

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

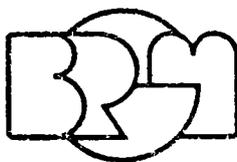
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél. : (38) 63.80.01

GESTION DE LA NAPPE PHREATIQUE
DE LA PLAINE D'ALSACE
AU MOYEN DE MODELES DE SIMULATION

12 FEVRIER 1979

J.P. VANÇON



Service géologique régional ALSACE

204, route de Schirmeck, 67200 Strasbourg - Tél. : (88) 30.12.62

RESUME

Dans le cadre de l'étude de l'aquifère de la plaine du Rhin, un outil complet de gestion des ressources en eau souterraine a été mis au point.

Il comporte :

- les fichiers de données hydrogéologiques
- la cartographie automatique permettant une meilleure mise en valeur des informations et une liaison aisée avec les modèles.
- les modèles proprement dits : le modèle hydrodynamique VAL et le modèle chimique récemment mis au point.
- le fichier des modèles, facilitant leur réutilisation à tout moment.

Cet outil de gestion est implanté au Service Géologique Régional Alsace. Il a été créé sous les auspices de la Commission Interministérielle d'Etude de la Nappe Phréatique de la Plaine d'Alsace.

1 - INTRODUCTION

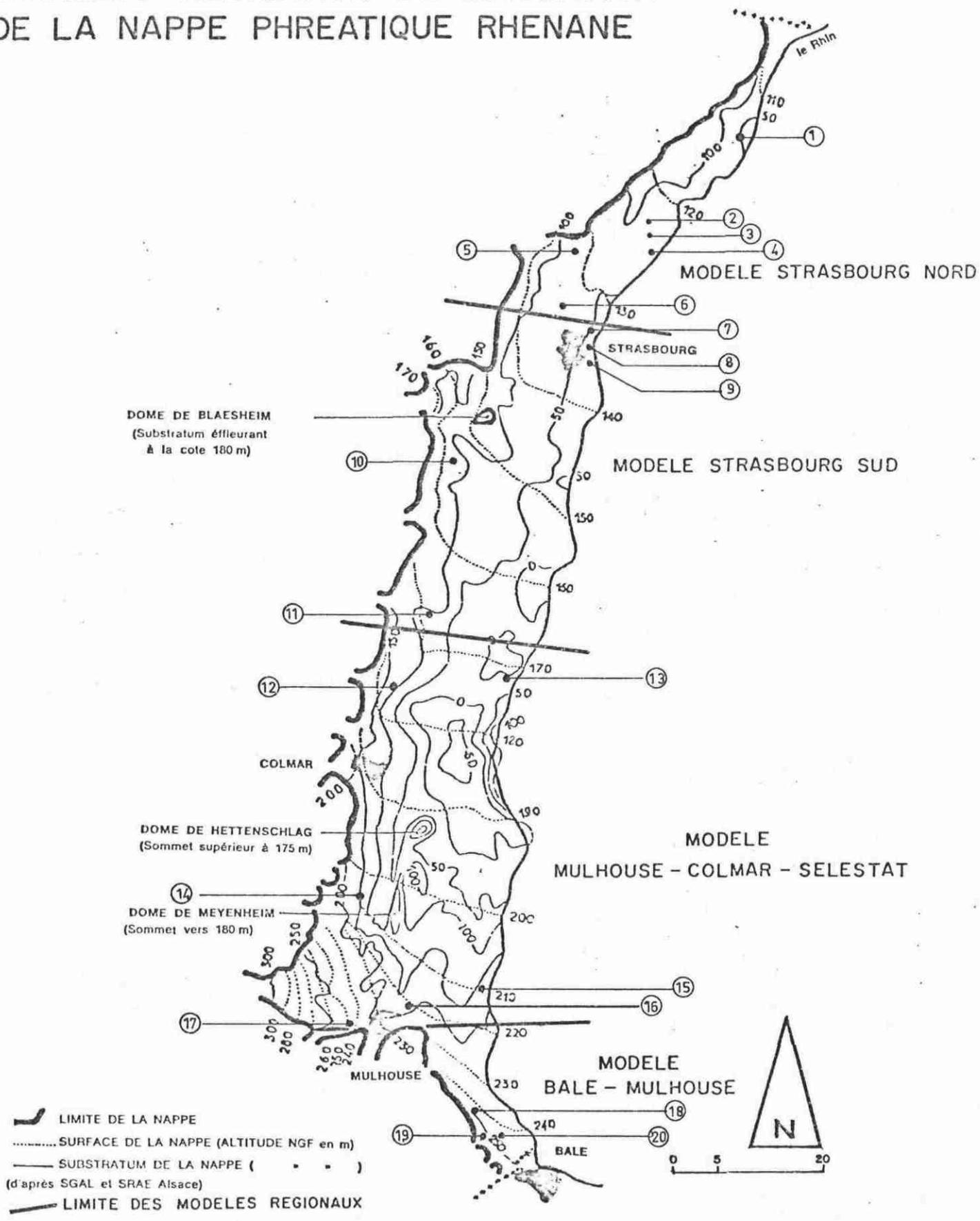
Le remplissage alluvionnaire qui couvre l'ensemble de la Plaine d'Alsace constitue un réservoir aquifère très important : c'est la nappe phréatique rhénane, qui s'étend sur 4.500 Km², dont 3.000 Km² en territoire français, avec une épaisseur qui peut atteindre 250 mètres et qui dépasse généralement 80 à 100 mètres. Les nombreuses études réalisées sur cet aquifère ont permis d'accumuler une masse considérable de renseignements. L'ensemble des données chiffrées ont été mises sur support informatique: on compte ainsi près de 700.000 mesures réparties sur 6.000 points d'observation.

Ces travaux ont permis de simuler sur modèle le comportement hydrodynamique de l'aquifère. Dans un premier temps, la Commission Interministérielle d'Etude de la Nappe Phréatique de la Plaine d'Alsace, qui groupe les services publics intéressés et les collectivités locales, a financé la mise en oeuvre de modèles à l'échelon régional, permettant d'étudier l'aquifère dans ses grandes lignes. Quatre modèles "régionaux" ont été ainsi réalisés, correspondant au découpage de la plaine en quatre secteurs, du Nord au Sud (cf. fig. 1) .

- 1) Strasbourg - Lauterbourg (Strasbourg Nord), dont le maillage est constitué de 1.650 éléments carrés de 500 mètres de côté, ce qui représente environ 410 Km².
- 2) Sélestat - Strasbourg (Strasbourg Sud) : 962 mailles carrés de 1 Km de côté.
- 3) Mulhouse - Colmar - Sélestat : 1.256 mailles carrés de 1 Km de côté.
- 4) Bâle - Mulhouse : 744 mailles carrés de 500 mètres de côté, soit environ 185 Km².

