

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

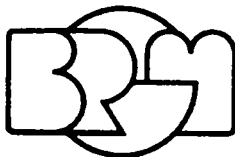
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

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

*MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE
MISSION DES ÉTUDES ET DE LA RECHERCHE
"Sols et Déchets Solides"*

*ÉTUDE SUR MODELES HYDRODYNAMIQUE ET HYDROCHIMIQUE
DE LA NEUTRALISATION DES TERRILS DE L'OCHSENFELD*

17 Décembre 1980



Service géologique régional ALSACE

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

S O M M A I R E

1. ORIGINE ET HISTORIQUE DE LA POLLUTION

2. APPROCHE THÉORIQUE

2.1. PROPAGATION DES POLLUANTS EN MILIEU POREUX.

2.2. EQUATIONS DE LA PROPAGATION.

2.3. MODELISATION

- . problème de la diffusion numérique
- . principe de résolution adopté.

3. CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE

3.1. PROGRAMMES.

3.2. FICHIERS.

3.3. PROCEDURES.

3.4. TESTS DE FIABILITE.

3.5. TESTS DE MODELISATION D'UN CAS SIMPLE.

4. MISE EN OEUVRE DU MODÈLE SUR LE SECTEUR DE THANN ET MULHOUSE

4.1. MODELE HYDRODYNAMIQUE.

4.2. MODELE HYDROCHIMIQUE

- . maillage adopté,
- . conditions d'écoulement déduites du modèle hydrodynamique,
- . conditions aux limites ; bruit de fond,
- . conditions d'injection,
- . découpage du temps,
- . pluie efficace,
- . pompages.

5. RÉSULTATS OBTENUS

5.1. ETALONNAGE DU MODELE SUR LA PERIODE PASSEE

- . profil longitudinal,
- . courbes d'évolution des concentrations en fonction du temps,
- . profils transversaux.

5.2. Evolution future de la pollution.

6. CONCLUSIONS

FIGURES

1. Modélisation des trajectoires avec transmission vers l'aval de l'erreur angulaire amont.
2. Modélisation des propagations avec transmission aux pas de temps suivants de l'erreur sur la distance.
3. Dialogue entre les deux modèles et leurs fichiers.
4. Schéma de l'enchaînement des programmes et des procédures.
5. Rôle de la dispersion et de la rétention à courte distance.
6. Rôle de la dispersion et de la rétention à grande distance.
7. Relation entre le rapport des porosités et le rapport des vitesses, lorsque la dispersion joue un rôle faible.
8. Exemple de dispositif testé sur le modèle hydrodynamique.
9. Répartition des potentiels en eaux moyennes.
10. Répartition des potentiels en eaux moyennes.
11. Cotes de substratum de l'aquifère.
12. Perméabilités de l'aquifère.
13. Epaisseurs des alluvions mouillées.
14. Vecteur vitesse.
15. Angle du vecteur vitesse.
16. Flux de transit.
17. Evolution de la pluie efficace.
18. Profil longitudinal dans l'axe de la langue salée au pas de temps n° 11 (1973).
19. Evolution des teneurs au puits 182 du Lange-Zug.
20. Evolution des teneurs aux puits 300 et 160 de Wittelsheim.
- 21-27. Distribution spatiale des concentrations à différentes époques.
- 28-33. Distribution longitudinale et transversale des charges à différentes époques.
34. Distribution spatiale des concentrations en 1994 avec 10% de fuite.
- 35-36. Comparaison de l'effet de la dépollution à 90 et 100 % au puits de Lange-Zug.

I. ORIGINE ET HISTORIQUE DE LA POLLUTION

1.1. CONSTITUTION DU TERRIL

Les industries chimiques installées au débouché de la vallée de la Thur ont procédé depuis leur mise en service (1936) au dépôt des résidus de leur fabrication en site naturel. Le terril ainsi constitué à l'aplomb d'alluvions aquifères est à l'origine de la pollution de l'eau souterraine (sulfate de fer et chlorure de sodium) mise en évidence sur des captages d'eau potable à plus de 6 km en aval du site et entraînant la mise en place de réseaux de surveillance dès 1968.

A travers les bilans annuels de production, on a pu chiffrer les quantités de résidus déversés de 1936 à 1976 (cf. tableau ci-après).

Type de déchets	Constituants principaux	Tonnage (10 ³ t.)	Origine
Boue d'attaque	TiO ₂ + SiO ₂ + fer ferrique	53	Fabrication TiO ₂
Boue de neutralisation	Ca SO ₄ + Fe ₂ O ₃	1 963	Fabrication TiO ₂
Sulfate de fer	Fe SO ₄ 7H ₂ O	790	Fabrication TiO ₂
Déchets de chaux	CaO + sable et cailloux	63	Préparation du lait de chaux
Résidu de pyrite	FeO + Gangue siliceuse	111	Production H ₂ SO ₄
Boue de dissolution	NaCl, CaO, SO ₃ + Hg*	109	Fabrication Na OH
Boue d'hypochlorite	Ca Cl ₂ + Ca (ClO) ₂	19	Production d'hypochlorite
	TOTAL	3 108	

* Le mercure sous forme de sulfure de mercure était déposé à raison de 10 kg/jour. Cette quantité a été réduite à 0,1 kg/jour par mise en service d'une station.

1.2. LE MILIEU NATUREL - RESEAU D'OBSERVATION.

Le milieu naturel est constitué par les alluvions quaternaires de la Thur à son débouché en plaine d'Alsace. Ces alluvions sont constituées de galets, graviers, sables, plus argileuses en profondeur, d'une épaisseur de 10 à 15 m, et reposant sur un substratum imperméable oligocène (conglomérats cotiers à l'amont et marnes à l'aval).

Ces alluvions sont le siège d'une nappe phréatique s'écoulant à peu près parallèlement à la rivière Thur au droit et en aval des terrils. La perméabilité moyenne au voisinage du terril est de 3 à 4 . 10⁻⁴ m/s.

La piézométrie met en évidence un gradient de $8 \cdot 10^{-3}$ et de forts battements saisonniers (de 3 à 5 m) liés à une forte pluviométrie (650 mm en année sèche à 1200 mm en année humide) et à l'alimentation de la nappe par la Thur proche en période de hautes eaux.

Suite à l'aggravation des teneurs en chlorures et sulfates constatée à partir de 1966 sur des captages situés 1 km en aval, un réseau de surveillance (piézomètres) a été mis en place progressivement et fait l'objet de prélèvements mensuels pour analyse de SO_4 , Cl, Fe, Hg ; ces prélèvements sont également réalisés sur des gravières du secteur. Les mesures simultanées de niveaux d'eau ont permis de tracer les cartes piézométriques et d'étudier les battements de la nappe.

1.3. MECANISME ET EXTENSION DE LA POLLUTION.

Jusqu'en 1973, les déchets liquides et solides furent mélangés, permettant des interactions et des solubilisations qui auraient pu être évitées :

- le contact des boues d'hypochlorite et des boues de dissolution a permis la solubilisation du mercure, sa migration vers la nappe phréatique sous-jacente et sa propagation vers l'aval ;
- des résidus solides et très solubles, tel le sulfate de fer, ont été déposés dans et le long des digues de tout-venant qui entouraient les bassins de décharge des résidus liquides : or ces digues sont le lieu privilégié de circulation des eaux d'infiltration des pluies dans le terril et des eaux d'égouttage des boues liquides.

Ainsi, les trois sources principales de pollution ont été le sulfate de fer, le sulfate de calcium, le chlorure de sodium avec le mercure.

Les teneurs observées dans la nappe au pied du terril lors des premiers prélèvements (1972-1973), donc avant la mise en oeuvre des mesures de neutralisation, étaient, dans la zone la plus contaminée (200 à 300 m de front), de 10 à 20 g SO_4/ℓ ; 5 à 15 g Cl/ℓ ; 5 à 10 g Fe/ℓ ; 3 à 9 mg Hg/ℓ ; 2,5 à 3,5 de pH.

Ces teneurs allaient en décroissant vers l'aval, et on notait, dans des puits à 6 km en aval, des teneurs 10 fois plus faibles en sulfates et chlorures, et plus de 1000 fois plus faibles pour le fer et le mercure : on notait des précipitations d'hydroxyde de fer dans les gravières situées sur le trajet de la pollution ; ces gravières prenaient alors une forte teinte rouge (1).

Si le nombre de piézomètres était suffisant 1 km en aval du terril pour délimiter et mesurer l'extension de la pollution, par contre plus en aval les points d'observation manquaient. La prospection géoélectrique (sondages électriques et profils de résistivité) a permis de délimiter cette extension jusqu'aux puits 6 km en aval et de mettre en évidence la faible dispersion transversale de la contamination : le front contaminé n'est pas plus large à l'aval qu'au pied du terril.

Il faut noter le rôle particulier joué par les gravières qui se sont étendues au cours des dernières années sur le flanc Sud Est de la zone de propagation originelle de la

pollution : ces gravières sont exploitées à la pelle et au bull, surtout en basses eaux de nappe ; lors des dernières années humides, les hautes eaux ont été particulièrement élevées et le remplissage rapide de ces gravières par les eaux de la nappe a attiré les eaux minéralisées.

1.4. PREMIERES MESURES DE NEUTRALISATION

Dès 1972-73, des puits de dépollution ont été réalisés dans la zone la plus contaminée, délimitée par la prospection géophysique, au pied aval du terril.

Ce système a été complété en 1974 par une tranchée drainante à partir de laquelle la totalité des débits pompés sur les 3 puits et par la tranchée sont refoulés vers une station de neutralisation. Le débit maximum de pompage en hautes eaux est de 36 m³/h et il baisse à 20 m³/h en période de basses eaux, où la tranchée, malgré un approfondissement à 11 m/sol, a tendance à s'assécher.

Parallèlement les boues de neutralisation (sulfate de calcium) ont été épandues et régaliées (une fois sèches) sur l'ancien terril de façon à tenter d'installer une couverture peu perméable. Mais les dissolutions sous-jacentes en cours ont continué, surtout au cours des années humides 77-80, à créer des entonnoirs.

Les boues de Na Cl, ont été démercurisées et stockées dans un bassin à part dont le fond est constitué de boues de neutralisation.

Le sulfate de fer est stocké au-dessus d'anciennes boues de neutralisation peu perméables ; par ailleurs, la quantité de sulfate de fer stockée diminue par commercialisation de ce produit, essentiellement pour le traitement des eaux.

Les boues de neutralisation provenant à la fois de l'usine et du pompage de la tranchée aval, ont été placées dans de nouveaux bassins, en amont de l'ancien terril polluant. Ces nouveaux terrils ne polluent que faiblement la nappe par égouttage et lessivage : 1 à 1,5 g/l de sulfates et de chlorures, absence de fer et de mercure.

Ces premières mesures se sont déjà révélées efficaces sur les deux premiers kilomètres.

Distance en aval du terril	SO ₄ (g/l)		Fer (g/l)		Mercure (µg/l)	
	1974	1979	1974	1979	1974	1979
Puits de dépollution	15	8	10	3,5	3 000	60
400 m	7,5	1,7	3,5	0,3	600	99
1 600 m	5	1,2	2	0,2	340	105
2 200 m	4,2	1,7	1,5	0,25	-	-
6 000 m	1,9	1,3	-	-	1	< 0,5

Mais il est apparu au cours des trois dernières années, que cette dépollution était insuffisante, à cause de l'exploitation des gravières au Sud Est qui attirent une partie des eaux contaminées, du fort lessivage des terrils au cours des dernières années humides, de l'augmentation du débit d'eau d'égouttage des boues de neutralisation.

1.5. MESURES ACTUELLEMENT MISES EN OEUVRE

Dans le but de rechercher le système optimum de dépollution de la nappe, des techniques de modélisation ont été mises en oeuvre (modèle hydrodynamique à mailles carrées de 50 m). Après étalonnage sur le régime de nappe avec les pompages existants, grâce aux nombreuses mesures piézométriques, différentes hypothèses de pompage de dépollution ont été testées, avec ou sans mise en oeuvre de parois étanches dans l'aquifère, de façon à atteindre les objectifs suivants :

- augmenter le moins possible le débit de pompage aval dont les eaux nécessitent une neutralisation avant rejet des boues au terril et de l'eau à faible teneur dans la rivière ;
- capter tout le débit de nappe transitant sous les terrils, en essayant de créer des centres de pompage capables à la fois de diminuer le débit de nappe transitant sous l'ancien terril polluant, et de ne pomper que des eaux peu contaminées par les nouveaux terrils, donc pouvant être rejetées sans neutralisation dans la rivière.
- installer un système capable de canaliser la pollution dans l'ancien axe de façon à ce que, en cas d'arrêt accidentel des pompages aval, la pollution ne puisse pas se diriger vers l'ensemble des gravières situées au Sud Est où existent des projets de réaménagement (base de loisir...).

Le dispositif finalement préconisé est le suivant :

- maintien du dispositif de pompage aval, mais avec augmentation possible du débit en période de hautes eaux jusqu'à 45 m³/h, dirigé vers la neutralisation ;
- création d'une nouvelle tranchée de pompage entre l'ancien et le nouveau terril, capable de soutirer 150 m³/h en période de hautes eaux (rejet direct en rivière) ;
- installation d'une paroi étanche (jusqu'aux terrains argileux sous les gravières) sur 550 m de long, bordant le flanc Sud Est de l'ancien terril jusqu'au droit des pompages aval.
- comblement d'une gravière située sur le flanc Sud amont de l'ancien terril et qui favorisait l'extension transversale du sulfate de fer dissout dans les eaux de la nappe d'au moins 100 m vers le Sud, pollution qui échappait ainsi au dispositif préconisé.

1.6. MODELE HYDROCHIMIQUE

Une fois défini ce système de neutralisation à la source, il était intéressant de connaître de quelle manière et à quelle vitesse allait se poursuivre la dépollution de la nappe à l'aval.

Dans cette optique plus méthodologique, un modèle hydrochimique a été mis au point, qui vient superposer à l'écoulement des eaux souterraines, les paramètres régissant la propagation de matières en solution dans l'eau, soit la dispersivité et la rétention.

Ce modèle à l'échelle à laquelle on travaille (10 km de long), reste bidimensionnel plan : on calcule donc une teneur moyenne sur toute l'épaisseur de l'aquifère.

