont de surcroît peu nombreuses. A contrario, les situations simplement favorables sont diverses, peu typées et nombreuses.

Tirer parti de cette observation revient à décrire aussi scrupuleusement que possible les situations mauvaises, défavorables et bonnes dans la base de connaissance locale, en omettant sciemment toutes les combinaisons jugées favorables. La clause *diagnostic_local(nil)*, terminant la base locale (voir fin du paragraphe 4), est alors remplacée par la clause *diagnostic_local(favorable)* choisie par défaut lorsque aucune situation typée n'est détectée.

L'examen de la table associée à la règle D1 éclaire alors la relation de hiérarchie établie entre les deux niveaux globaux et locaux: Seuls un diagnostic local bien typé a une incidence sur la décision D1, un diagnostic local favorable laissant simplement invariant le diagnostic global qui devient alors déterminant.

8. Justification et évaluation quantitative d'une décision.

Les techniques quantitatives consistent à attribuer à chaque règle de la base de connaissance un poids, assimilé à la confiance que l'expert attribue à la règle, ceci lors de la phase d'élaboration du système.

Un second système de poids, portant sur la confiance que l'utilisateur accorde à ses réponses peut être envisagé. Il est mis en oeuvre en phase d'utilisation du système.

Une fonction d'évaluation de la qualité de la décision, monotone croissante, est introduite. Lors d'une évaluation par chaînage arrière, les poids affectés par l'opérateur à ses réponses ainsi que les poids associés aux règles, sont cumulés par cette fonction, qui livre finalement un poids associé à tout le diagnostic, et qui peut être interprété comme un degré de confiance. Ainsi conçu, un tel dispositif ne justifie cependant pas son diagnostic.

Dans le cadre du présent travail, une justification est élaborée en utilisant les faits accumulés dans la base dynamique, dont un exemple est présenté ci-dessous :

```

cyclodba(anticyclonique)
fluxdba(ouest)
origindba(polaire_maritime)
windba(kt_ms_10,nw_n_ne)
t_tddba(ttd_pse10)
tmaxdba(sup_moyenne,28)
labildba(forte)
pprevdba(non)
qnhdba(bon)
moisdba(juin)
visidba(supe_12km)
shumdba(non)
probsdba(non,nil)
diag_globdba(bon)
diag_locadba(bon)
diag_obsedba(bon)
diag_vélibdba(bon)

```

Fort de ces éléments, un simple prédicat de rédaction élabore le message exhibé à la figure 11 en présentant, avant chacun des trois diagnostics, les faits accumulés dans la base dynamique ayant contribué au diagnostic. Les commentaires figurant dans le tableau, associés aux faits, sont utilisés à cette fin. De plus, un certain nombre de diagnostics portant sur des éléments typiques du temps défavorables pour le vol à voile en Romandie, son établis. Ils portent sur :

- . La présence d'une inversion de température.
- . L'occurrence probable d'orages pré-frontaux dans un régime de sud-ouest.
- . Le foehn du sud.
- . Le retour d'est produit par une dépression centrée au sud des Alpes.
- . La forte bise.

Dans la version actuelle du programme, ces diagnostics n'interviennent pas dans les processus de décision D1 et D2 conduisant à l'élaboration du verdict final, ils ne sont utilisés que pour compléter, s'il y a lieu, la justification livrée au consultant.

L'ensemble du dispositif, fortement schématisé, est présenté à la figure 12.

C M G PREVISION COURTE POUR LE VOL A VOILE

Flux anticyclonique d'ouest.
 Masse d'air d'origine maritime polaire.
 Diagnostic bon pour la prévision générale.
 Vents prévus à 1500 m. d'altitude du secteur :
 nord-ouest à nord-est, inférieurs à 10 kt.
 Température prévue supérieure à la moyenne.
 Masse d'air sèche instable.
 QNH favorable
 Diagnostic bon pour la prévision locale.
 Sol sec.
 Bonne visibilité.
 Diagnostic bon pour les éléments d'observation.

Le verdict global est bon pour le vol à voile.

Satisfait <oui,non> ?

Figure 11.