Pris individuellement, les problèmes d'exploitation de la nappe phréatique rhénane requièrent la mise en place de modèles de détail couvrant un secteur souvent très localisé. Selon le cas, ces travaux sont effectués à la demande des services publics, des collectivités, ou des particuliers,

MODELES REGIONAUX DE SIMULATION DE LA NAPPE PHREATIQUE RHENANE



— LIMITE DE LA NAPPE
 SURFACE DE LA NAPPE (ALTITUDE NGF en m)
 - - - - - SUBSTRATUM DE LA NAPPE (- - - -)
 (d'après SGAL et SRAE Alsace)
 — LIMITE DES MODELES REGIONAUX

TABLEAU DES ETUDES DE DETAIL

(LEGENDE DE LA NUMEROTATION Fig. 1)

Coordonnées		Numéro	Désignation de l'étude
ligne	colonne		
8	17	1.	BARRAGE D'IFFEZHEIM
12	15	2.	RAFFINERIE DE DRUSENHEIM
13	15	3.	HERRLISHEIM-OFFENDORF
14	15	4.	BARRAGE DE GAMBSHEIM
14	11	5.	NAPPE DU PLIOCENE
18	10	6.	RAFFINERIE DE REICHSTETT
20	12	7.	CANAL DE DRAINAGE DE LA ROBERTSAU
21	12	8.	SECTEUR NORD PORT DE STRASBOURG
22	12	9.	LA CELLULOSE
28	6	10.	OBERNAI
36	7	11.	SELESTAT
42	6	12.	RIBEAUVILLE
41	12	13.	MARCKOLSHEIM
53	7	14.	LANGUE SALEE DE BOLLWILLER
57	15	15.	CHALAMPE
58	12	16.	PEUGEOT-MULHOUSE
61	7	17.	VALLEE DE LA DOLLER
63	15	18.	BARTENHEIM-SIERENTZ
64	15	19.	ETUDE SYNDICAT DE ST-LOUIS
64	16	20.	FABYLONE

essentiellement les industriels. Un maillage fin, adapté au problème posé, est implanté au droit du secteur à étudier. Il est inséré dans le modèle régional à grandes mailles, qui constitue ainsi son environnement hydrogéologique (cf. numérotation sur la figure 1 et tableau annexé).

L'outil de modélisation mis au point progressivement à Strasbourg (chaîne de programmes VAL) s'intègre parmi les moyens informatiques déployés pour l'étude et la gestion de la nappe phréatique rhénane. Il est bien adapté au contexte local mais peut être transposé facilement dans d'autres régions, comme le démontre l'expérience acquise en Lorraine (nappe des grès du Trias inférieur) ou à l'étranger (Pérou, Jordanie, Mexique, etc ...).

Récemment un nouvel outil a été mis au point, permettant de répondre avec plus de précision à certains problèmes de qualité des eaux : il s'agit d'un modèle de calcul de la propagation de la pollution (modèle chimique).

2. HISTORIQUE DE L'EVOLUTION DES TECHNIQUES DE MODELISATION

Deux techniques ont été utilisées concurrentiellement dès l'origine : les modèles analogiques électriques et les modèles mathématiques. Compte tenu de l'évolution respective de ces deux techniques et dans le but de mettre en oeuvre celle qui est devenue progressivement la plus fiable et la plus facile d'emploi, le SGAL s'est tourné peu à peu essentiellement vers les modèles mathématiques pour traiter les problèmes de gestion des eaux souterraines.

A l'origine, le modèle mathématique était utilisé de préférence en régime permanent, compte tenu de la plus grande facilité de modification des données lors des opérations d'étalonnage. Le modèle analogique était utilisé systématiquement en régime transitoire, essentiellement à cause de la longueur des temps de calcul sur ordinateur.

Puis, peu à peu, chacune des deux techniques a évolué. Le couplage des modèles analogiques avec l'ordinateur a permis de faciliter une partie des opérations d'entrée - sortie. Parallèlement, les modèles mathématiques se sont peu à peu perfectionnés dans un certain nombre de directions :

- diminution progressive des temps de calcul,
- amélioration des opérations d'entrée des données, avec mise au point de la liaison fichiers - modèles.
- mise en forme automatisée des résultats avec tracé de documents sophistiqués.
- utilisation de schémas difficiles ou impossibles à mettre en oeuvre avec la technique analogique (cas des nappes libres et à présent du modèle chimique).
- possibilité d'archiver dans de bonnes conditions l'ensemble des données et des résultats de chaque modèle.

Dans ces conditions, les techniques numériques ont pris un très net avantage et sont utilisées dans la grande majorité des cas pour les modèles de gestion des eaux souterraines.

Néanmoins, la technique des modèles analogiques électriques (résistances-capacités), reste un outil opérationnel au SGAL, en particulier pour les problèmes de génie civil d'assèchement de fouille nécessitant la mise en oeuvre d'une représentation tridimensionnelle de l'aquifère.

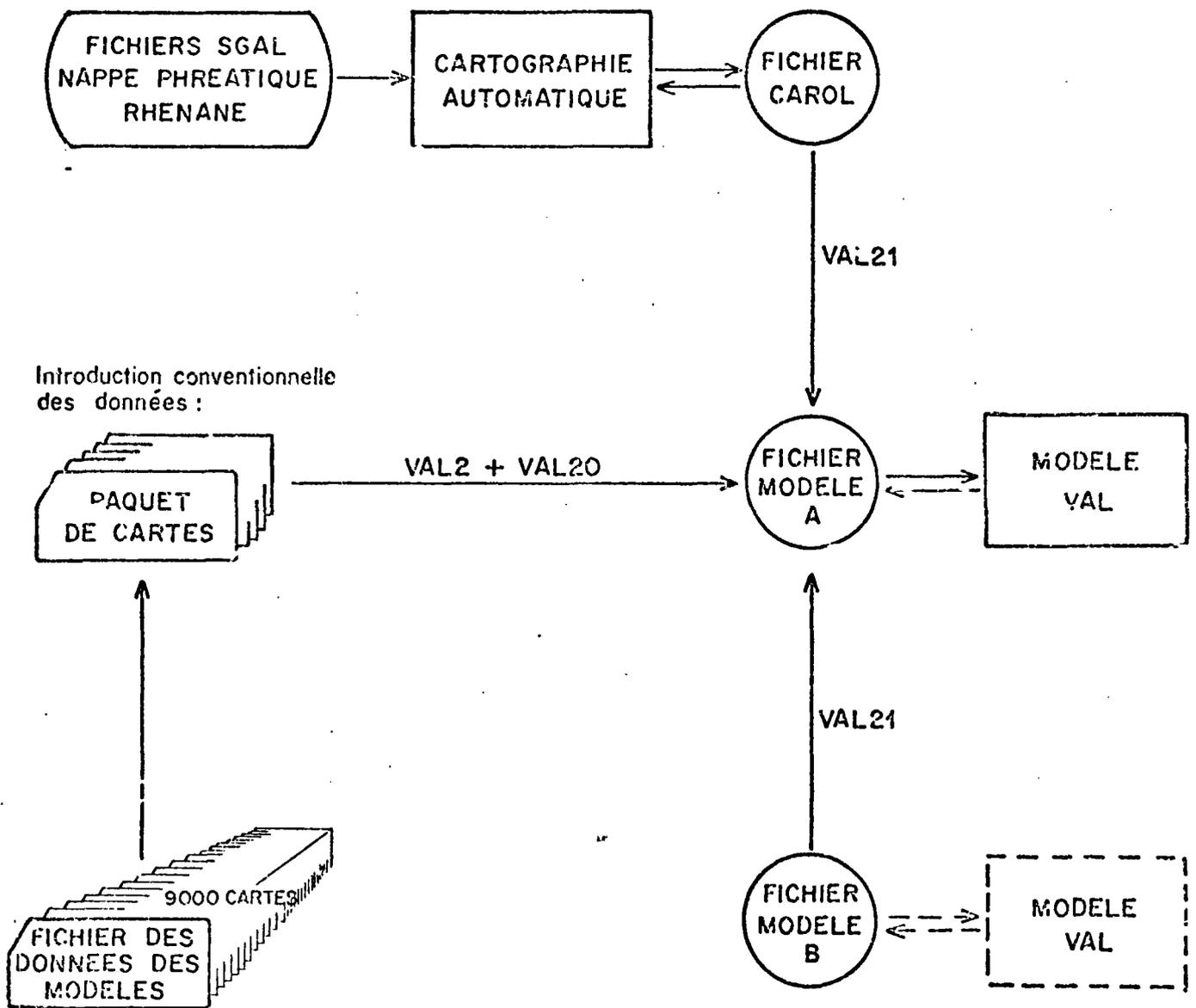
3. MISE EN OEUVRE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