Pour l'étalonnage de ce modèle, il a été nécessaire d'estimer, à partir de l'historique de constitution des terrils, l'historique des charges infiltrées dans la nappe sous les terrils depuis 1936, début des dépôts.

Les paramètres de l'adsorption au sens large ne sont pas pris en compte dans ce modèle ; de ce fait, s'il est représentatif pour les sels très solubles (sulfates, chlorures), il ne l'est plus pour les éléments lourds (fer, mercure en particulier).

2. APPROCHE THÉORIQUE

2.1. PROPAGATION DES POLLUANTS EN MILIEUX POREUX

La migration des polluants entraînés par l'eau en mouvement est régie par les phénomènes de convection, dispersion (diffusion moléculaire et dispersion mécanique) et par les échanges physiques et chimiques avec le milieu. Un certain nombre de paramètres entrent en jeu dans la propagation des solutés à travers une matière poreuse. Ce sont :

. Porosité totale : ω_t

définie comme la teneur en eau volumique du milieu saturé, la porosité totale représente la somme de la capacité de rétention et de la porosité efficace : $\omega_t = \omega_e + \omega_r$.

. Porosité efficace : ω_e

Synonyme de porosité cinématique, c'est la fraction du volume de terrain occupée par l'eau gravifique qui se déplace.

. Capacité de rétention : ω_r

L'eau de rétention représente l'eau retenue dans les pores en cul-de-sac ou au voisinage des grains ; la capacité de rétention est le rapport de ce volume d'eau, non mobilisable par gravité, au volume total de milieu poreux saturé (le tout ramené à l'unité) ; $\omega_r = \omega_t - \omega_e$.

. Vitesse effective : u

C'est la vitesse moyenne des vitesses réelles des particules d'eau, elle est liée à la vitesse apparente de DARCY V par la relation

$$u = \frac{V}{\omega_e} = \frac{K \cdot i}{\omega_e}$$

avec K = perméabilité du milieu poreux
i = gradient hydraulique.

Dans la mesure où les échanges physico-chimiques avec le milieu restent négligeables (ce qui est généralement le cas pour des sels solubles, moins pour les éléments métalliques), les phénomènes importants qui déterminent la propagation des polluants dans le milieu poreux sont les suivants :

. la convection :

C'est le simple mouvement du fluide dans le milieu perméable, c'est-à-dire le déplacement selon le sens des lignes de courant, en fonction de la vitesse effective.

. la dispersion :

En s'éloignant du lieu d'injection, la masse de soluté se dilue pour occuper un volume croissant avec une concentration corrélativement décroissante. Ceci vient du fait que, dans le terrain aquifère, la vitesse des particules de fluide varie dans l'espace et dans le temps, à cause de la tortuosité du cheminement à travers la matrice poreuse et à cause de l'hétérogénéité du champ des vitesses, ce dernier facteur étant prépondérant ; la dispersion masque par ailleurs l'influence de la diffusion moléculaire que l'on peut inclure dans le paramètre dispersion.

La dispersion D se décompose selon deux directions, parallèle et perpendiculaire à l'écoulement : c'est la dispersion longitudinale et la dispersion transversale. Sa valeur est proportionnelle à la vitesse effective, d'où la définition de la dispersivité α :

$$D = \alpha u$$

avec D en m²/s, α en m et u en m/s.

. Echanges eau-eau : rétention

Des échanges de soluté peuvent avoir lieu entre le liquide et les grains solides du milieu poreux sous l'effet des différences de concentration. Ces échanges eau-solide représentés par l'adsorption, suivie de désorption si l'on est en présence d'une réaction réversible, ne sont pas pris en compte dans le modèle proposé, car ils sont tenus pour négligeables.

Les échanges qui ont lieu entre l'eau en mouvement qui occupe le volume $\omega_e V$ du volume total V et l'eau immobile occupant le volume $(\omega_t - \omega_e) V$, constitue le mécanisme de la rétention.

tion. Il s'agit d'un stockage de la pollution dans l'eau immobile, par transfert de concentrations, lors du passage du nuage minéralisé, suivi d'un déstockage (restitution) de cette même minéralisation lors de l'arrivée d'une eau moins minéralisée. La concentration de l'eau de rétention varie donc en fonction de la concentration de l'eau en mouvement ; on suppose qu'il y a homogénéisation des teneurs entre l'eau libre et l'eau de rétention au cours du pas de temps considéré.

2.2. EQUATIONS DE LA PROPAGATION

La convection représentant le simple déplacement du soluté en fonction de la vitesse effectuée a pour expression :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial (Cu)}{\partial x}$$

en tenant compte du phénomène dispersif, l'équation aux dérivées partielles dans un schéma mono dimensionnel selon l'axe des x s'écrit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial (Cu)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

avec C = concentration du soluté
D = αu = dispersion

L'équation implicite aux différences finies, obtenue à partir de l'équation aux dérivées partielles de la dispersion pour un milieu bidimensionnel, s'exprime de la façon suivante :

$$C_{i,j}^{t+1} = \frac{- D_L \omega \Delta z \frac{\Delta y}{\Delta x} \left[C_{i+1,j}^{t+1} + C_{i-1,j}^{t+1} \right] + D_T \omega \Delta z \frac{\Delta x}{\Delta y} \left[C_{i,j+1}^{t+1} + C_{i,j-1}^{t+1} \right] + \omega \Delta z \Delta x \Delta y \frac{C_{i,j}^t}{\Delta t}}{D_L \omega \Delta z \frac{\Delta y}{\Delta x} 2 + D_T \omega \Delta z \frac{\Delta x}{\Delta y} 2 + \omega \Delta z \Delta x \Delta y \frac{1}{\Delta t}}$$

avec un écoulement dans le sens de l'axe des x (associé à i), la signification des variables étant la suivante :

- C_{ij}^t = concentration de la maille ij au pas de temps t
- D_L = dispersion longitudinale = $\alpha_L u$
- D_T = dispersion transversale = $\alpha_T u$
- ω = porosité cinématique
- Δz = épaisseur de l'aquifère
- Δy = "largeur" de la maille (par rapport au sens d'écoulement)

- $\omega \Delta z \Delta y$ = section d'écoulement
- Δx = "longueur" de la maille
- Δt = durée du pas de temps.

Cette équation peut être simplifiée en éliminant les termes $\omega \Delta z$ et $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ pour un maillage carré où $\Delta x = \Delta y$, soit :

$$C_{i,j}^{t+1} = \frac{D_L [C_{i+1,j}^{t+1} + C_{i-1,j}^{t+1}] + D_T [C_{i,j+1}^{t+1} + C_{i,j-1}^{t+1}] + \Delta x^2 \frac{C_{i,j}^t}{\Delta t}}{2 D_L + 2 D_T + \Delta x^2 \frac{1}{\Delta t}}$$

2.3. MODELISATION

2.3.1. Problème de la diffusion numérique

La modélisation de la convection, avec la discrétisation de l'espace et du temps, provoque un phénomène de diffusion numérique qui n'a pas de signification physique.

En effet, la décomposition du vecteur vitesse selon ses composantes parallèles au maillage entraîne un transfert de masse dans des directions divergentes : c'est la diffusion numérique de direction. La longueur des mailles distincte de la distance parcourue liée à la durée des pas de temps entraîne une propagation différente de la réalité : c'est la diffusion numérique d'amplitude.

Pour remédier à ces phénomènes, au niveau du calcul de la convection, différentes procédures ont été testées, notamment la méthode des caractéristiques. Deux méthodes différentes ont été mises au point et testées au Service Géologique Régional Alsace. La première consistait à définir un maillage curviligne calqué sur un état hydrodynamique de la nappe de façon à éliminer la diffusion numérique (étude de la partie amont de la langue salée de Bollwiller) : cette méthode avait pour principal inconvénient une mise en oeuvre lourde. C'est pourquoi une seconde méthode a été mise au point et testée dans le cadre de la présente étude. Cette technique est basée sur la prise en compte d'une erreur angulaire et d'une erreur sur la distance.

2.3.2. Principe de résolution adopté

A partir de chaque noeud d'un maillage carré, la minéralisation se propage dans la direction du vecteur vitesse obtenu par le modèle hydrodynamique, sur une distance fonction de la vitesse et de la durée du pas de temps. Le déplacement de la minéralisation dû à la convection est déterminé en réajustant de proche en proche l'erreur commise :

a) Erreur angulaire α (cf fig. 1)

Chaque maille est considérée comme maille "départ" (D) d'un vecteur de propagation. La maille "arrivée" (A) est choisie dans l'environnement immédiat de la maille D (8 mailles alentours), en fonction de l'angle du vecteur vitesse calculée en la maille D.

L'erreur angulaire, qui, selon ce schéma, est au maximum égale à $\pi/8$ radians, est répercutée en valeur algébrique sur la maille A pour un calcul d'angle "corrigé" qui tient alors compte des erreurs amont. Cette méthode, simple dans sa conception, permet de reconstituer un schéma d'écoulement très voisin des lignes de courant tracées à partir des isopièzes, approchées sous la forme d'un parcours brisé passant par les noeuds du maillage. Les erreurs commises au niveau des distances (parcours modélisé plus long que le parcours réel) sont négligeables par rapport aux imprécisions dans la détermination des données introduites.

b) Erreur sur la distance (cf. fig. 2)

Considérant la distance à franchir durant le pas de temps et la distance intermaille, nous avons choisi une limite à franchir, physiquement définie par la demi - distance intermaille, en-deça de laquelle il n'y a aucun transfert et au-delà de laquelle le transfert est intégral. Dans ces conditions, à chaque pas de temps, la propagation d'une pollution aura un retard, ou une avance (DX), au maximum égal en distance à la demi - maille. Ce DX relatif à chaque noeud, est pris en compte dans le calcul des pas de temps ultérieurs, ce qui évite de cumuler les erreurs. Dans le cas où la propagation excède la distance inter-maille, pour un pas de temps donné, le calcul permet, par reprises successives de l'ensemble du système, de traiter les mailles dont la propagation nécessite plusieurs transferts vers les mailles aval successives.

La prise en compte de ces deux types d'erreurs, erreur angulaire d'une part et erreur sur la distance d'autre part, permet d'éviter la diffusion numérique dans l'espace et dans le temps, avec un schéma qui se rapproche assez fidèlement de la réalité, modifiée par la discrétisation de l'espace et du temps.

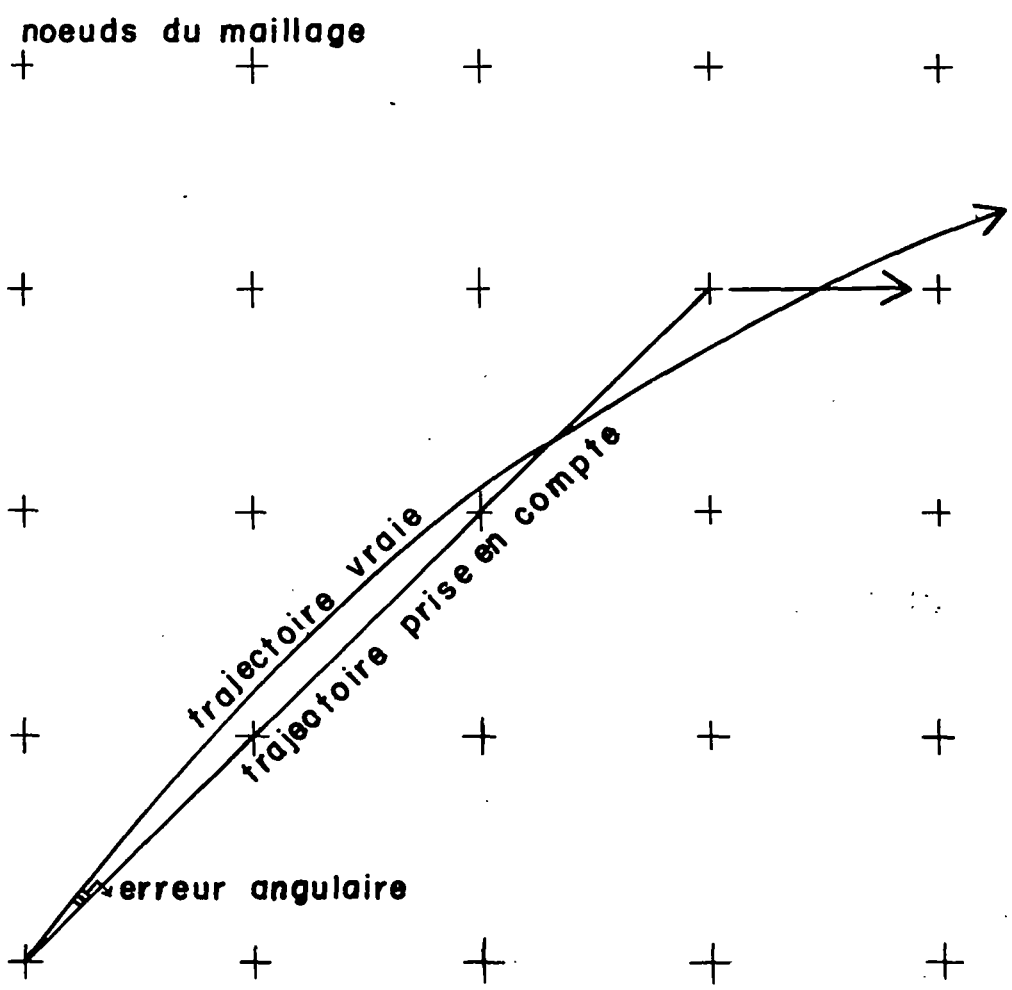
3. CARACTÉRISTIQUES DU MODELE

3.1. PROGRAMMES

Le modèle mis en oeuvre bénéficie du même "habillage" informatique que le modèle hydrodynamique VAL :

- découpage en programmes enchaînés permettant l'utilisation d'un petit ordinateur et surtout autorisant une grande souplesse d'emploi (chronologie des tâches, interruptions, etc...)

MODELISATION DES TRAJECTOIRES
AVEC TRANSMISSION VERS L'AVANT
DE L'ERREUR ANGULAIRE AMONT



- vérification très complète de la compatibilité des données ; messages d'accompagnement.
- visualisation des données et des résultats.

Un ensemble de 11 programmes et 9 sous-programmes spécifiques, auxquels s'ajoutent les programmes d'initialisation d'étude et de sortie des résultats, ainsi que les nombreux sous-programmes "support" du modèle VAL, se répartissent l'ensemble des tâches.