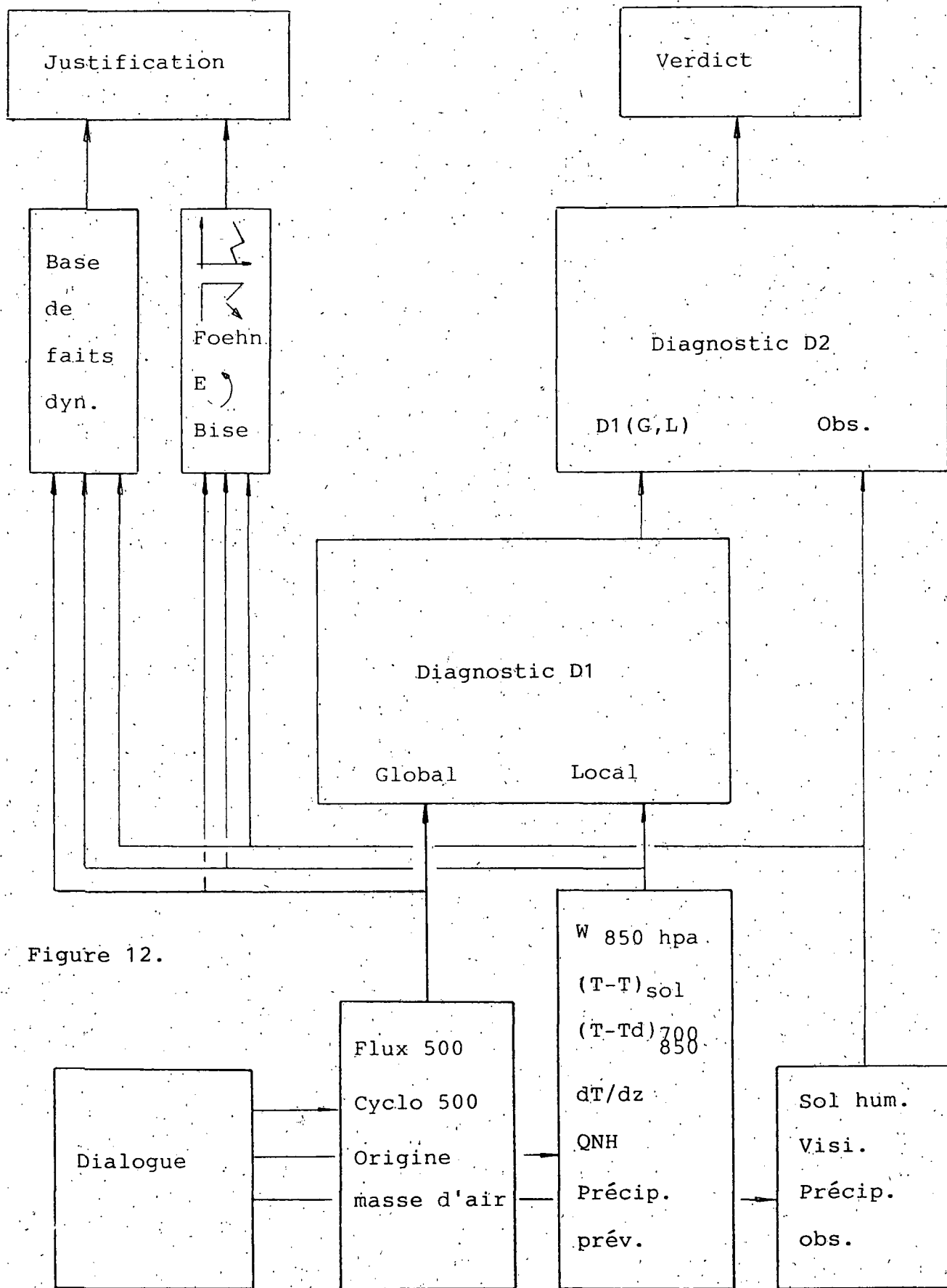


Figure 12.