Les données nécessaires au fonctionnement du modèle mathématique peuvent être introduites de trois façons différentes :

- d'une manière conventionnelle,

LIAISON DU MODELE VAL AVEC L'ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE

INTRODUCTION DES DONNEES



- par transfert d'un fichier sur disque à un autre,
- avec utilisation de la cartographie automatique,

Les trois formules peuvent être mises en oeuvre simultanément pour un même modèle (cf. fig 2).

3.1 Introduction conventionnelle des données

Les données de la zone concernée sont rassemblées à partir des études hydrogéologiques réalisées et des renseignements archivés sur support informatique. Elles sont mises en forme manuellement sur cartes perforées, selon des formats standardisés qui permettent la réutilisation de tous les paquets de cartes.

Les programmes VAL 2 et VAL 20 transfèrent les données du paquet de cartes, après vérification et élimination des erreurs éventuelles, dans un fichier sur disque. A la limite, seuls quelques paramètres ainsi que les codes qui définissent la géométrie du domaine doivent être introduits à partir de cartes perforées. Les principaux paramètres (potentiels mesurés, transmissivités etc) sont de moins en moins introduits de cette façon.

3.2 Transfert d'un fichier sur disque à un autre

Les données et les résultats des modèles en cours étant emmagasinés en permanence sur disque, il est possible de transférer les valeurs correspondant à un secteur commun à deux modèles d'un fichier de modèle à un autre (programme VAL 21).

3.3 Utilisation de la cartographie automatique

Les renseignements relatifs à la nappe phréatique rhénane, emmagasinés dans la banque de données du Service Géologique Régional Alsace, font l'objet d'une actualisation constante.

Les programmes de cartographie automatique (CARØ) mis au point à Strasbourg permettent de valoriser cette information. Les valeurs correspondant à certains critères (nature de l'information, localisation dans l'espace et dans le temps) sont sélectionnées et les programmes CARØ calculent la répartition probable du paramètre sur le secteur concerné.

Ces résultats stockés sur disque sont transférés dans le fichier du modèle (programme VAL 21), qui bénéficie ainsi d'une information complète et actualisée, acheminée par une procédure entièrement automatique.

4. FACILITES D'ADAPTATION DU MODELE

La complexité croissante des problèmes posés jointe à la nécessité d'obtenir des résultats toujours plus détaillés implique un perfectionnement progressif des modèles mis en oeuvre. La chaîne de programmes VAL permet de modifier facilement la configuration d'un modèle, en particulier par l'adjonction de dispositifs complémentaires.

4.1 Changement de schéma

La recherche d'une plus grande précision peut conduire par exemple à remplacer le schéma des nappes captives, utilisé en première approximation, par le schéma des nappes libres, ce qui implique dans le modèle le remplacement des transmissivités par les perméabilités et les épaisseurs d'aquifère. Dans le cas des programmes VAL, il suffit d'introduire les valeurs de la cote du substratum, les perméabilités étant calculées par le programme VAL 15 (opérations sur les tableaux de valeurs stockés sur disque).

4.2 Implantation d'une extension petites mailles

Afin d'obtenir plus de précision sur un secteur déterminé, on peut être amené à introduire dans le modèle un sous-domaine comportant un maillage fin, ou même plusieurs sous-domaines successifs emboîtés les uns dans les autres (modèles gigognes).

Au niveau de l'introduction des données, il suffit de juxtaposer la ou les extensions petites mailles au domaine à grandes mailles, la connexion des mailles correspondantes se faisant automatiquement (cf. fig 3).

4.3 Implantation d'un domaine multicouche

A partir du modèle bidimensionnel plan, il est possible d'ajouter sur tout ou partie du domaine un dispositif multicouche, correspondant soit à la prise en compte d'autres aquifères négligés en première approximation, soit à la subdivision de l'aquifère pris globalement en une série de strates superposées. L'introduction des données et le principe de fonctionnement sont analogues à ceux des extensions petites mailles (cf. fig 4).

5. GESTION ET PROTECTION DE LA NAPPE

La simulation du comportement de la nappe phréatique rhénane et des petits aquifères affluents sur la bordure vosgienne représente un outil de gestion des ressources en eau souterraine particulièrement bien adapté. Les problèmes portent à la fois sur l'aspect quantitatif et l'aspect qualitatif.

5.1 Problème de ressources en eau

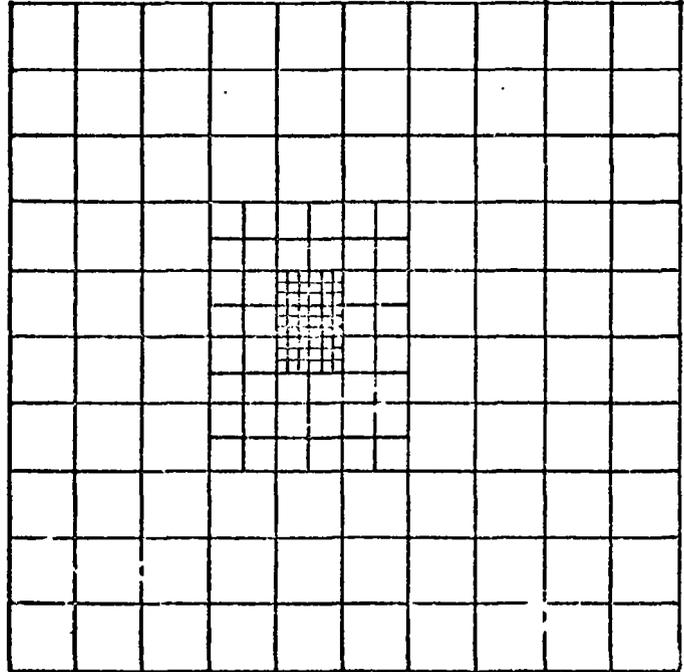
Lorsqu'on envisage la création d'un nouveau centre de pompage, la mise en oeuvre d'un modèle permet de déterminer :

- l'incidence sur la nappe de l'exploitation en projet
- l'emplacement et la configuration du dispositif de pompage optimum.