Les modules spécifiques du modèle hydrochimique sont les suivants :

- . LØZ 2 : Lecture des données relative à 1 pas de temps et, dans le cas du premier pas de temps, lecture ou modification de toutes les données nécessaires.
- . LØZ 3 : Ecriture simplifiée de toutes les données (dans le cas du premier pas de temps).
- . LØZ 4 et sous-programmes VITES : calcul du vecteur vitesse, en intensité et direction.
- . LØZ 5 et sous-programmes CLASH, APHLA et VITANG : Classement des potentiels par valeurs décroissantes (CLASH) afin de réaliser les corrections angulaires (APHLA) en balayant le domaine de l'aval vers l'amont. Identification de la maille aval touchée par la propagation (VITANG).
- . LØZ 5A : Calcul des flux transitant d'une maille vers la maille aval atteinte.
- . LØZ 5B : Calcul d'un coefficient de proportionalité entre débits pompés et flux de nappe.
- . LØZ 6 : Calcul des distances franchies pendant le pas de temps.
- . LØZ 7 et sous-programme CADIS : Identification des mailles en fonction de la distance à parcourir et des flux amont convergents sur la maille considérée.
- . LØZ 8 et sous-programme VECION : Convection des concentrations d'une maille vers la maille aval. La concentration sur une maille est égale à la moyenne pondérée par les flux des concentrations des mailles amont convergents sur la maille considérée.
- . LØZ 8A : Prise en compte de l'influence de la pluie ; possibilité de court-circuiter le programme suivant relatif à la dispersion, par utilisation du DATA-SWITCH 0 ON.
- . LØZ 9 et sous-programme DISPA : Calcul itératif de la dispersion, selon l'équation suivante (méthode implicite, surrelaxation) :

$$C_{i,j}^{t+1} = C_i \left(\left[\sum_{i=1}^8 D_i C_i + \frac{DX^2}{DT} C_{i,j}^t (K) \right] / \left[\sum_{i=1}^8 D_i + \frac{DX^2}{DT} \right] - C_i \right) * RØ$$

avec :

$C_{i,j}^t(k)$ = concentration de la maille (i, j) au pas de temps t

D_i = dispersion longitudinale ou transversale selon l'orientation par rapport à l'axe de propagation.

C_i = concentration des mailles de calculs évoluant au cours du calcul itératif, correspondant en fin de calcul à la concentration au pas de temps t+1.

DX = distance inter-maille (le maillage étant carré $DX = DY$)

DT = durée du pas de temps considéré.

R_0 = coefficient de surrelaxation.

3.2. FICHIERS

Le modèle fonctionne en dialoguant avec trois fichiers représentant l'ensemble des informations nécessaires au calcul (cf. fig. 3) :

- . fichier 1 : données hydrodynamiques du fichier utilisé par le modèle VAL.
- . fichier 4 : données générales (également utilisé par VAL).
- . fichier 10 : fichier chimique où sont stockés les paramètres chimiques et les résultats des simulations du régime transitoire.

3.3. PROCEDURES (cf. figure 4) :

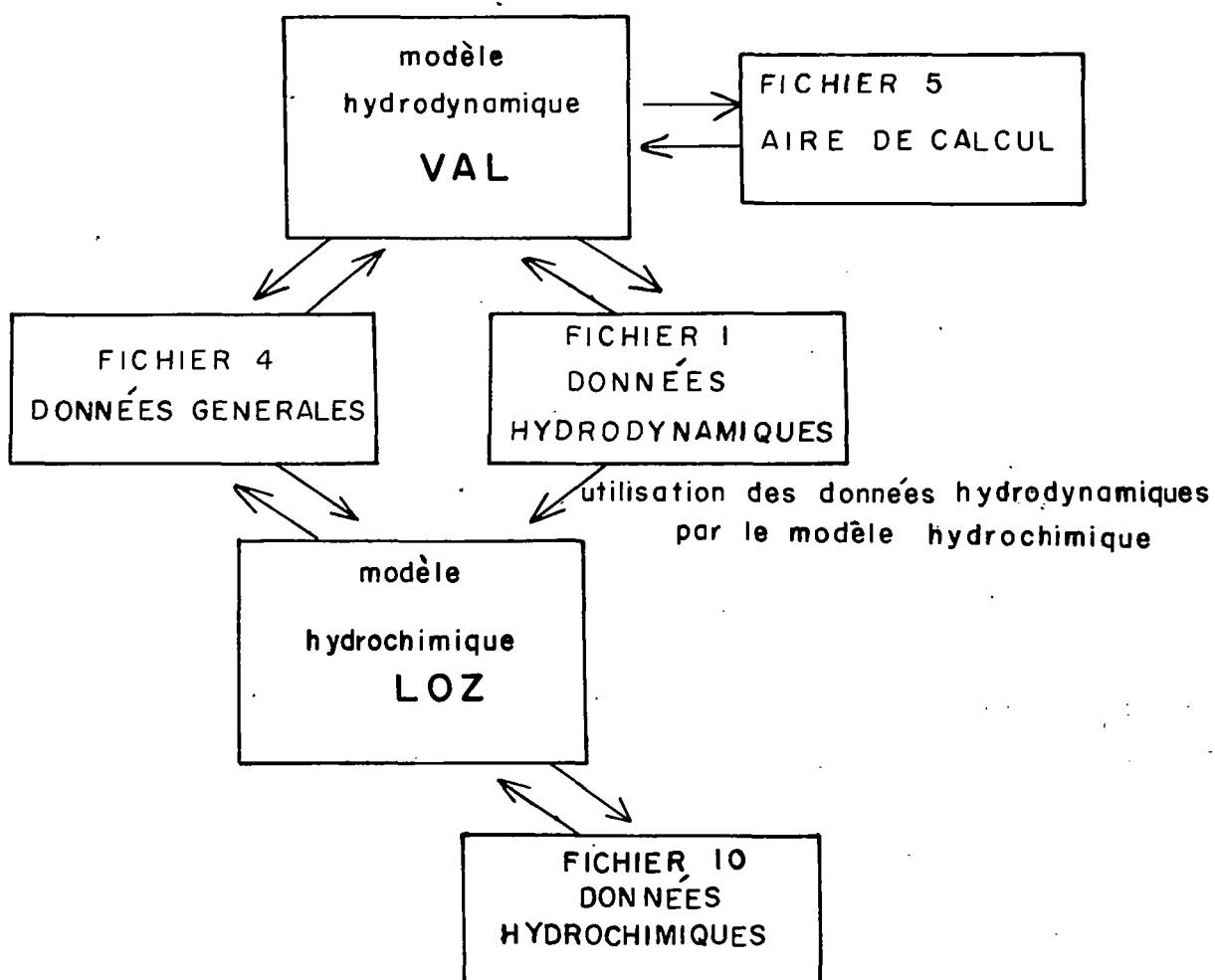
La mise en place de procédures et superprocédures permet d'optimiser la saisie des données et facilite l'utilisation des programmes dont l'enchaînement est alors automatique. Parmi les versions proposées, on note pour l'instant le calcul en régime transitoire avec ou sans changement de piézométrie entre les pas de temps et la possibilité de faire le calcul avec ou sans dispersion.

3.4. TESTS DE FIABILITE

Afin de contrôler la représentativité des résultats obtenus par rapport à la théorie, le modèle chimique a été testé en comparant les résultats obtenus avec les courbes rencontrées dans la bibliographie, et notamment la thèse de J.P. SAUTY (cf. Bibliographie)

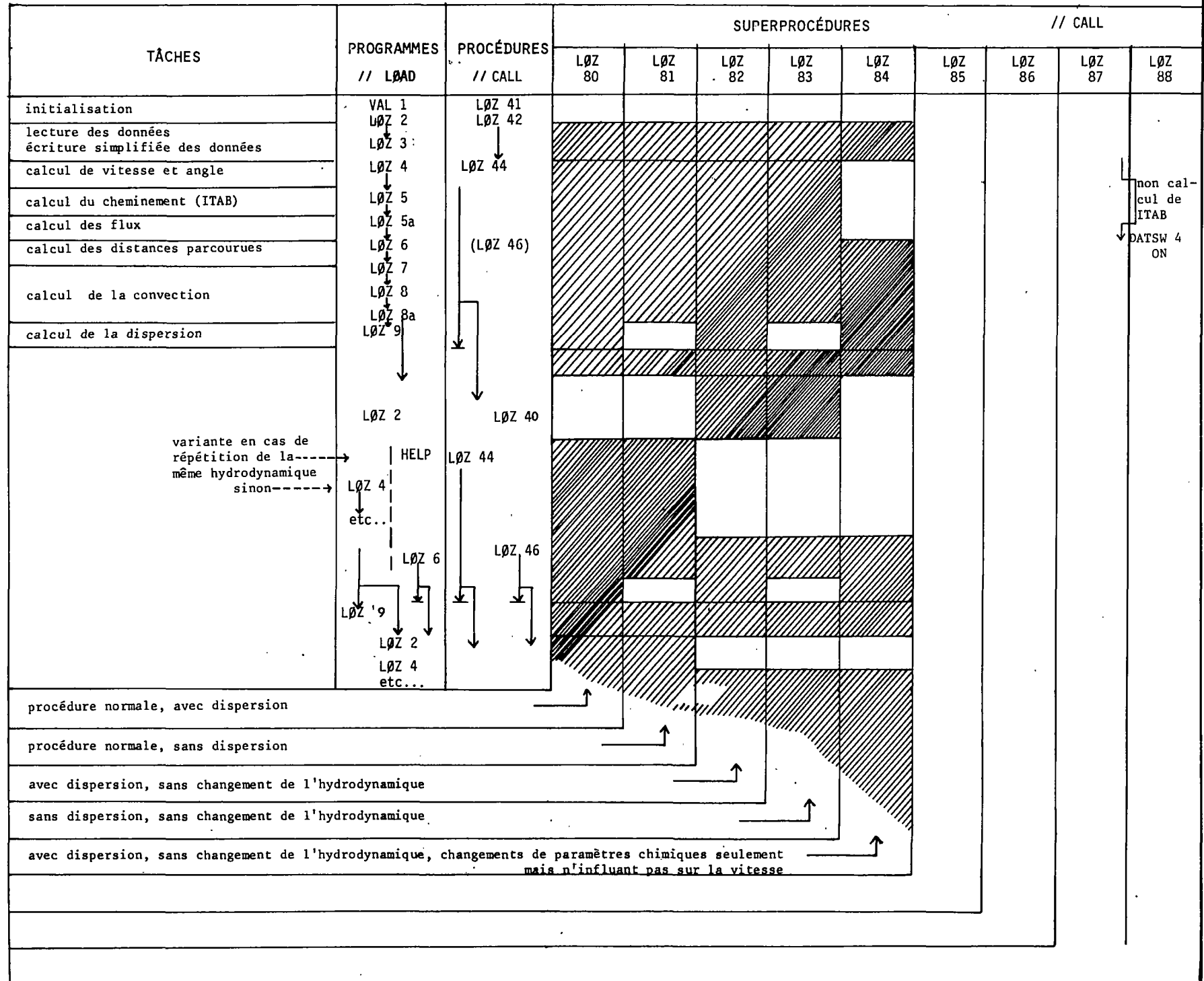
Les simulations réalisées dans ce cadre ont donné satisfaction. Elles ont permis de préciser les limites d'utilisation en fonction des conditions imposées et des résultats re-

DIALOGUES ENTRE
LES DEUX MODÈLES
ET LEURS FICHIERS



SCHEMA' DE L'ENCHAINEMENT DES PROGRAMMES ET DES PROCEDURES

Fig. 4



cherchés. C'est ainsi qu'il ne doit pas exister une trop grande disproportion entre la taille des mailles et la distance parcourue par l'eau au cours d'un pas de temps. De même la proximité de la source de pollution ou des limites du modèle peut influencer de façon sensible les résultats obtenus.

3.5. TESTS DE MODELISATION D'UN CAS SIMPLE

Afin d'étudier le comportement d'une pollution dans un cas de figure simple, le modèle a été utilisé pour simuler un secteur aquifère homogène correspondant aux conditions rencontrées au droit des piézomètres de Munwiller (Haut-Rhin). Des expériences de traçage ont été réalisées à cet endroit en 1980, dans le cadre des études consacrées à la propagation de la salure dans la nappe en aval du Bassin Potassique. Les conditions hydrogéologiques y sont les suivantes :

- perméabilité $K = 2 \times 10^{-3}$ m/s
- épaisseur de la strate testée $e = 10$ m
- gradient de la nappe $i = 1.2 \times 10^{-3}$
- porosité efficace $\omega_e = 0.1$
- vitesse $u = \frac{Ki}{\omega_e} = 750$ m/an (vitesse de convection)

Ces conditions ont été imposées au modèle, dont on a fait varier les paramètres suivants, afin d'étudier leur influence :

- . porosité totale ω_t : choix de valeur entre 0.25 (porosité de rétention $\omega_r = 0.15$) et 0.10 ($\omega_r = 0$).
- . dispersivité α_L et α_T : hypothèses allant d'un schéma purement "rétentif" ($\alpha_L = \alpha_T = 0$) à un schéma très fortement "dispersif" ($\alpha_L = 150$ m ; $\alpha_T = 10$ m), le rapport α_L/α_T restant constant ($\frac{\alpha_L}{\alpha_T} = 15$).

Deux découpages de l'espace et du temps ont été mis en oeuvre, afin de tester l'influence des paramètres à courte et grande distance :

- . modèle courte distance :
 - distance inter-maille : 0,25 m
 - distance simulée : 10 mètres
 - découpage du temps : pas de temps de 3 heures.
 - durée simulée : jusqu'à 230 heures.
- . modèle grande distance :
 - distance inter-maille : 250 m
 - distance simulée : 10 km
 - découpage du temps : pas de temps de 4 mois
 - durée simulée : jusqu'à 30 ans.

Les courbes d'évolution des concentrations à l'aval d'une injection de courte durée ont été comparées entre elles. Les conclusions suivantes ont pu être faites :

- à courte distance (cf. fig. 5)

La dispersion a une grande influence sur les courbes d'évolution. Pour des dispersivités importantes, le passage du pic de concentration est enregistré longtemps avant le temps qui correspond à l'écoulement de la nappe : en d'autres termes, la vitesse du pic (ou vitesse modale V_m) est plus élevée que la vitesse d'écoulement $u = \frac{K_i}{We}$ liée à la convection seule.