L'évaluation de la qualité du diagnostic établi, conduite dès l'été 1990, s'est avérée difficile, essentiellement par manque de feedback des vélivoles. Elle sera reconduite et systématisée en 1991. Il apparaît cependant déjà que les règles choisies sont sévères, ceci pour les trois diagnostics globaux, locaux et d'observation, le système ayant tendance à ne détecter que les bonnes situations. Enfin, l'examen des erreurs de diagnostic fait apparaître que ce sont le plus souvent les évolutions rapides qui mettent le système en défaut.

9. Conclusion: quelle relation homme-machine ?

Répondre exhaustivement à une telle question dépasse le cadre du présent travail. Le lecteur intéressé est invité à consulter l'ouvrage "Knowledge, skill and artificial intelligence" de Bo Göranzon et Ingela Josefson, qui nous a inspiré. Bornons nous ici à ne mentionner que quelques traits qui, tout en relevant le plus souvent du sens commun, ont guidé notre démarche.

Le cerveau humain est incroyablement apte à reconnaître des "formes", pouvant apparaître dans des conditions très subtiles et diverses : éléments d'un paysage, visages connus, mélodies, textures de matériaux, odeurs, ...

Cette aptitude, le météorologiste en fait un usage constant lorsqu'il examine des cartes, actuelles ou en prévision, des images radar et satellite. Il développe d'ailleurs au cours de sa carrière une "mémoire des configurations" dans laquelle interviennent des notions relatives aux biais systématiques des instruments d'observation qu'il utilise, outre toute une foule de critères scientifiques, parfois intuitifs et personnels.

Il est clair qu'aucun système artificiel aussi simple que ceux qui sont envisagés ici ne parvient à égaler le météorologiste dans l'ensemble de ces aptitudes. C'est ce constat d'impuissance qui nous a conduit à formuler les questions selon les figures 6 et 7, en laissant de fait à l'homme la responsabilité de reconnaître les morphologies typiques. Un esprit chagrin serait d'ailleurs enclin à affirmer que la seule activité intelligente, reconnaître les morphologies, est assumée par l'homme, la machine n'étant astreinte qu'à trier des cas ...

Une perspective est ouverte, en matière de reconnaissance automatique des formes, par les réseaux de neurones formels. Ces dispositifs, dotés d'une faculté d'apprentissage, pourraient être utilisés pour traiter les données émanant entre autres des radars et des satellites. Ils alimenteraient ainsi directement les bases de faits dynamiques de systèmes conventionnels.

La machine, à savoir ici le système expert, possède quelques qualités ne pouvant être éludées :

La base de connaissance, une fois établie, est exploitée de manière exhaustive selon un schéma de décision qui, n'étant affecté ni par la fatigue, ni par le stress, garantit une certaine constance des performances du système.

De plus, la base de connaissance, considérée comme une archive dynamique du savoir-faire, des connaissances personnelles de l'expert humain, peut être suffisamment riche pour que le système soit à même de livrer une justification du diagnostic proposé.

L'utilisateur peut alors, à l'usage, espérer acquérir une certaine part de l'expertise codifiée dans le système, ce dernier assumant une fonction de transmission de la connaissance, de formation. L'erreur, de ce point de vue, consisterait à accorder une confiance exagérée au résultat livré par la "machine", en perdant tout sens critique.

Enfin, dans le cadre d'un service où plusieurs collaborateurs consultent un système expert, celui-ci joue de facto un rôle d'unification entre leurs méthodes de travail et leurs prestations.

Pour ce qui concerne la politique de distribution des Services de prévision de l'Institut Suisse de Météorologie, traditionnellement, seuls des bulletins de prévisions sont livrés aux utilisateurs.

A l'avenir, avec l'extension des moyens de diffusions d'informations météorologiques (Vidéotex, Nagrafax, Météotel,...), on peut se demander si, non content de livrer des prévisions, l'Institut ne mettrait pas ses compétences propres dans les mains de ses clients, sous forme de systèmes experts ?

10. Références.

Outils logiques pour l'intelligence artificielle.

J.- P. Delahaye
Editions Eyrolles 1987

Expert Systems, Artificial Intelligence in Business.

Paul Harmon and David King 1985
Wiley Press

Building Expert Systems

Frederick Hayes-Roth, Donald A. Waterman,
Douglas B. Lenat. 1983
Addison Wesley

Cours de Prolog avec Turbo Prolog.