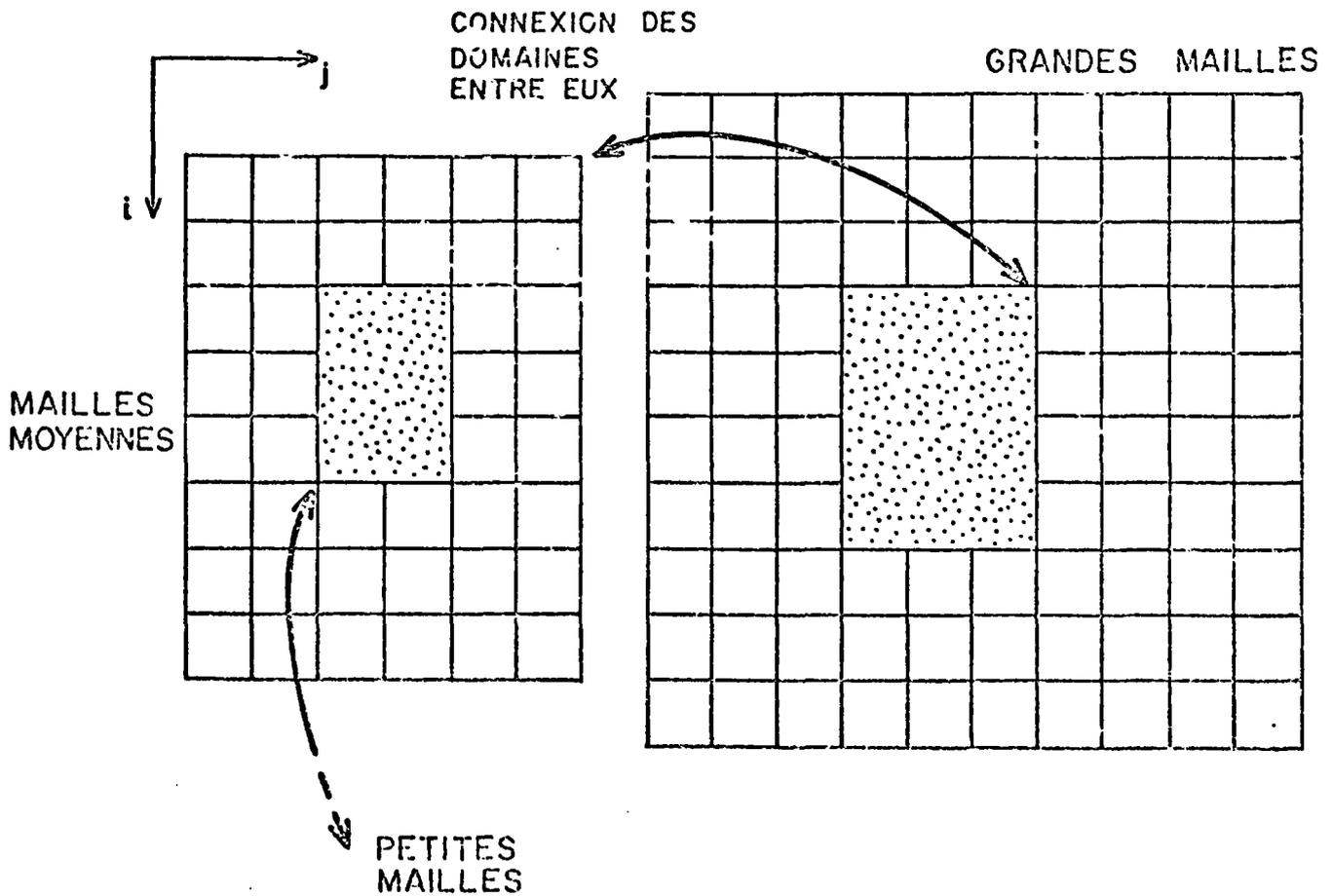
MODELE VAL

ADJONCTION DE DOMAINES A PETITES MAILLES

EXEMPLE :



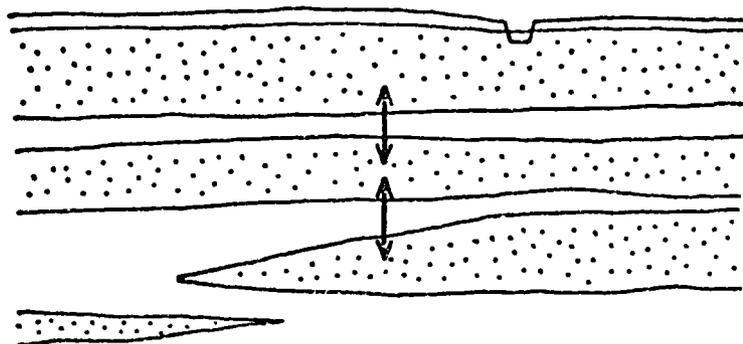
REPRESENTATION :