La rétention à courte distance joue un rôle moins important, en ce qui concerne la vitesse du pic, les volumes d'eau mis en jeu étant faibles.

- à grande distance (cf. fig. 6)

La dispersion joue un rôle faible vis-à-vis de la vitesse de propagation du pic V_m . Par contre une dispersivité transversale α_T forte diminue de façon importante les teneurs enregistrées.

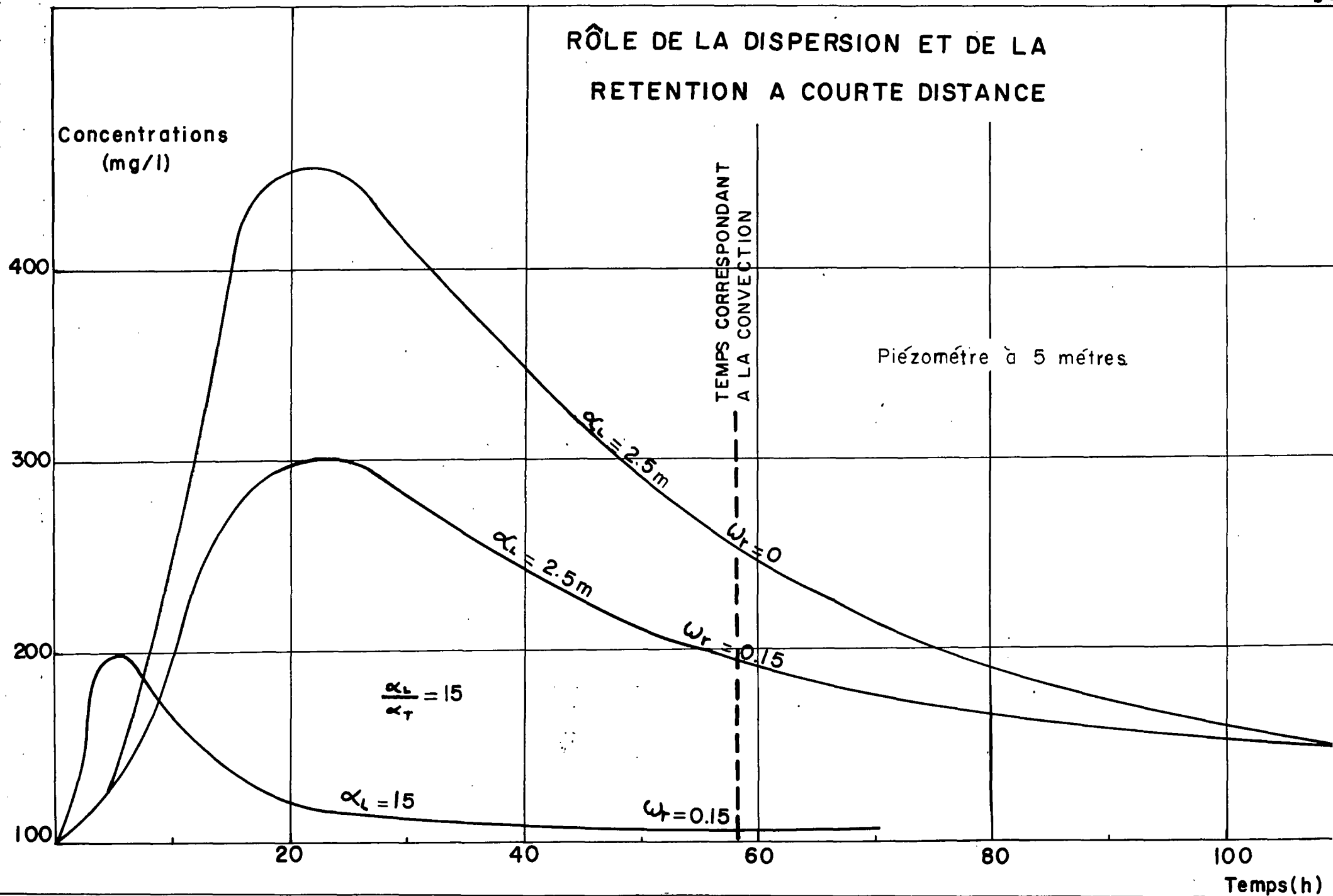
C'est la rétention qui joue le rôle prépondérant à grande distance vis-à-vis de la vitesse du pic V_m . Une forte rétention provoquera une arrivée très tardive du pic, par rapport à la vitesse d'écoulement de la nappe u .

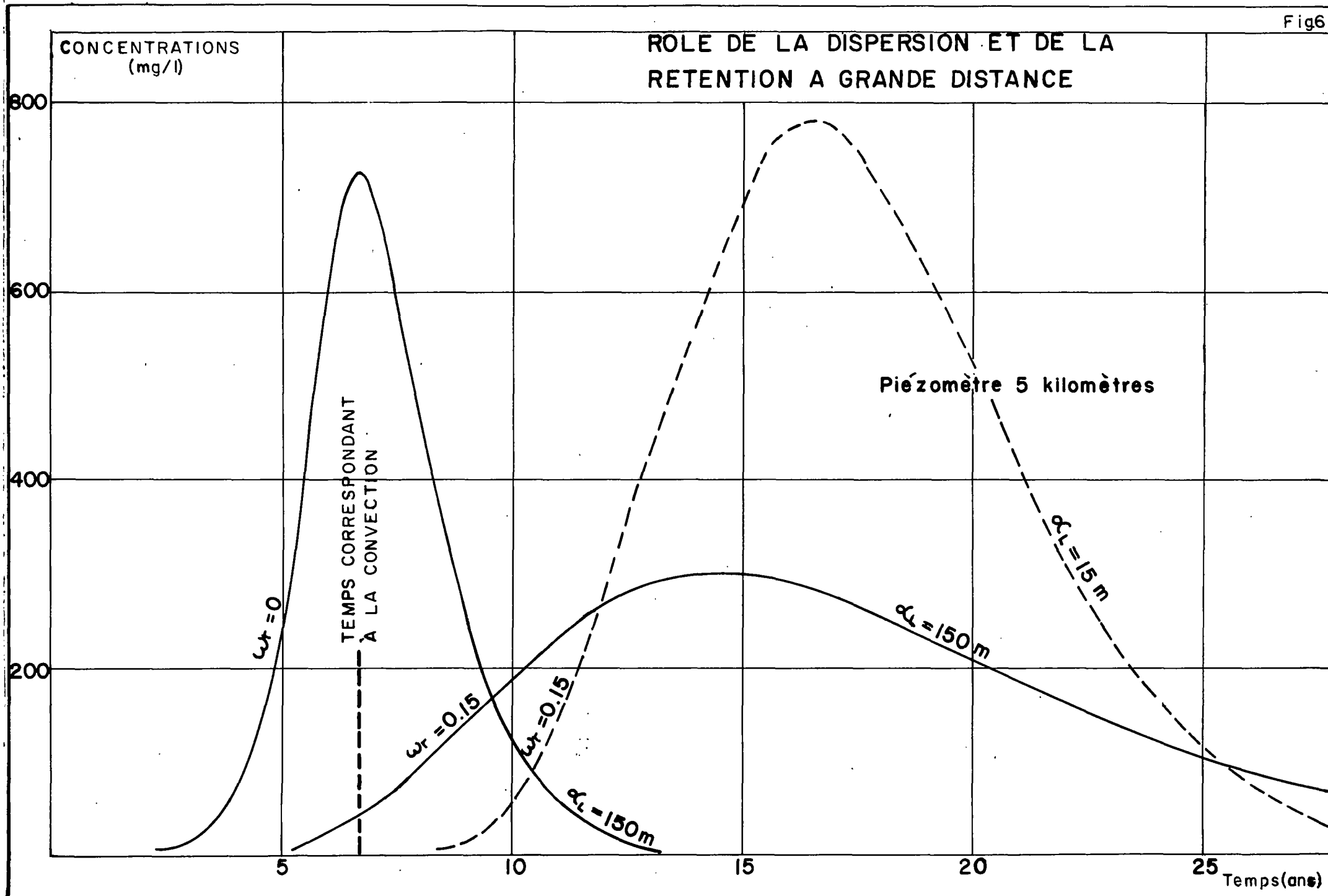
En conclusion, à courte distance, l'évolution des concentrations est particulièrement sensible à la dispersion qui accélère le déplacement du pic (champ d'application des modèles purement "dispersifs"). Au contraire, à grande distance, c'est la rétention qui joue un rôle prédominant, en ralentissant le déplacement du pic. Une application à la détermination de la rétention ω_r a pu être déduite à partir des courbes obtenues par les simulations sur modèle sans dispersion, en corrélant le rapport des vitesses $\frac{V_m}{u}$ avec le rapport des porosités $\frac{\omega_r}{\omega_t}$. On obtient la courbe de la figure 7 qui passe par deux extrémités bien définies :

- pour $\omega_r = 0$ (rétention nulle), on a $\frac{\omega_r}{\omega_t} = 0$ et $V_m = u$ ou $\frac{V_m}{u} = 1$ (vitesse modale = convection),
- pour $\omega_r = \omega_t$ (pas de porosité efficace), le déplacement est nul, d'où $\frac{V_m}{u} = 0$.

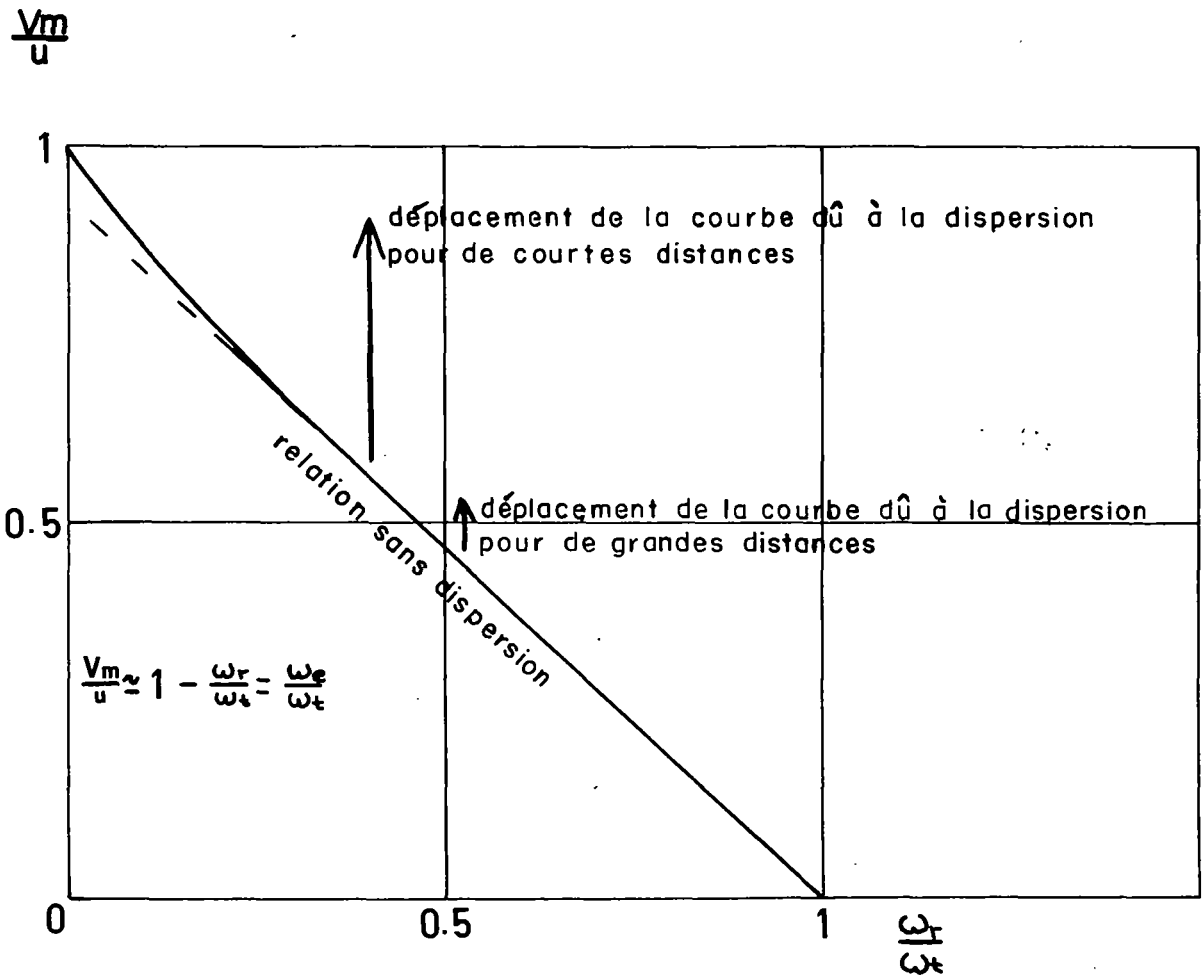
Ces résultats ont été directement utilisés au niveau de l'application au problème des terrils de Thann et Mulhouse.

RÔLE DE LA DISPERSION ET DE LA RETENTION A COURTE DISTANCE





RELATION ENTRE LE RAPPORT DES POROSITÉS
 ET LE RAPPORT DES VITESSES
 LORSQUE LA DISPERSION JOUE UN RÔLE FAIBLE



4. MISE EN OEUVRE DU MODÈLE SUR LE SECTEUR DE THANN ET MULHOUSE

4.1. MODELE HYDRODYNAMIQUE

Les études du secteur des terrils de Thann et Mulhouse ont nécessité, dans une première phase, la mise en oeuvre d'un modèle hydrodynamique en régime permanent et transitoire. Le maillage adopté comporte, au total, 2 254 éléments carrés de trois tailles différentes :

- . des éléments de 50 mètres de côté au centre du domaine, englobant les terrils et leur environnement immédiat,
- . une couronne d'éléments intermédiaires de 100 mètres de côté, englobant, en particulier, les nombreuses gravières situées au sud-est des terrils,
- . sur le pourtour, des éléments de 500 mètres de côté, couvrant l'ensemble de l'aquifère des alluvions de la Thur.

Compte tenu des caractéristiques hydrogéologiques de ce secteur, l'équation des nappes libres a été utilisée.

Le modèle hydrodynamique a servi de base au modèle hydrochimique, qui a été ensuite connecté avec lui. Les simulations ont permis d'étudier le comportement de l'aquifère au voisinage des terrils, en déterminant l'impact des pompages de fixation de la pollution, l'influence des voiles étanches en projet et l'effet des gravières existantes ou en cours de creusement.