J.- P. Delahaye, 1988
Editions Eyrolles

Turbo Prolog Applications.

Carl Townsend 1988
Sybex editions

Knowledge, Skill and Artificial Intelligence.

Bo Göranzon and Ingela Josefson, 1988
Springer Verlag

Décider sur plusieurs critères.

Alain Schärliq, 1985
Presses Polytechniques Romandes

Prévision d'ensoleillement en Suisse Romande.

Yves Ganter 1991
Rapport de travail de l'Institut Suisse de Météorologie.
A paraître.

Handbuch für die Segelflugprognose.

Gaudenz Truog, Juli 1979
Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen
Zentralanstalt
Rapport n. 88.

Contribution à l'étude des situations météorologiques
favorables au vol à voile de distance en Suisse.

Jacques Ambühl, Claude Amiguet, Jérôme Faist
Août 1985

Rapport de travail de l'Institut Suisse de Météorologie.
Rapport n. 132.

Annexe 1. Règles de prévision de l'ensoleillement.

Le rapport de travail portant sur la prévision de l'ensoleillement en Suisse romande (Ganter 1991), mentionné dans les références, décrit le développement des arbres exhibés ci-après.

L'échantillon de développement prend en compte l'ensoleillement journalier des années 1988-1989 sur les régions suivantes : Valais, Jura, Plateau, Chablais et Ouest des Préalpes. Il est divisé en deux parties : hiver et été. Les jours de brouillard et de stratus sont retranchés.

Les trois classes d'ensoleillement/nébulosité distinguées sont les suivantes :

classe	expression OPKO	ensoleillement
0	le plus souvent très nuageux.	0 - 30 %
1	en partie ensoleillé	31 - 60 %
2	en général ensoleillé	61 - 100 %

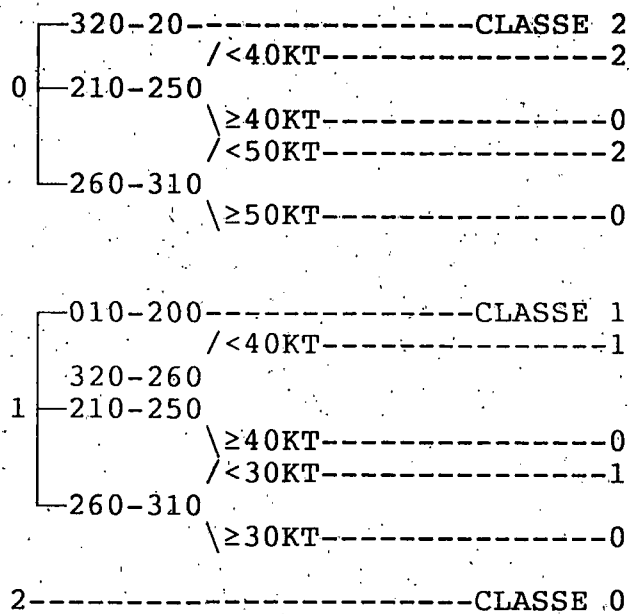
Trois types de circulation sont retenus, évalués à 500 hpa dans la zone comprise entre 0-10 degrés de longitude est et 40-50 degrés de latitude nord représentée à la figure 6 :

- courant rectiligne ou anticyclonique (0)
- courant cyclonique (1)
- thalweg ou centre dépressionnaire (2)

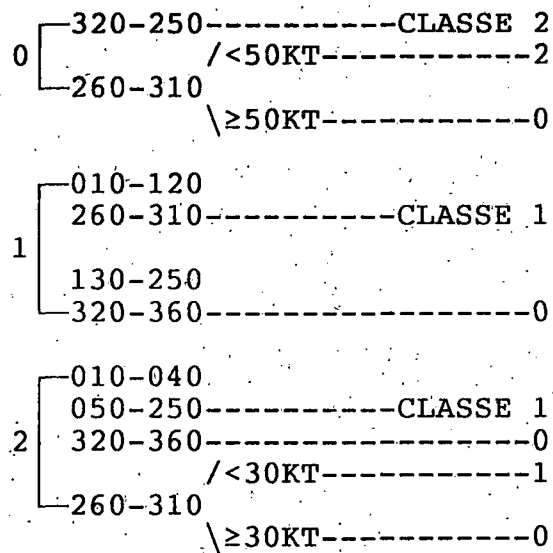
Le vent soufflant à 500 hpa est pris en compte conformément aux critères figurant sur les arbres.