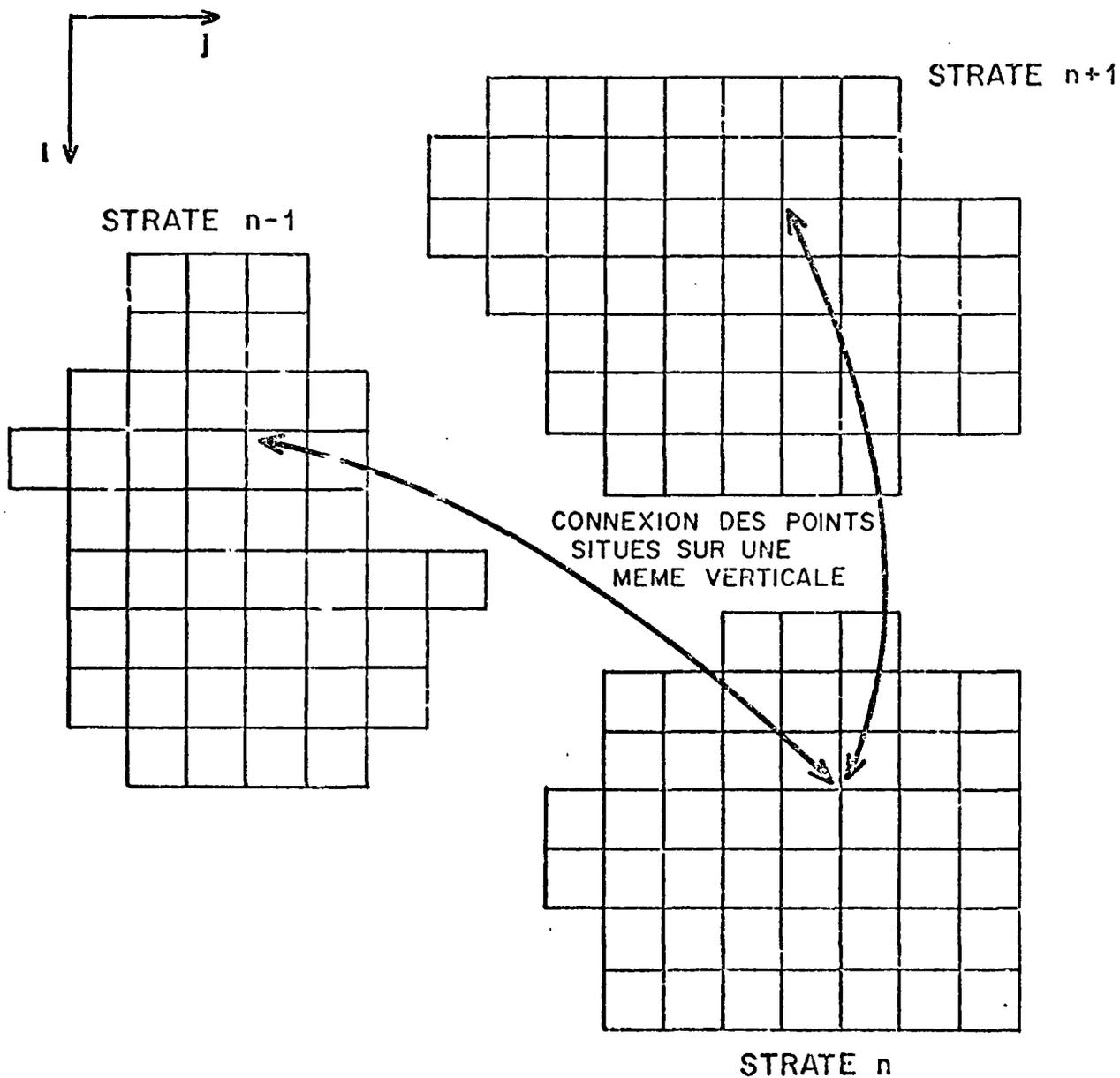
MODELE VAL

INTRODUCTION D'UN DOMAINE MULTICOUCHE

EXEMPLE :



REPRESENTATION :



5.2 Problème de qualité des eaux

Dans de nombreux secteurs de la nappe phréatique, on enregistre des pollutions de nature et d'origine diverses, la principale étant une contamination par les chlorures en aval du Bassin Potassique. C'est ainsi que de nombreux projets d'exploitation des eaux souterraines se heurtent à des problèmes de qualité.

A partir de la répartition des potentiels calculés par le modèle, il est possible de définir les lignes de courant, c'est à dire la trajectoire de la pollution (dans l'hypothèse d'un phénomène purement convectif). Le tracé de la zone d'emprunt des pompages permet de distinguer les filets d'eau qui s'écouleront vers l'aval de ceux qui atteindront les forages.

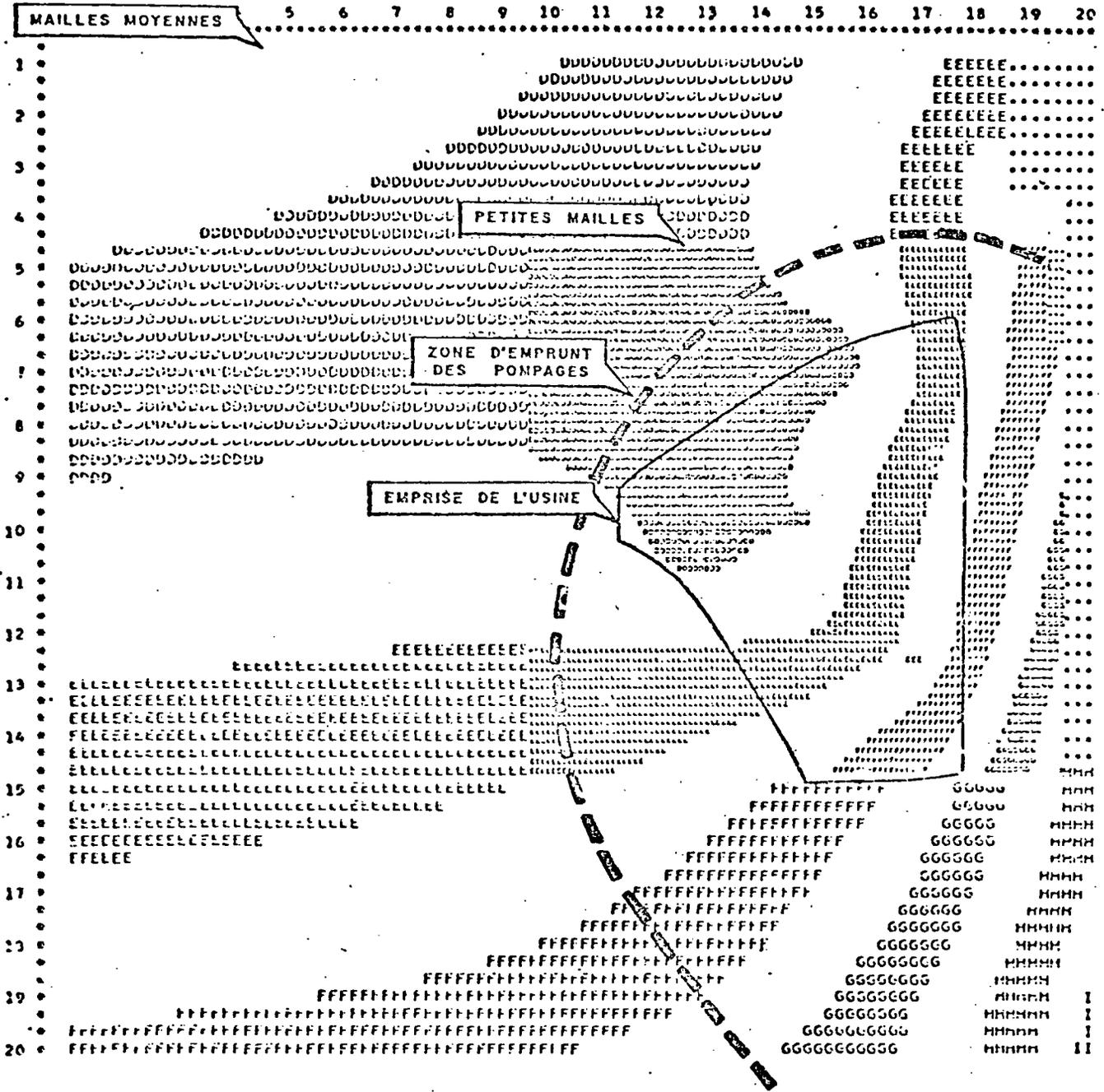
La mise en oeuvre de modèles a permis de résoudre ainsi plusieurs types de problèmes, entre autres :

- la protection de la qualité de l'eau exploitée par un forage est assurée en interposant une batterie de captages (constituant une véritable barrière hydrodynamique) entre l'ouvrage à protéger et la zone polluée (figure 5 : la qualité des eaux du forage situé le plus à l'Ouest est garantie par d'autres captages vis à vis des pollutions venant du Rhin, à l'Est).