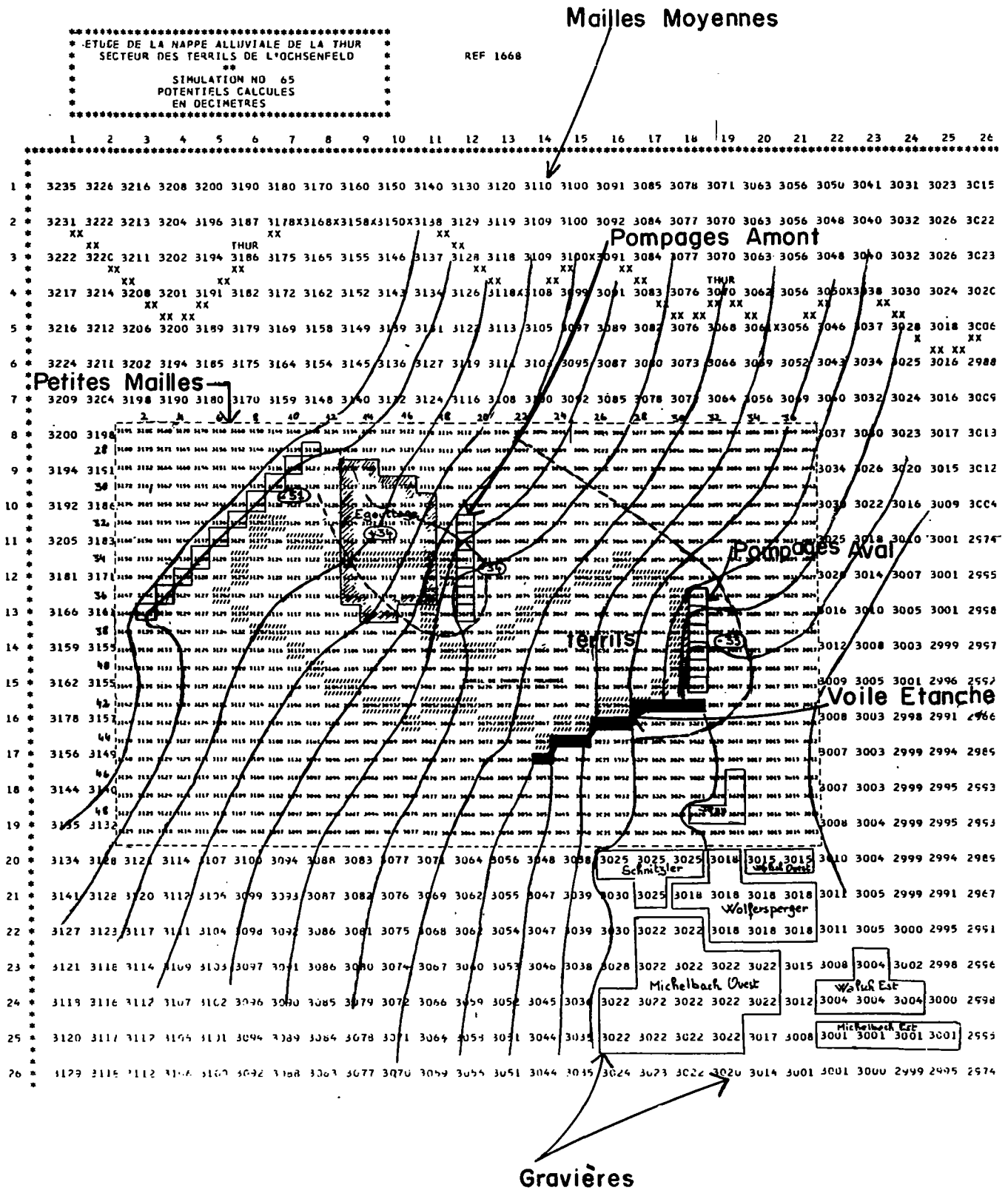
Les nombreuses simulations réalisées ont permis d'étudier en particulier le rôle des gravières :

- . modification de l'hydrodynamique avec attraction des filets de courant venant de l'amont, donc attraction des pollutions,
- . effet de "pompage" produit par le creusement d'une gravière (remplacement du volume de graviers par un volume de vide, qui doit être occupé par l'eau - en d'autres termes, passage d'un coefficient d'emmagasinement $S \approx 0,1$ à $S = 1$),
- . rôle régulateur des gravières en régime transitoire.

Le modèle hydrodynamique a permis de tester différents dispositifs de fixation de la pollution en aval des terrils, avec mise en jeu des différents moyens :

- . pompages aval (forages et tranchée drainante) pour intercepter la pollution ;
- . voiles étanches pour canaliser la pollution vers les pompages et éviter le cheminement de la pollution vers les gravières situées au sud-est ;
- . pompages amont pour diminuer le gradient de la nappe sous les terrils, donc diminuer les débits, afin que les forages aval pompent un débit moindre d'une eau plus minéralisée ;

EXEMPLE DE DISPOSITIF TESTÉ AVEC LE MODÈLE HYDRODYNAMIQUE



- . comblement d'une gravière située en pied de terril, ce plan d'eau ayant un effet de dispersion de la pollution.

La figure 8 présente l'un des dispositifs testés par le modèle hydrodynamique.

4.2. MODELE HYDROCHIMIQUE

4.2.1. Maillage adopté

Le maillage utilisé dans le modèle hydrochimique correspond à l'environnement grande maille du modèle hydrodynamique. Il s'étend à l'est au-delà des puits du Langen-Zug et de la ligne de forages de Wittelsheim.

Le maillage est constitué par 210 éléments carrés de 500 mètres de côté, répartis en 10 lignes du nord au sud et en 21 colonnes d'ouest en est, orientées selon le système Lambert.

4.2.2. Conditions d'écoulement déduites du modèle hydrodynamique

Les données et les résultats du modèle hydrodynamique ont servi de base au calcul des conditions d'écoulement qui président au déroulement du régime transitoire du modèle hydrochimique. Les figures 9 et 10 présentent les conditions moyennes de répartition des potentiels sur la zone d'étude. La figure 11 présente les cotes du substratum de l'aquifère et la figure 12 les perméabilités des alluvions. La figure 13 présente l'épaisseur des alluvions mouillées calculée. En fonction de ces éléments, le modèle hydrochimique a calculé les conditions d'écoulement, concrétisées, en particulier, par les documents suivants :

- . figure 14 : Vecteur vitesse d'écoulement
- . figure 15 : Angle du vecteur vitesse
- . figure 16 : Flux de transit

4.2.3. Conditions aux limites - bruit de fond

Un bruit de fond de 30 mg/l, représentant la teneur naturelle en sulfates dans la nappe, a été appliqué sur l'ensemble du domaine. Les conditions aux limites sont telles que le flux de pollution peut sortir à l'aval de l'écoulement (limite est). Sur les autres limites, la concentration reste identique au bruit de fond, car les échanges entre la nappe et l'extérieur n'affectent pas le chimisme.

4.2.4. Conditions d'injections

La source d'injection de la concentration est simulée à l'amont du modèle sur les deux mailles (7/2-3) afin de tenir compte de la composante sud de propagation, particulièrement mise en évidence par la géophysique. Il s'agit là d'une concentration imposée pendant le pas de temps considéré. Le front d'alimentation (de pollution) est égal à la largeur de la maille, soit 500 m, ce qui représente une extension 1/4 supérieure à la valeur réelle au pied du terril. Une correction de concentration est appliquée pour tenir compte de ce facteur. Pour le modèle, l'injection à la source remonte à 1943, bien que l'historique des dépôts de SO₄ Fe ne date que de 1948, ceci a permis de prendre en compte un résidu de pollution venant

 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES, *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 2 *
 * POTENTIELS MESURES (E. MOY.) *
 * OCHSENFELD *

REF 6505

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21																		
1																						2540	2511	2490	2471	2453													
2																							2610	2570	2538	2513	2491	2476	2458										
3																							2658	2610	2566	2535	2516	2496	2481	2466									
4																							2835	2798	2761	2715	2666	2618	2571	2541	2523	2503	2488	2473					
5	3186	3151	3106	3070	3025	2980	2941	2898	2861	2830	2796	2760	2720	2676	2626	2583	2550	2531	2511	2493	2478																		
6	3183	3148	3105	3070	3020	2975	2938	2896	2861	2830	2796	2765	2735	2691	2655	2603	2568	2541	2521	2503	2486																		
7	3178	3143	3101	3053	3010	2970	2935	2896	2861	2835	2803	2775	2740	2710	2665	2621	2583	2550	2530	2510	2493																		
8	3175	3140	3098	3051	3010	2973	2936	2901	2868	2838	2810	2781	2746	2711	2676	2640	2600	2566	2538	2518	2500																		
9	3160	3130	3093	3053	3020	2976	2941	2906	2875	2843	2813	2785	2750	2716	2681	2655	2613	2578	2540	2523	2503																		
10	3146	3121	3075	3046	3013	2975	2943	2910	2880	2845	2811	2780	2748	2716	2683	2653	2621	2590	2560	2533	2506																		

```

*****
*   ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES,   *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*                                     **      *
*           SIMULATION NO  2             *
*     POTENTIELS MESURES(F. MOY.)       *
*                                     ****  *
*****

```

REF 6505

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
*	*****																						
1	*	*****AAAAAAAAA																			*		
	*	*****AAAAAAAAA																			*		
	*	*****AAAAAAAAA																			*		
2	*	*****BBB															*****AAAAAAAAA						*
	*	*****BBB															*****AAAAAAAAA						*
	*	*****BBB															*****AAAAAAAAA						*
3	*	*****												*****HBBB			*****AAAAAAAAA						*
	*	*****												*****B			*****AAAAAAAAA						*
	*	*****												*****B			*****AAAAAAAAA						*
4	*	*****												*****D			*****AAAAAAAAA						*
	*	*****												*****C			*****AAAAAAAAA						*
	*	*****												*****B			*****AAAAAAAAA						*
5	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
6	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
7	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
8	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
9	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
10	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			
	*	*****GGGG		*****FFFF		*****EEEE		*****DDDD		*****CCCC		*****BBBB		*****AAAAAAAAA						*			

1/2

 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES, *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 1 *
 * COTES DU SUBSTRATUM *
 * EN DECIMETRES *

REF 6504

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1																						
2																						
3																						
4																						
5	3100	3050	3006	2973	2900	2798	2726	2673	2643	2618	2583	2550	2530	2508	2495	2476	2400	2346	2300	2273	2250	
6	3100	3058	3014	3000	2923	2800	2741	2693	2665	2636	2600	2571	2553	2526	2503	2480	2421	2356	2300	2288	2275	
7	3091	3050	3016	2983	2950	2850	2771	2725	2688	2661	2628	2581	2551	2516	2500	2468	2443	2388	2350	2316	2308	
8	3081	3036	3000	2968	2926	2871	2800	2750	2713	2678	2641	2575	2525	2486	2470	2451	2431	2386	2350	2335	2323	
9	3073	3033	3000	2966	2928	2886	2831	2773	2730	2700	2626	2550	2478	2450	2450	2431	2443	2350	2331	2350	2341	
10	3068	3033	3003	2973	2941	2906	2861	2800	2750	2698	2600	2500	2441	2400	2350	2350	2300	2315	2298	2293	2315	

Figure 11

 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES, *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 1 *
 * PERMEABILITES *
 * EN 10-5 M/S *

REF 6504

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1																	48	48	48	48	48
2															58	58	58	58	58	58	58
3													80	80	80	80	80	80	80	80	80
4										88	96	98	98	88	88	88	88	88	88	88	88
5	63	63	73	68	98	120	120	120	120	94	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
6	33	40	48	58	68	80	94	95	108	104	88	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
7	20	23	33	33	40	43	58	65	73	73	68	63	68	68	68	68	68	68	68	68	68
8	15	20	23	28	28	28	33	40	40	43	48	43	43	48	48	48	48	48	48	48	48
9	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	28	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
10	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28

Figure 12

```

** *****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES, *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
* ** *
* SIMULATION NO 1 *
* PAS DE TEMPS NO 3 *
* EPAISSEUR DES ALLUVIONS MOUILLES *
* EN DECIMETRES *
** *****

```

REF 6504

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1																145	130	153	153	163	
2															168	146	136	126	160	180	188
3														187	160	138	130	120	155	206	216
4										275	223	233	216	181	155	131	141	163	186	238	223
5	66	101	100	96	125	181	215	225	218	211	213	210	190	168	131	107	150	185	211	220	228
6	83	90	86	70	96	175	196	203	196	193	196	193	181	165	151	123	147	185	221	215	211
7	86	93	85	70	60	120	163	171	173	173	175	193	188	193	165	153	140	161	180	193	185
8	93	103	98	83	83	101	136	151	155	160	168	206	221	225	206	188	168	180	188	183	176
9	86	96	93	86	91	90	110	133	145	143	186	235	271	266	231	223	170	228	208	173	161
10	78	88	71	73	71	68	81	110	130	156	211	280	307	316	333	303	321	275	261	240	191