REGION 1 (VALAIS)

HIVER

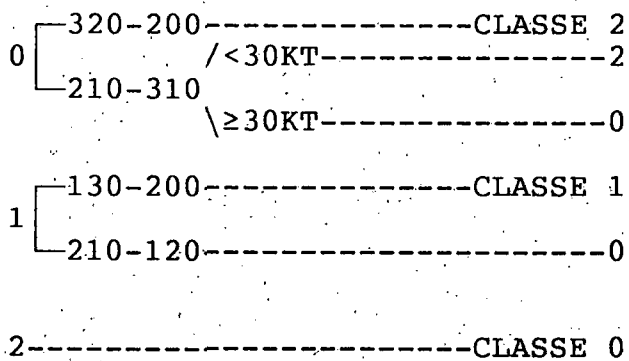


ETE

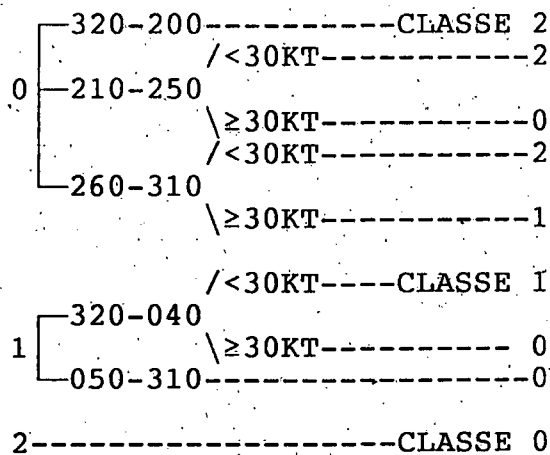


REGION 2 (JURA)

HIVER



ETE



REGION 3 (PLATEAU)

HIVER

0 { 320-200-----CLASSE 2
 /<40KT-----2
 210-310
 \≥40KT-----0
 1-----CLASSE 0
 2-----CLASSE 0

ETE

0 { 320-200-----CLASSE 2
 /<30KT-----2
 210-250
 \≥30KT-----1
 /<40KT-----2
 260-310
 \≥40KT-----0
 /<30KT----CLASSE 2
 1 { 320-200
 \≥30KT-----1
 /<30KT-----1
 210-250
 \≥30KT-----0
 260-310-----0
 2
 CLASSE 0

REGION 4 (CHABLAIS PREALPES)

HIVER

0 { 320-200-----CLASSE 2
 /<40KT-----2
 210-310
 \≥40KT-----0
 1 { 010-200-----CLASSE 1
 /<40KT-----1
 210-250
 \≥40KT-----0
 260-360-----0
 2-----CLASSE 0

ETE

0 { 320-250-----CLASSE 2
 /<50KT-----2
 260-310
 \≥50KT-----0
 1-----CLASSE 0
 2-----CLASSE 0

Annexe 2. Calcul de la limite des chutes de neige.

Patrick Hächler, météorologue à la Landeswetterzentrale SMA, Zürich, a élaboré sur une base statistique une méthode simple permettant d'évaluer l'altitude de la limite des chutes de neige sur le Jura, le Plateau et le nord des Alpes, donnée par l'expression suivante :

$$H = (Z - 400) + T + 9.3$$

où :

- . H est l'altitude de la limite des chutes de neige, exprimée en hectomètres au dessus du niveau de la mer.
- . Z est l'épaisseur de la couche 850 - 500 hpa, exprimée en décamètres.
- . T est la température à 850 hpa, exprimée en degrés Celsius.

Communication personnelle, 1988.

Adresse de l'auteur : Jacques Ambühl
Centre Météorologique
Case Postale 312
1215 Genève 15