- la propagation d'une pollution vers l'aval est arrêtée en interposant des forages dont la zone d'emprunt englobe la totalité du secteur contaminé (cf. Fig. 6).

Le modèle chimique permet d'obtenir une précision plus grande dans les problèmes de pollution, en tenant compte des paramètres liés à ces phénomènes, notamment la dispersion longitudinale et transversale, ainsi que la diffusion dans l'eau liée.

.....
 • SIMULATION NO 15
 • POTENTIELS CALCULES
 • EN METRES
 • SECTEUR NO 2
 •.....



•• LEGENDE ••
 •.....

SYMBOLE	VALEUR INF	VALEUR SUP
	201.50	202.00
A	202.00	202.50
	202.50	203.00
B	203.00	203.50
	203.50	204.00
C	204.00	204.50
	204.50	205.00
D	205.00	205.50
	205.50	206.00
E	206.00	206.50
	206.50	207.00
F	207.00	207.50
	207.50	208.00
G	208.00	208.50
	208.50	209.00
H	209.00	209.50
	209.50	210.00
I	210.00	210.50

6. CONSERVATION DES DONNEES ET DES RESULTATS DES MODELES

Les données introduites dans les modèles de la nappe phréatique rhénane, qu'il s'agisse des modèles régionaux ou des modèles de détail, ont été modifiées lors de la phase d'étalonnage, au cours de laquelle on compare la physionomie de l'aquifère mesurée sur le terrain à la réponse calculée.

Il est indispensable de conserver l'ensemble de ces données, de façon à pouvoir les réutiliser facilement et si possible les améliorer à chaque remise en oeuvre.

Les programmes permettent de réaliser cette tâche dans les meilleures conditions.

Actuellement, l'emménagement de l'ensemble des données et de certains résultats des modèles relatifs à la nappe phréatique rhénane se présente sous deux formes :

- 9.000 cartes perforées selon les formats normalisés (lecture par VAL 2 et VAL 20), ce qui représente environ 120.000 valeurs numériques facilement réutilisables.

- 4 fichiers sur disque, comportant chacun 309 enregistrements de 350 valeurs, soit une possibilité d'emmagasiner au maximum près de 100 000 valeurs par fichier : chaque fichier contient les données et les résultats d'un modèle, prêts à être exploités par la chaîne de programmes VAL.

L'intégration des modèles dans le système informatique de la banque de données hydrogéologiques du Service Géologique Régional Alsace, et en particulier la liaison avec la procédure de cartographie automatique, offre par ailleurs de grandes possibilités.

TYPE D'EQUATION	DOMAINES TRAITES	OPTIONS POSSIBLES
<p>Equation des nappes captives ou assimilées</p> <p>(système d'équations linéaires)</p>	<p>Bidimensionnel Plan Mailles carrées</p> <p><input type="checkbox"/> ou <input type="checkbox"/></p> <p>Bidimensionnel Coupe Mailles carrées</p> <p>(anisotropie par alternance de couches perméables ou non)</p>	<p>Aquifère <input type="checkbox"/> multicouche (pour les domaines plan)</p> <p><input type="checkbox"/> Extensions petites mailles</p> <p><input type="checkbox"/> Etangs en connection avec l'aquifère (pour les domaines plan)</p>
<p>Equation des nappes libres en plan</p> <p>(système d'équations non linéaires)</p>	<p>Bidimensionnel Plan Mailles carrées</p>	<p><input type="checkbox"/> Extensions petites mailles</p> <p><input type="checkbox"/> Etangs en connection avec l'aquifère</p>
<p>Equation comportant des transmissivités directionnelles (SUD et EST)</p>	<p>Bidimensionnel - Plan <input type="checkbox"/> ou <input type="checkbox"/> coupe</p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p>Mailles carrées</p> <p><input type="checkbox"/> ou <input type="checkbox"/></p> <p>Mailles rectangulaires (et maillage dit. écossais)</p> <p><input type="checkbox"/> ou <input type="checkbox"/></p> <p>Mailles curvilignes</p>	<p><input type="checkbox"/> Surface libre variable (pour les domaines coupe)</p> <p><input type="checkbox"/> Etangs en connection avec l'aquifère (pour les domaines plan)</p>

7. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES MODELES

7.1 Le modèle hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique VAL est constitué par un ensemble de 65 programmes et sous-programmes totalisant 3.200 instructions FORTRAN IV. Il existe 4 programmes de calcul en régime permanent (dont VAL 4 et le sous-programme PERLA, qui travaillent avec la surrelaxation par ligne pour l'équation des nappes captives) et 3 programmes de calcul en régime transitoire. Il y a 4 options possibles, dont les extensions petites mailles, les domaines multicouches et la détermination de la surface libre, pour les modèles en coupe.

Le tableau de la page précédente présente les différents choix possibles pour l'utilisateur en régime permanent et transitoire.

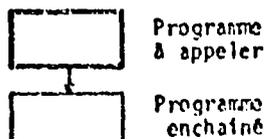
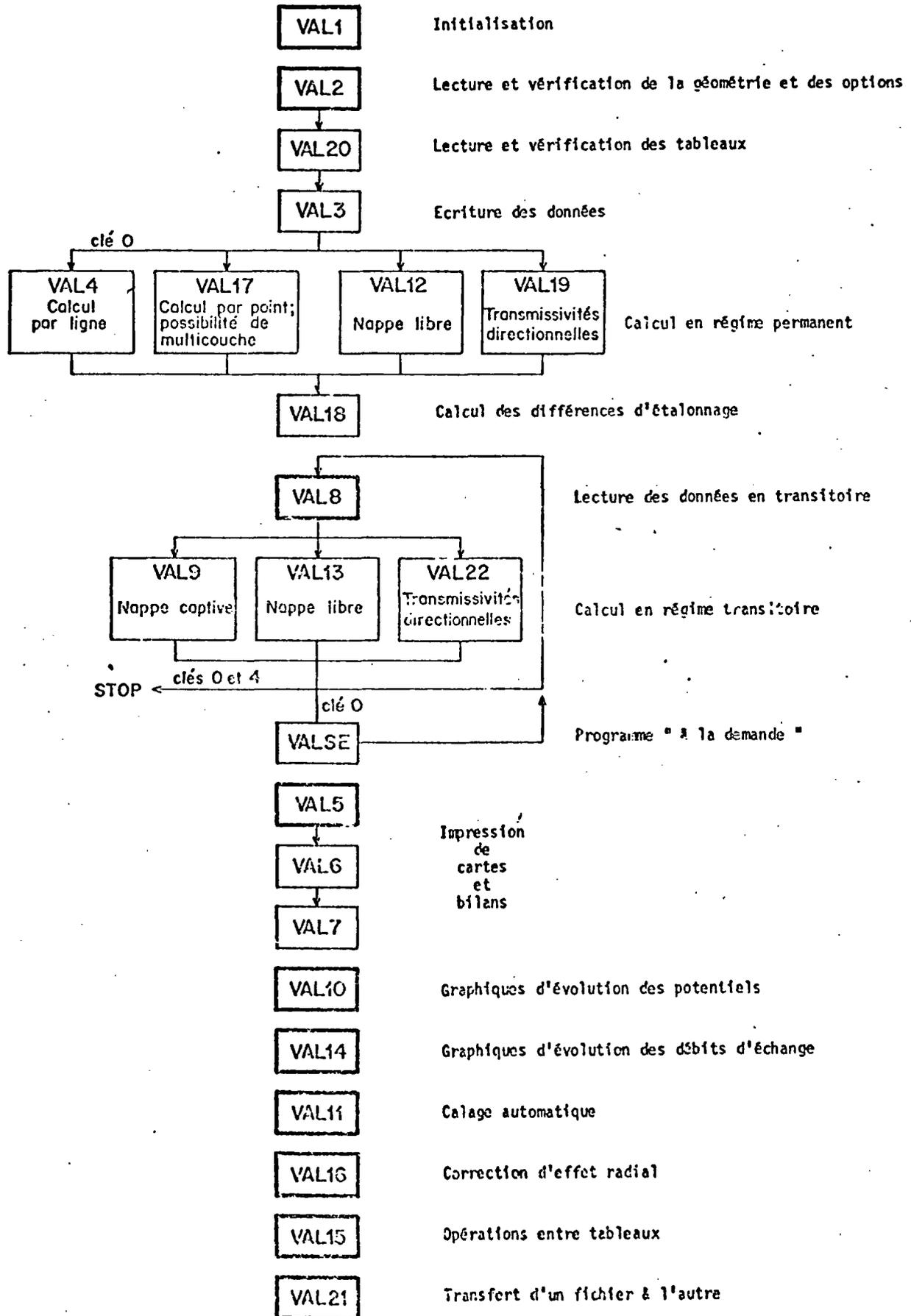
Ce modèle présente en outre deux particularités :