Figure 13

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES, *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
* ** *
* SIMULATION NO 1 *
* VECTEUR VITESSE *
* EN M/AN *
*****

```

REF 6504

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21							
1																	425	825	590	588	284							
2																	692	1373	1069	944	669	634	418					
3																	1136	2344	1952	1270	1103	926	772	506				
4																	1099	2281	2516	2803	2860	2696	2348	1417	1142	1077	838	545
5	764	1620	1885	2427	2952	2836	3020	2971	2468	2123	2110	2228	2562	2807	3060	2757	1636	1252	1220	1075	569							
6	429	981	1143	1828	2171	1836	2277	2370	2178	2085	1872	1662	2007	2328	2444	2727	1854	1303	1061	1029	598							
7	254	595	961	1058	1248	978	1243	1532	1378	1342	1371	1324	1423	1606	2032	1945	1781	1245	945	841	483							
8	221	467	661	802	749	721	962	264	1108	916	882	899	996	1028	1125	1276	1276	1052	747	623	327							
9	308	506	600	570	573	628	532	494	476	526	518	645	709	720	681	689	980	759	639	445	232							
10	229	496	623	469	536	557	508	460	499	535	509	526	576	598	555	589	549	583	546	484	276							

Figure 14

** *****
 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES, *
 * EN AVAL DES TFRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 1 *
 * ANGLE ALPHA DU VECT VITESSE *
 * EN DEGRFS *
 ** *****

REF 6504

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1																	355	357	359	8	27
2															0	356	351	357	7	17	33
3													10	15	16	6	14	27	22	43	
4										352	358	359	2	9	19	30	17	37	22	1	37
5	356	355	359	359	357	357	355	358	0	355	358	2	12	11	0	0	27	6	24	4	39
6	349	343	356	349	353	353	348	358	0	3	8	13	29	23	24	21	27	21	26	25	40
7	347	340	354	346	337	355	357	2	4	12	12	14	23	15	12	36	15	25	4	21	38
8	333	345	354	359	6	4	3	13	9	16	10	20	8	4	12	36	20	25	13	17	48
9	339	344	329	356	0	1	8	11	23	7	1	0	1	4	11	12	15	20	43	23	17
10	331	351	337	352	346	359	1	4	8	1	358	355	353	0	1	358	5	16	18	28	5

Figure 15

 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES, *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 2 *
 * FLUX DE TRANSIT INTER-MAILLE *
 * EN 10-3 M3/S *

REF 1502

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1																		23	17	16	16	0
2																44	31	23	21	17	23	0
3														79	62	39	22	25	27	36	0	
4										92	99	121	107	84	70	47	28	43	43	36	0	
5	24	36	34	54	34	110	136	117	96	83	86	90	89	93	57	46	46	44	56	38	0	
6	13	20	17	30	48	72	97	84	76	75	62	56	110	101	97	46	64	40	65	58	0	
7	8	12	14	12	15	28	48	50	39	47	40	52	78	65	57	71	40	48	30	26	0	
8	9	10	13	11	11	15	21	24	23	25	29	38	42	43	41	63	34	44	21	18	0	
9	7	9	10	8	11	9	11	12	12	14	21	35	36	34	23	32	27	33	20	19	0	
10	0	10	0	6	7	6	8	10	13	17	22	31	33	36	32	33	31	27	22	21	0	

Figure 16

des anciens terrils des usines chimiques de Thann. Le résidu sulfaté a été estimé à 600 mg/l. Les valeurs de concentrations à l'injection ont été calculées proportionnelles à la somme des dépôts cumulés au cours du temps ainsi que directement proportionnelles aux intensités de la pluie efficace. On a, en effet, considéré que l'infiltration dans la nappe sous le terril était directement liée aux pluies agissant sur le terril. L'augmentation du débit d'égouttage, due aux pompages de dépollution, a été prise en compte à partir de 1974 ; elle entraîne un accroissement de la masse polluante amont.

Le calcul de dépollution, basé sur les bilans (débits et teneurs) communiqués par les usines de Thann et Mulhouse, a été appliqué à partir de 1974 sur la maille 7-3:

- Conditions imposées à la source,
- Dépollution (chiffre de Thann) prise en compte.

4.2.5. Découpage du temps

Le découpage en pas de temps de 3 ans depuis 1943 a permis de suivre l'évolution des sulfates de façon précise. Ce découpage permet, entre autre, de respecter les variations pluriannuelles de pluie efficace.

4.2.6. Pluie efficace (cf. figure 17)

Les valeurs de pluie efficace prises en compte sont celles de la station de l'Ochsenfeld, déduites par corrélation avec la station de Hirtzbach. La valeur moyenne affectée à un pas de temps est une moyenne des valeurs de pluie efficace pour les trois années constituant ce pas de temps. On note bien sur le schéma retenu l'alternance de périodes humides (65 à 70) et de périodes sèches (71 à 76).

4.2.7. Pompages

Outre les pompages de fixation de la pollution situés immédiatement à l'aval du terril, il existe sur le domaine des pompages qui ont, d'ailleurs, été une source importante de documentation en ce qui concerne l'évolution des concentrations dans le temps.

Dans le modèle ont été ainsi pris en considération les pompages du Langen-Zug à partir de 1958, date des premières mesures. Un débit moyen de 36 m³/h par puits a été affecté sur 9 puits regroupés sur 3 mailles (3-15, 4-15, 5-15), soit 108 m³/h pour chacune de ces mailles. Ce dispositif reproduit ainsi une dépollution qui influence fortement les charges transitant à l'aval de l'axe des puits du Langen-Zug.

5. RÉSULTATS OBTENUS

5.1. ÉTALONNAGE DU MODÈLE SUR LA PÉRIODE PASSEE (JUSQU'EN 1980)

Les valeurs de concentrations en sulfates obtenues au cours des pas de temps successifs ont été analysées en comparaison avec les valeurs mesurées sur les différents piézomètres d'observations relevées depuis 1958 pour certains.

L'analyse a porté, d'une part, sur des profils transversaux et longitudinaux et, d'autre part, sur des courbes d'évolution des teneurs en fonction du temps, en un point donné.

Le tableau suivant résume les conditions imposées au modèle pour la période d'étalonnage (1941 - 1980) et pour l'extrapolation jusqu'en 1994.

RESUME DES CONDITIONS IMPOSEES AU MODELE HYDROCHIMIQUE
(Simulations 3006, 3007 et 3008)

Pas de temps PT	Années	Concentr. imposée maille 7-3	Concentr. imposée maille 7-2	Pluie efficace imposée	Pompages de fixation de la pollution	Pompages Langen-Zug	Paroi étanche
		mg/l	mg/l	mm			
1	41/43	500	100	350			
2	44/46	500	100	350			
3	47/49	500	100	350			
4	50/52	500	100	350			
5	53/55	500	100	350			
6	56/58	820	280	340			
		g/l					
7	59/61	1,460	460	320		X	
8	62/64	1,900	640	280		X	
		g/l					
9	65/67	4,600	1,500	490		X	
10	68/70	6,1	2,0	520		X	
11	71/73	2,45	0,815	170		X	
12	74/76	1,2	1,8	200	X	X	
13	77/78	2,7	3,3	350	X	X	
14	79/80	2,7	3,3	350	X	X	
15	81/82	-	-	350	X	X	X
16	83/84	-	-	350	X	X	X
17	85/86	-	-	350	X	X	X
18	87/88	-	-	350	X	X	X
19	89/90	-	-	350	X	X	X
20	91/92	-	-	350	X	X	X
21	93/94	-	-	350	X	X	X

EVOLUTION DE LA PLUIE EFFICACE

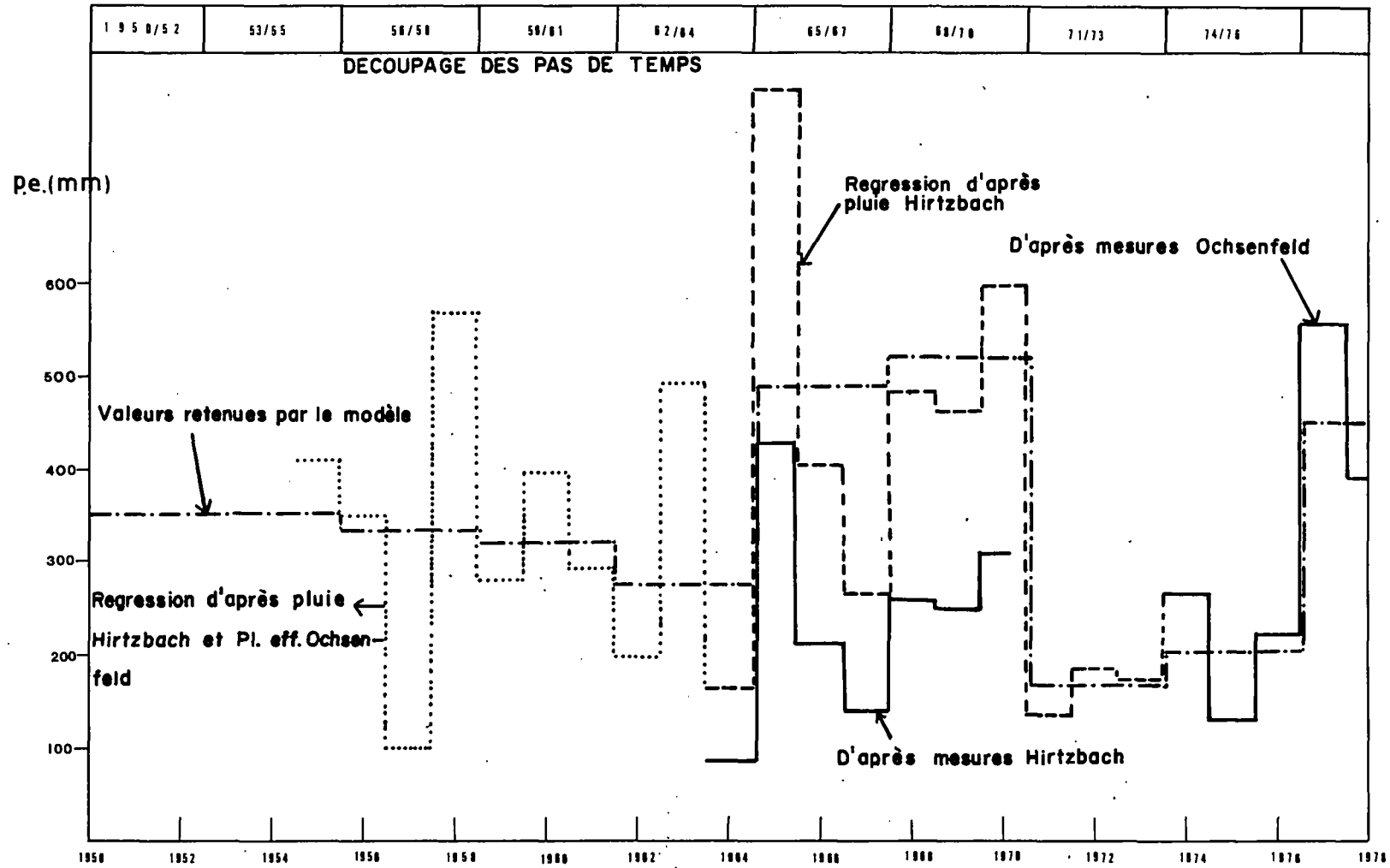


Fig. 17

5.1.1. Profil longitudinal (cf. figure 18)