- une structure chaînée (cf. fig 7) : les tâches sont réparties entre 22 programmes différents (VAL 1 à VAL 22), dont 10 doivent être appelés par l'utilisateur et 12 sont enchaînés automatiquement, bien qu'ils puissent également être appelés directement, en cas de besoin.

- l'utilisation d'une mémoire périphérique (disque) : à la fin de chaque programme, les données et les résultats sont emmagasinés dans un fichier sur disque ; de façon à ne pas augmenter les temps d'exécution, les phases de calcul et les procédures fortement répétitives ne comportent pas d'opérations de lecture-écriture sur disque.

Ces caractéristiques comportent plusieurs avantages :

CONSTITUTION DU MODELE VAL



- l'utilisateur peut enchaîner les tâches comme il l'entend et interrompre le travail quand il le souhaite.

- différents types de connections sont possibles avec une banque de données ou d'autres modèles, grâce au fichier sur disque.

- la structure chaînée des programmes est bien adaptée à la mise en oeuvre de procédures d'OVERLAY qui permettent l'utilisation d'ordinateurs de capacité relativement réduite.

7.2 Le modèle chimique

Le modèle chimique de calcul de la propagation des polluants a été conçu selon le même canevas que le modèle hydrodynamique. A ce titre, il bénéficie des mêmes avantages et utilise un certain nombre de sous-programmes du modèle VAL.

Le modèle chimique prend en compte les paramètres suivants, ensemble ou séparément :

- la connection,
- la dispersion longitudinale et transversale,
- les apports ou les prélèvements,
- la diffusion dans l'eau liée, provoquant un stockage ou un déstockage de polluant.

Mis au point pour la modélisation de la langue salée de Bollwiler dans le cadre de l'étude de la salure issue du Bassin Potassique, cet outil peut être utilisé pour obtenir une approche plus fine des problèmes de qualité des eaux.

8. CONCLUSIONS

Dans le cadre de l'étude de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace, des modèles de simulation ont été réalisés. On dispose désormais au Service Géologique Régional Alsace d'un outil complet de gestion des ressources en eaux souterraines, comportant :

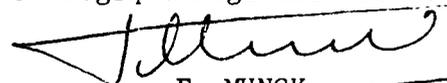
- les fichiers de données hydrogéologiques,
- la cartographie automatique permettant une meilleure mise en valeur des informations et une liaison aisée avec les modèles
- les modèles proprement dits, avec le modèle hydrodynamique VAL, mais aussi le modèle chimique récemment mis au point.
- le fichier des modèles où sont conservées et améliorées les données utilisées et les résultats obtenus.

La mise en oeuvre de ces outils permet de résoudre les problèmes d'alimentation en eau des collectivités et des industriels de la région. Elle représente également une aide importante pour les Services Administratifs dans leur mission de gestion des ressources en eau du double point de vue des quantités et de la qualité.

L'Ingénieur chargé des travaux
de modélisation

po 
J.P. VANÇON

Le Directeur du Service
Géologique Régional Alsace


F. MUNCK

F I G U R E S

- 1 - Modèles régionaux de simulation de la nappe phréatique rhénane avec tableau.
- 2 - Liaison du modèle avec l'environnement informatique : introduction des données.
- 3 - Adjonction de domaines à petites mailles.
- 4 - Introduction d'un domaine multicouche.
- 5 - Exemple d'optimisation du dispositif de pompage, en fonction de critères de qualité.
- 6 - Contrôle de la pollution d'une zone dangereuse.
- 7 - Constitution du modèle VAL.

A N N E X E S

- 1 - Références
- 2 - Etudes hydrodynamiques réalisées sur modèle au SGAL

ANNEXE 1

REFERENCES

- Etudes sur modèle de la nappe phréatique rhénane effectuées au SGAL par P. UNGEMACH, B. FEUGA, J.L. GARNIER, A. GRAILLAT, J.P. VANÇON et G. KREBS.

- Manuels de calcul numérique :
 - . Introduction à l'emploi des modèles mathématiques en hydrogéologie - B. FEUGA - novembre 1970 - note interne SGAL.

 - . Métodos numericos aplicados a la hidrogeologia subterranea - J.P. VANÇON - juillet 1977 - cours donné au Golegio de Postgraduados de Chapingo (Mexique).

- Le modèle mathématique :
 - . " VAL ", modèle mathématique de simulation des aquifères adapté aux petits ordinateurs - J.P. VANÇON - 2 mai 1977 - rapport SGAL.

 - . " VAL ", modèle mathématique de simulation des aquifères : NOTICE TECHNIQUE - J.P. VANÇON - 1978 - rapport SGAL.

- La cartographie automatique :
 - . Cartographie automatique des paramètres hydrogéologiques à partir de la banque de données du SGAL - J.P. VANÇON - 31 mars 1976 - rapport SGAL.

 - . Cartographie automatique de la piézométrie à partir de la banque de données du SGAL - J.P. VANÇON - 21 septembre 1976 - rapport SGAL.

ETUDES HYDRODYNAMIQUES REALISEES SUR MODELES AU S.G.A.L.

1.- Modèles régionaux nappe phréatique rhénane

- Strasbourg Nord :

- 1966 - Etude sur modèle analogique électrique de l'alimentation de la nappe par le Rhin.
1968 - Modèle mathématique du secteur alluvial Strasbourg-Nord.
Déc. 1971 - Etalonnage sur modèle analogique électrique. Rapport de fin d'études.

- Strasbourg Sud

- Mai 1972 - Modèle de cohérence des données (régime permanent, calculs numériques).
Nov. 1975 - Rapport d'étalonnage du modèle analogique électrique.
Juil. 1976 - Rapport final de l'étude sur modèle analogique.

- Mulhouse-Colmar-Sélestat

- Déc. 1975 - Modèle mathématique de cohérence des données
Oct. 1976 - Modèle mathématique de cohérence des données. Complément d'étalonnage.
Déc. 1977 - Modèle mathématique. Calage en régime transitoire. Simulations d'hypothèses de prélèvements futurs (1975-2010).

- Bâle-Mulhouse

- Mai 1971 - Modèle mathématique de cohérence des données
Fév. 1972 - Rapport final des études sur modèles analogiques et mathématiques.

2.- Sous-modèles locaux - Nappe phréatique rhénane

- Août 1969 - Liaison fluviale à grand gabarit Mer du Nord - Méditerranée. Traversée de Mulhouse (modèles analogiques et mathématique).
Mai 1971 - Etude des problèmes posés par l'ouverture de gravières en Alsace. Etude sur modèle analogique électrique des échanges hydrauliques nappe-gravière.
Juin 1971 - Drainage du pourtour des darses de l'avant-port Nord de Strasbourg (modèle analogique).

- Nov. 1971 - Etude par modèles électriques d'un équipement de fouille sur le site de l'usine-écluse du futur ouvrage de grande chute de Gamsheim (1 modèle tridimensionnel de 45.000 noeuds, 3 modèles mathématiques bidimensionnels).
- Déc. 1971 - Etude du mécanisme de la salure de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin. Secteur alluvial du bassin potassique. Exploitation des mesures sur modèles mathématiques.
- Mars 1972 - Liaison fluviale à grand gabarit Seine-Rhin. Aménagement portuaire de Herrlisheim-Offendorf (1 modèle hybride analogique-numérique, 1 modèle analogique).
- Sept. 1972 - Incidence de la chute de Gamsheim sur la nappe phréatique à Kehl (Allemagne). Etude par modèle mathématique.
- Juil. 1973 - Etude de la nappe phréatique du secteur alluvial d'Obernai; étude provisionnelle sur modèle analogique (Brasserie Kronenbourg).
- Mars 1974 - Détermination des profondeurs du voile des digues du Rhin en amont du barrage d'Iffezheim sur des modèles électriques bidimensionnels en coupe sur les deux rives du Rhin.
- Mars 1974 - Etude sur modèle analogique tridimensionnel de la mise hors d'eau des fouilles de l'usine-écluse de la chute d'Iffezheim (47.500 noeuds pour le modèle tridimensionnel, plus 2 modèles bidimensionnels, coupes).
- Juil. 1974 - Automobiles Peugeot - Centre de Mulhouse. Etude hydrodynamique de la nappe phréatique sur modèle analogique.
- Juil. 1974 - C.F.R. - Raffinerie de Strasbourg à Drusenheim. Etude sur modèle analogique de la nappe phréatique au droit de la raffinerie et de son extension.
- Mai 1975 - Syndicat de St.Louis-Huningue. Etude hydrodynamique de la nappe phréatique rhénane entre St.Louis et Bartenheim-la-Chaussée (modèle mathématique).
- Juin 1975 - Port Autonome de Strasbourg. Zone industrielle de Marckolsheim. Etude sur modèle analogique électrique.

- Mai 1976 - Rhône Poulenc Pétrochimie. Usine de Chalampé. Implantation d'un nouveau forage. Détermination de la zone d'emprunt des pompages par modèle mathématique.
- Juin 1976 - Brasserie Kronenbourg. Etude hydrogéologique de quelques sites possibles pour une unité K 3 (par modèle mathématique).
- Mars 1977 - Brasserie Kronenbourg. Etude du site de Sélestat par modèle mathématique.
- Mai 1977 - La Cellulose de Strasbourg. Définition de la répartition optimale des pompages par modèle mathématique.
- Juin 1977 - Rhône Poulenc Pétrochimie. Usine de Chalampé. Implantation de deux nouveaux forages. Détermination de la zone d'emprunt des pompages par modèle mathématique.
- Juin 1977 - D.D.A. Bas-Rhin. Implantation d'un forage dans la région de Sélestat. Etude par modèle mathématique.
- Août 1977 - Brasserie Kronenbourg. Etude du site de Ribeauvillé par modèle mathématique.
- Oct. 1977 - Compagnie Rhénane de Raffinage. Réalisation d'un modèle mathématique en vue de définir l'optimisation du dispositif de pompage.

3.- Modèles sur d'autres nappes en Alsace

- Pliocène de Haguenau

- Mai 1972 - Etude hydrodynamique par modèles analogiques des alluvions pliocènes de la région de Haguenau.

- Nappe alluviale de la Doller

- Août 1974 - Etude hydrodynamique de la nappe des alluvions de la Doller entre Reiningue et Mulhouse. Modèle mathématique.
- Jan. 1976 - Modèle mathématique de simulation des échanges nappes-rivières.
- Août 1976 - Simulation de la sécheresse 1976.

- Nappe alluviale de la Thur

- Jan. 1977 - Incidence des ballastières de l'Ochsenfeld sur l'écoulement de la nappe de la Thur en aval des terrils de Thann-et-Mulhouse.

- Nappe alluviale de la Petite Fecht

Nov. 1973 - Ville de Munster. Etude par modèle mathématique des possibilités d'exploitation de la nappe alluviale de la Petite Fecht à Stosswihr-Ampfersbach.

4.- Modèles sur des nappes en Lorraine

- Nappe des Grès Infratriasiques

Août 1971 - Modèle mathématique de la nappe des Grès du Trias inférieur. Etat de réglage du modèle en date du 1.8.1971. Discussion des résultats obtenus (la modélisation a été réalisée par la SOGREAH).

Mai 1976 - Etude des possibilités d'injection de liquides résiduels dans les grès du Trias inférieur en Lorraine. Site de Toul. Etude hydrodynamique par modèle mathématique.

- Secteur des Houillères du Bassin Lorrain (Nappe des Grès)

Août 1972 - Etude sur modèle mathématique de la nappe aquifère des grès infratriasiques dans le secteur des H.B.L.

Janv. 1976 - Simulations de nouveaux pompages.

Déc. 1976 - Simulation de nouveaux pompages dans la région de Sarreguemines.

5.- Modèles sur d'autres nappes

Avril 1972 - Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional. Simulation sur modèles mathématiques et analogiques des aquifères de la Djefara (Tunisie).

1973 - Etude sur modèle analogique, calage du modèle en régime transitoire. Simulation de la mise en service du périmètre d'irrigation de la Tessaout Amont (Maroc).

Mars 1974 - Etude sur modèle de la nappe de Téhéran (un modèle analogique électrique, un modèle mathématique) (Iran).

Mai 1974 - Etude hydrogéologique de Gran Lima. Simulation par modèles analogiques et mathématiques (Pérou).

Juil. 1975 - Alimentation en eau de la Ville d'Amman. Etude hydrodynamique et économique sur modèles mathématiques (Jordanie)