Un profil longitudinal dans l'axe de la langue salée a été défini depuis le terril jusqu'au puits 182 du Langen-Zug, soit sur une distance de 6 km. Ce profil, établi en 1973, permet de préciser une situation de pollution immédiatement antérieure aux travaux effectués pour réduire le flux polluant à la source. Sur ce profil, regroupant des points d'observation proches du terril (piézomètres 101-102), des points à moyenne distance (gravière Friedrich) et des points à longue distance (puits 182 Langen-Zug), on note que les valeurs calculées par le modèle coïncident dans les espaces de tolérance définis. Ceci n'est pas vrai pour une distance inférieure à 500 m, pour laquelle la valeur modèle est inférieure aux valeurs mesurées. On peut expliquer ce phénomène par la difficulté d'attribuer au noeud du modèle une valeur de concentration correspondant à 500 m de front de nappe (largeur de la maille), alors que la valeur mesurée n'est représentative que d'un espace ponctuel. De plus, les variations très accentuées enregistrées sur le piézomètre 101 sont difficilement interprétables et extrapolables à la maille.

5.1.2. Courbes d'évolution des concentrations en fonction du temps

Plusieurs points du domaine, dont l'historique est connu depuis de nombreuses années, ont été définis pour servir de référence à l'étalonnage. On distingue respectivement le puits de pompage n° 182 du Langen-Zug et le puits n° 300 au niveau de Wittelsheim, sur lesquels les mesures remontent à 1958 et 1964.

Aux abords du terril et jusqu'au niveau des pompages du Langen-Zug, les mesures trop récentes (1974) ne permettent pas de construire des courbes d'évolution dans le temps, mais ont permis de contrôler la validité des résultats sur les pas de temps intéressant la période 74 à 80.

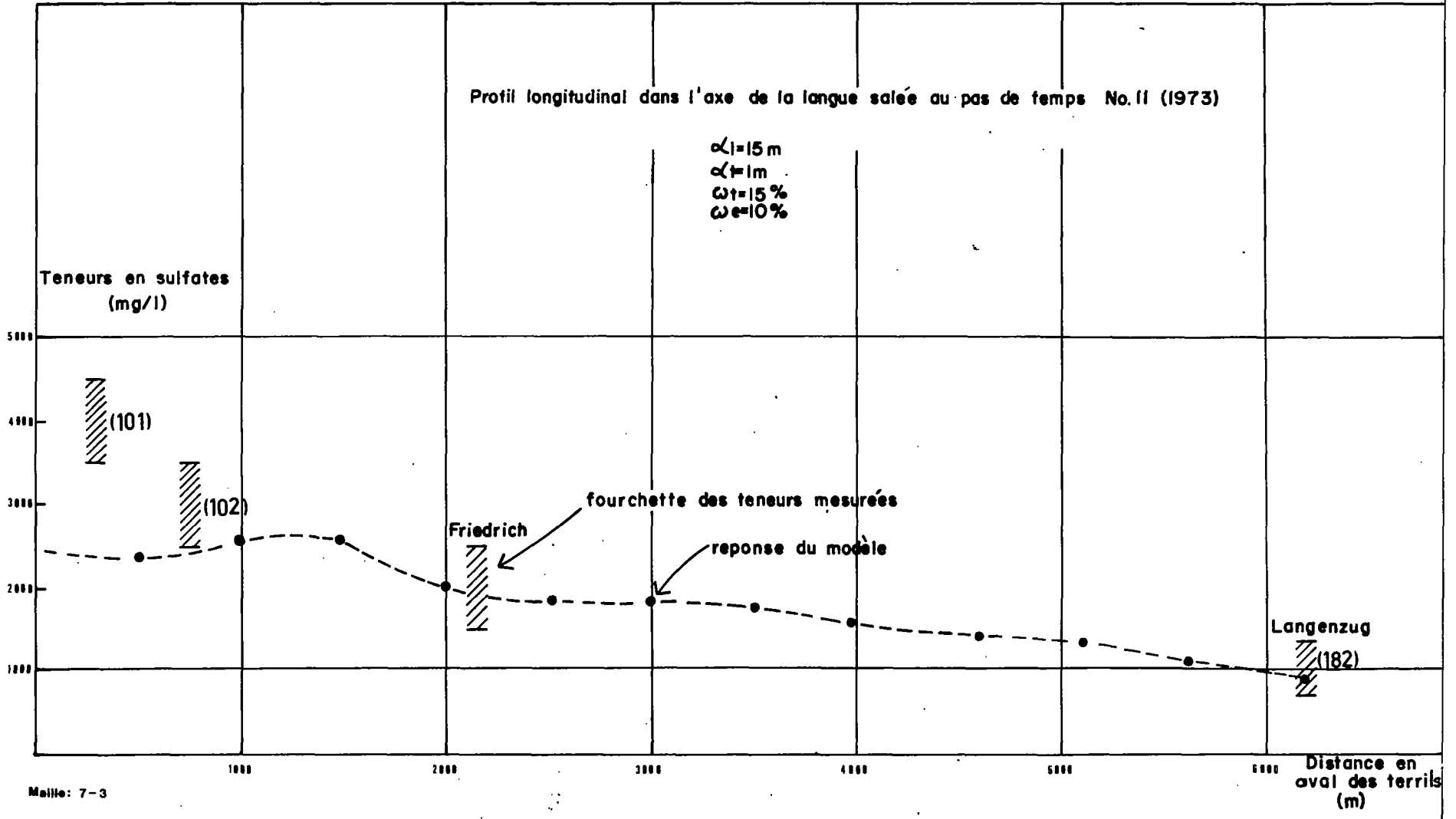
Il convient de noter que les historiques, fournis par la banque des données, portent sur les chlorures. Il a été procédé à une corrélation avec les ions sulfates afin de critiquer les résultats obtenus avec le modèle, portant sur le transfert en SO₄.

L'analyse détaillée des 2 courbes retenues comme représentatives dans le temps de l'évolution des concentrations entraîne les remarques suivantes :

courbe d'évolution au niveau du puits 182 du Langen-Zug (cf. figure 19)

La déformation de la courbe mesurée, aux alentours des années 1964, n'a pu être restituée et ne semble correspondre qu'à des perturbations locales ou à des erreurs de mesures. Cette opinion est renforcée par l'analyse des courbes d'évolutions aux niveaux des puits 181 ou 183, immédiatement voisins du puits 182 retenu, et sur lesquels on ne relève pas cette anomalie, mais seulement des irrégularités.

De 1967 à 1980, la similitude des courbes semble prouver que le calage du modèle hydrochimique est correct. Le fait que les valeurs calculées soient toujours inférieures aux valeurs mesurées provient de ce que les valeurs modèle correspondent à une maille de 500 m alors que la mesure terrain est ponctuelle. Le puits 182 étant exactement sur l'axe de la salure, ce qui est contrôlé par les mesures sur les puits voisins, sa valeur représente le maximum de concentrations et non la valeur moyenne sur 500 m de front.



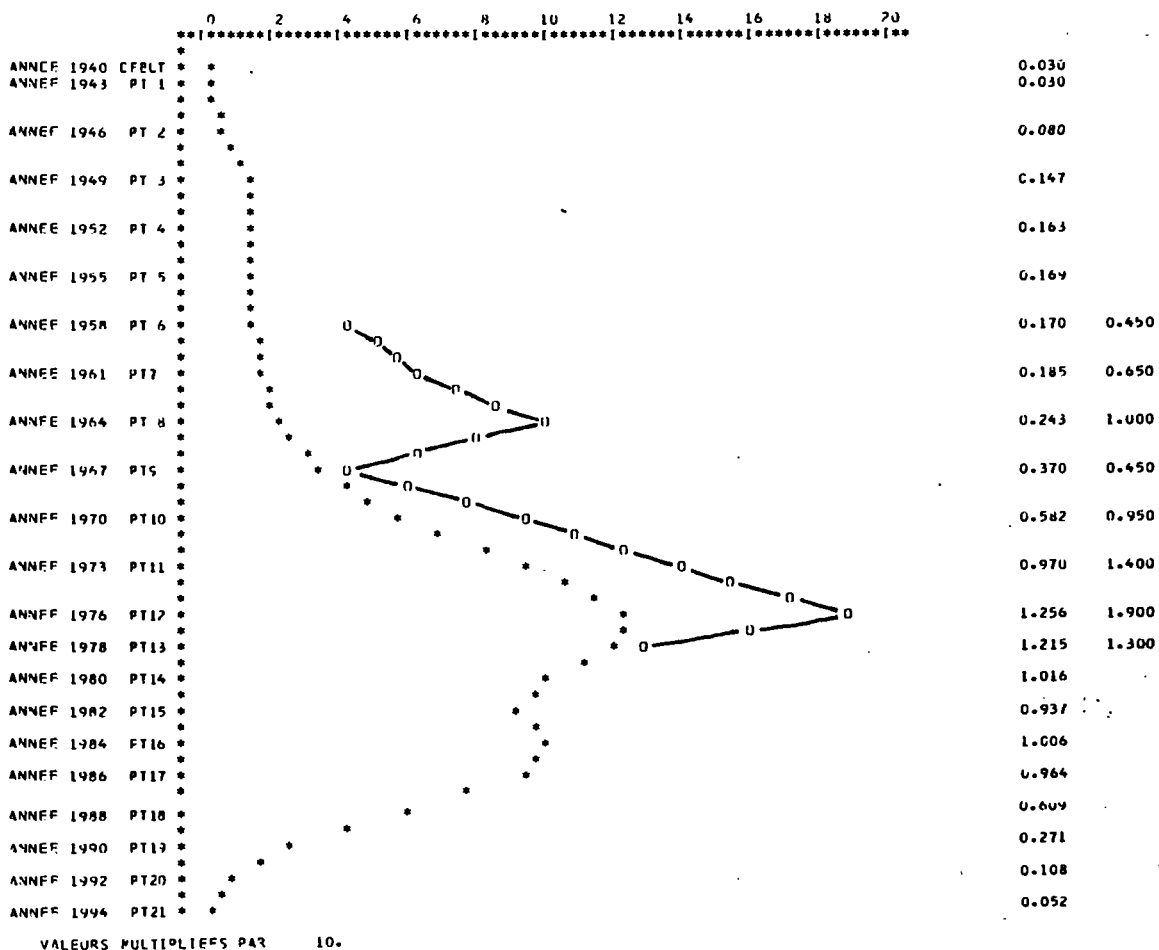
```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*
* SIMULATION NO 8
* PAS DE TEMPS NO 22
* CONCENTRATION PUIITS 182 LANG -ZUG
*
*****
* MAILLE 5 15
* ***** EVOLUTION CALCULEE *****
* 00000 EVOLUTION MESUREE 00000
*****

```

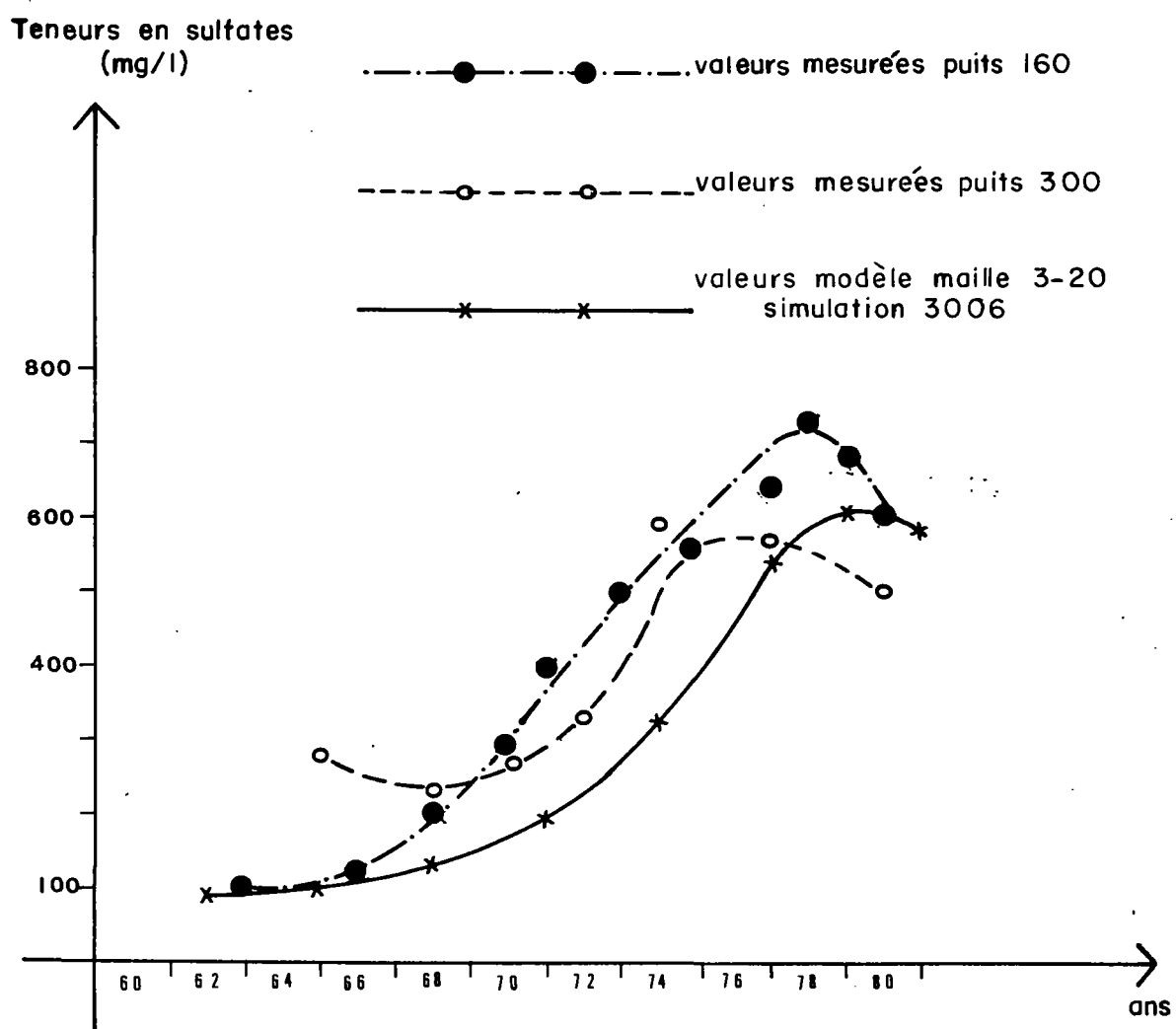
REF 3008

CALCUL MESURE
***** 00000000



EVOLUTION DES TENEURS AUX PUIITS

300 et 160 DE WITTELSHEIM



courbe d'évolution au niveau des puits 300 et 160 de Wittelsheim (cf. figure 20)

Ces puits correspondent sensiblement à la maille 3-20 du modèle utilisé ; l'historique des concentrations en chlorures remonte à 1964 ; les valeurs de sulfates ont été déduites par corrélation.

L'analyse comparée de la réponse modèle avec des 2 piézomètres permet de noter la validité de la représentation des valeurs calculées à la limite aval. On note une analogie entre les courbes, avec une montée rapide des concentrations entre 67 et 77 et un processus de dépollution sur les dernières années simulées.

5.1.3. Profils transversaux

Les profils établis pour différents pas de temps ont pour but de contrôler la validité des résultats modèle obtenus à l'extérieur de l'axe de propagation sur lequel ont été effectués les contrôles précédents.

On peut définir 3 niveaux de contrôles, proches du terril, à 6 km (Langenzug) et à 9 km (extrémité aval, Wittelsheim). Pour chacun de ces niveaux, on observera différentes dates, fonction des données disponibles.

Piézomètres proches du terril

- année 1973 (PT 11)

Il n'existe pas encore de données de chimisme enregistrées à cette époque, les forages de dépollution datant de 1974 ; on peut cependant comparer les résultats obtenus au PT = 11 avec la carte des mesures réalisées en géophysique lors de l'étude hydrogéologique de la nappe de l'Ochsenfeld en 1972. Cette étude géophysique permet de noter l'extension latérale de la pollution qui affecte 2 lignes du modèle (7 et 8) et qui reste très peu importante plus au nord et au sud.

- année 1978 (PT 13)

A cette époque, on dispose, sur le domaine proche du terril, de 4 ans de données sur un grand nombre de piézomètres, soit de contrôle, soit utilisés pour les pompages de dépollution.

On peut résumer les chiffres obtenus par le tableau suivant :

<i>Piézomètre</i>	<i>Maille</i>	<i>Valeur mesurée au piézomètre</i>	<i>Valeur extrapolée à 500 m</i>	<i>Valeur calculée modèle</i>
50 - P2	8 - 4	1 300 mg/l	1 100 - 1 500 mg/l	1 500 mg/l
102 - P13	7 - 4 8 - 4	2 500 mg/l	1 500 - 2 000 mg/l	7 - 4 → 1 700 mg/l 8 - 4 → 1 500 mg/l
103 - P14	7 - 4 7 - 5	2 000 mg/l	1 500 - 2 000 mg/l	≈ 1 700 mg/l
101 - P12	7 - 3 7 - 4	2 500 mg/l	2 000 - 2 500 mg/l	7 - 3 → 2 700 mg/l 7 - 4 → 1 700 mg/l

On note que l'extrapolation de la valeur ponctuelle mesurée au piézomètre entraîne la création d'un intervalle de confiance, fonction des concentrations amont, aval et également latérales au piézomètre étudié. Les valeurs du modèle rentrent dans la gamme proposée.

Puits situés à 6 km (Langen-Zug)

Les valeurs mesurées sur ces puits sont des chlorures. Il existe, sur le puits 182, un historique en sulfate qui permet de déduire, par corrélation, les teneurs en sulfates sur les piézomètres voisins.

- année 1973 (PT 11)

Le tableau suivant permet d'apprécier la validité du calcul :

Maille	Puits concernés	Valeurs aux puits	Valeur estimée sur 500 m	Valeur calculée modèle
4 - 15	185	160 mg/l	200 mg/l	180 mg/l
	184	200 mg/l		
	183	240 mg/l		
5 - 15	182	1 200 mg/l	800 - 1 000 mg/l	970 mg/l
	181	500 mg/l		
6 - 15	180	100 mg/l	200 - 300 mg/l	280 mg/l
	181	500 mg/l		

- année 1978 (PT 13)

Comme précédemment, on peut suivre l'évolution des différents piézomètres mesurés par rapport au calcul, avec le tableau :

Maille	Puits concernés	Valeurs mesurées aux puits	Valeur estimée sur 500 m	Valeur calculée modèle
4 - 15	185	140 mg/l	200 - 250 mg/l	200 mg/l
	184	160 mg/l		
	183	380 mg/l		
5 - 15	182	1 200 - 900 mg/l	800 - 1 000 mg/l	1 200 mg/l
	181	520 mg/l		
6 - 15	181	520 mg/l	400 mg/l	350 mg/l
	180	300 mg/l		

La valeur calculée par le modèle sur la maille 5-15 correspond à la mesure sur le puits 182 à la fin de l'année 1977 ; cette valeur, un peu forte en 1978 pour un front de 500 m, ne semble pas mettre en cause l'injection à la source ou la dispersion transversale, vu le calage latéral à l'axe qui est correct. Cela correspondrait à un léger décalage dans le temps (1 an) acceptable si on considère que le modèle intègre des phénomènes relatifs à 3 ans pour chaque pas de temps.

Puits situés à la limite aval (Wittelsheim) , ,

- année 1973 (PT 11) cf. annexe

Les fortes valeurs enregistrées sur les historiques d'évolution des concentrations en chlorures en 1973 au niveau des puits de Wittelsheim ne sont pas traduites par le modèle. Elles résultent sûrement d'un arrêt des pompages au Langen-Zug pendant une période située aux alentours de 1971 ; le manque de données au niveau des pompages (évolution dans le temps) et la très courte durée du phénomène ne permettent pas de prendre en compte cette anomalie parasite.

- année 1978 (PT 13)

Les puits 171 et 172 donnent des valeurs ponctuelles de l'ordre de 250 mg/l de SO_4^{--} déduites des Cl^- ; les puits 160 et 300 fournissent une valeur de concentration de l'ordre de 600 mg/l de SO_4^{--} .

Ces valeurs sont celles restituées par le modèle si on considère, d'une part les mailles (3-20) et (2-20) comme représentant l'axe (valeur modèle = 650 mg/l) et, d'autre part les mailles (2-20) et (3-21) comme représentant des puits voisins (valeur modèle 200 mg/l).

Ces différents contrôles, profils et courbes d'évolution, montrent que les paramètres définis pour le calage du modèle représentent correctement les phénomènes de propagation des solutés dans cet aquifère.

On peut résumer les valeurs retenues pour le calage :

- . dispersivité longitudinale : $\alpha L = 15 \text{ m}$
- . dispersivité transversale : $\alpha T = 1 \text{ m}$
- . porosité totale : $\omega t = 15 \%$
- . porosité efficace : $\omega e = 10 \%$

5.2. EVOLUTION FUTURE DE LA POLLUTION

5.2.1. Dépollution efficace à 100 %

Les figures 21 à 27 présentent l'évolution de la pollution calculée par le modèle du début à 1980 (période d'étalonnage), puis en 1984, 88 et 92 (extrapolation). On voit très nettement l'extension progressive de la pollution (figures 21 à 23). Puis en 1974 intervient le début de la fixation de la pollution par pompage, complétée en 1980 de façon à arrêter complètement la pollution. En 1980 (figure 24), une amélioration sensible est déjà intervenue. La pollution se résorbe ensuite de plus en plus pour aboutir à une élimination presque complète après 1992 (figure 27).

Ce résultat peut paraître optimiste, car on a supposé que les systèmes de dépollution mis en oeuvre au pied des terrils sont efficaces à 100 % ; par ailleurs, on a admis la réversibilité totale du stockage et destockage du soluté dans la porosité de rétention.

Les figures 28 à 33 présentent l'évolution des charges transitées selon l'axe de la langue polluée et transversalement au droit du Langen-Zug.

On note ainsi que la charge qui transite dans l'axe de la langue sulfatée sur un front de 500 m de large, des terrils à la limite aval du modèle, passe de 0,175 kg/s (5 500 t/an) en 1958 à 23 600 t/an en 1970 (cf. figure 28), puis à un maximum de 31 500 t/an en 1976, enfin à 26 500 t/an en 1980 (figure 29) et 2 000 t/an en 1992 (figure 30), grâce à l'action de fixation de la pollution entreprise à partir de 1974, qui représente de 1 500 à 2 850 t/an de sulfates. Ces chiffres, qui correspondent au transit dans l'axe de la langue sulfatée, représentent de 30 à 50 % de la totalité de la charge circulant dans l'aquifère sur l'ensemble de la zone d'étude, y compris le bruit de fond qui représente 1 500 t/an environ.

On note également, à l'aide des cartes (figures 21 à 27) et des graphiques d'évolution des charges transitées, en particulier les profils transversaux au droit du Langen-Zug (figures 31 à 33), que les teneurs et les charges continuent à augmenter en aval après la mise en place du dispositif de fixation de la pollution au pied des terrils en 1974 (maximum en 1976 au Langen-Zug).

5.2.2. Dépollution efficace à 90 %

Dans ces calculs, on a supposé que le système de dépollution laissait échapper vers l'aval environ 10 % de la charge en sulfates. Les résultats obtenus (cf. figure 34) montrent que ce système est insuffisant, car les teneurs en sulfates calculées, 15 ans après, restent supérieures à 250 mg SO₄/l sur une distance de 6 km à l'aval des terrils, en particulier au niveau des puits de St-André, jusqu'aux pompages du Langen-Zug. Les figures 35 et 36 permettent de comparer l'impact de la pollution à 90 et 100 %.

Par contre, une dépollution efficace à 95 % assurerait des teneurs inférieures à 250 mg SO₄/l à partir de 2 km en aval des terrils, ce qui peut être acceptable, dans la mesure où, sur ce secteur de nappe, aucun captage d'eau potable n'existe et ne sera jamais réalisé : les puits de l'Institut St-André seraient situés à 500 m au sud de ce futur et éventuel axe minéralisé, la pollution échappant aux pompages étant dans tous les cas canalisée par la paroi étanche installée à cette fin : empêcher, en cas de défaillance du système de pompage, la propagation de la pollution vers le sud-est (gravières et puits de St-André).

CONCLUSION

La contamination de la nappe phréatique de l'Ochsenfeld, à partir des terrils de résidus des Usines Chimiques de Thann, mise en évidence dès 1966, a été reconnue, observée et étudiée depuis 1972 à l'aide des moyens traditionnels : géophysique, piézomètres, analyses d'eau.

Ces premières investigations ont permis de prendre un premier train de mesures pour la neutralisation des terrils, en particulier la mise en place de pompages de dépollution en pied de terril dans la zone la plus minéralisée (puits, tranchée) à partir de 1974.

La mise en oeuvre de moyens d'étude plus sophistiqués, tels les modèles hydrodynamiques et hydrochimiques, a permis :

- de proposer un système de dépollution plus efficace (2 centres de pompage et une paroi étanche),

 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 7 *
 * PAS DE TEMPS NO 3 *
 * CONCENTRATION PAS DE TEMPS 3 *
 * - ANNEE 1949 - *

RFF 3007

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21

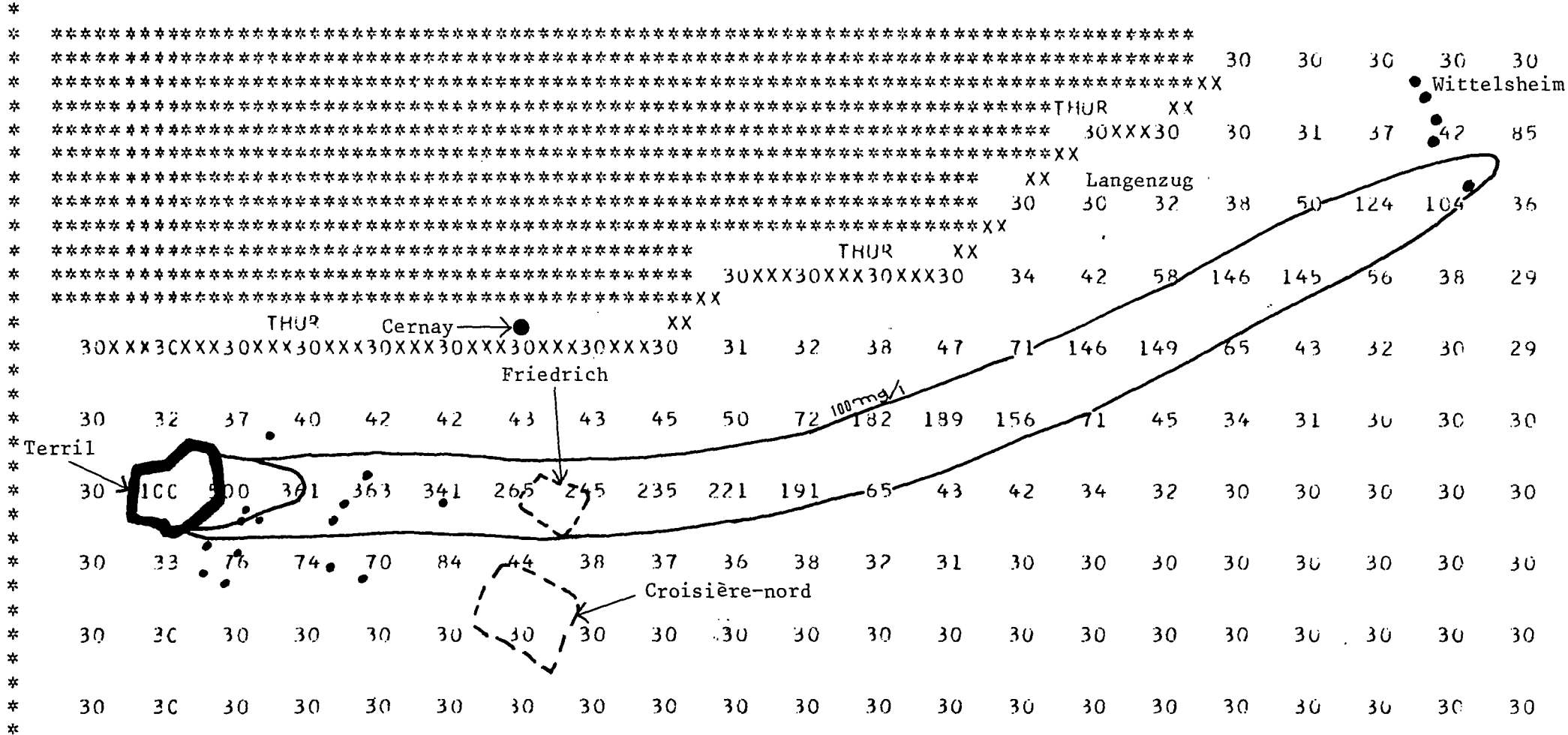
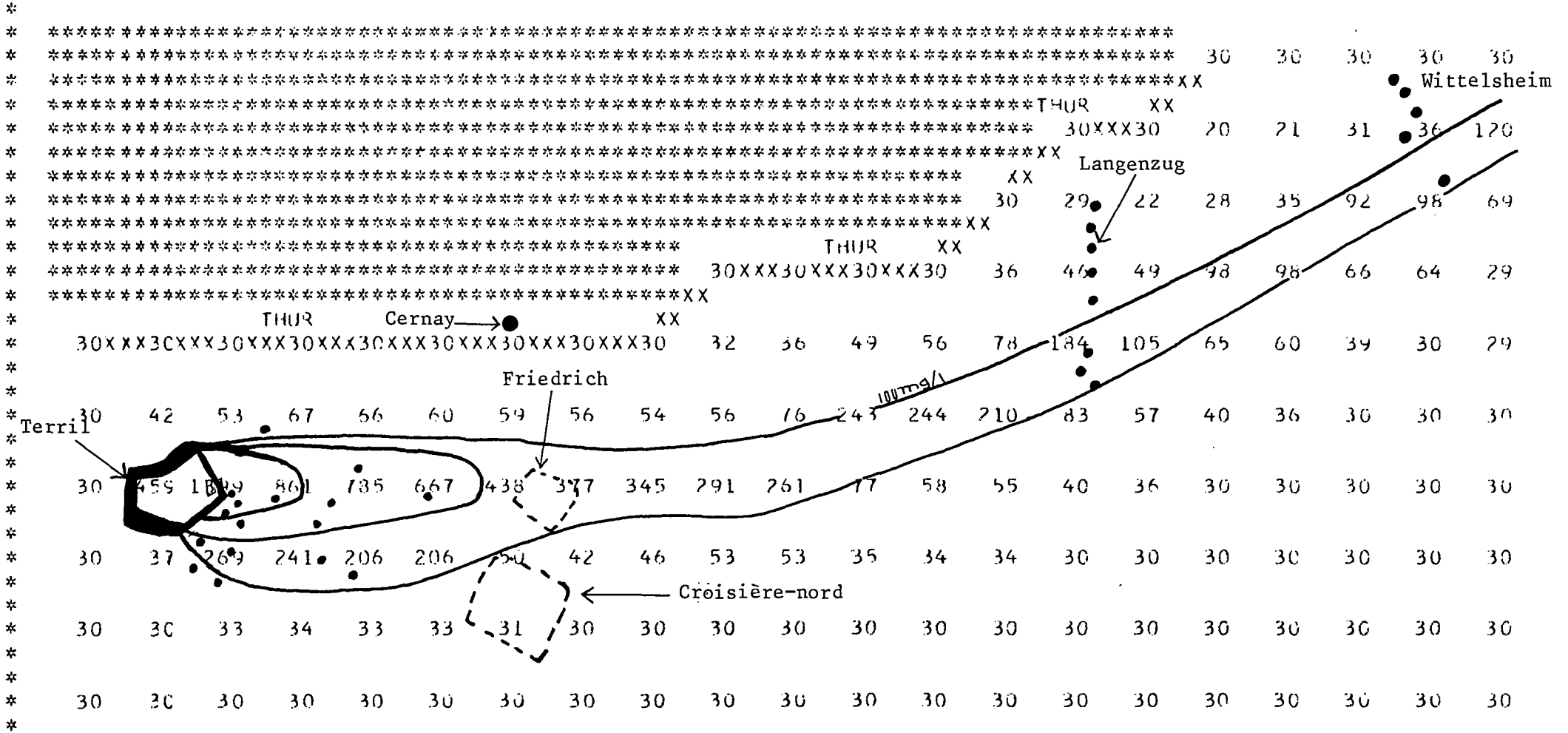


Fig. 21

 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 8 *
 * PAS DE TEMPS NO 7 *
 * CONCENTRATION PAS DE TEMPS 7 *
 * - ANNEE 1961 - *

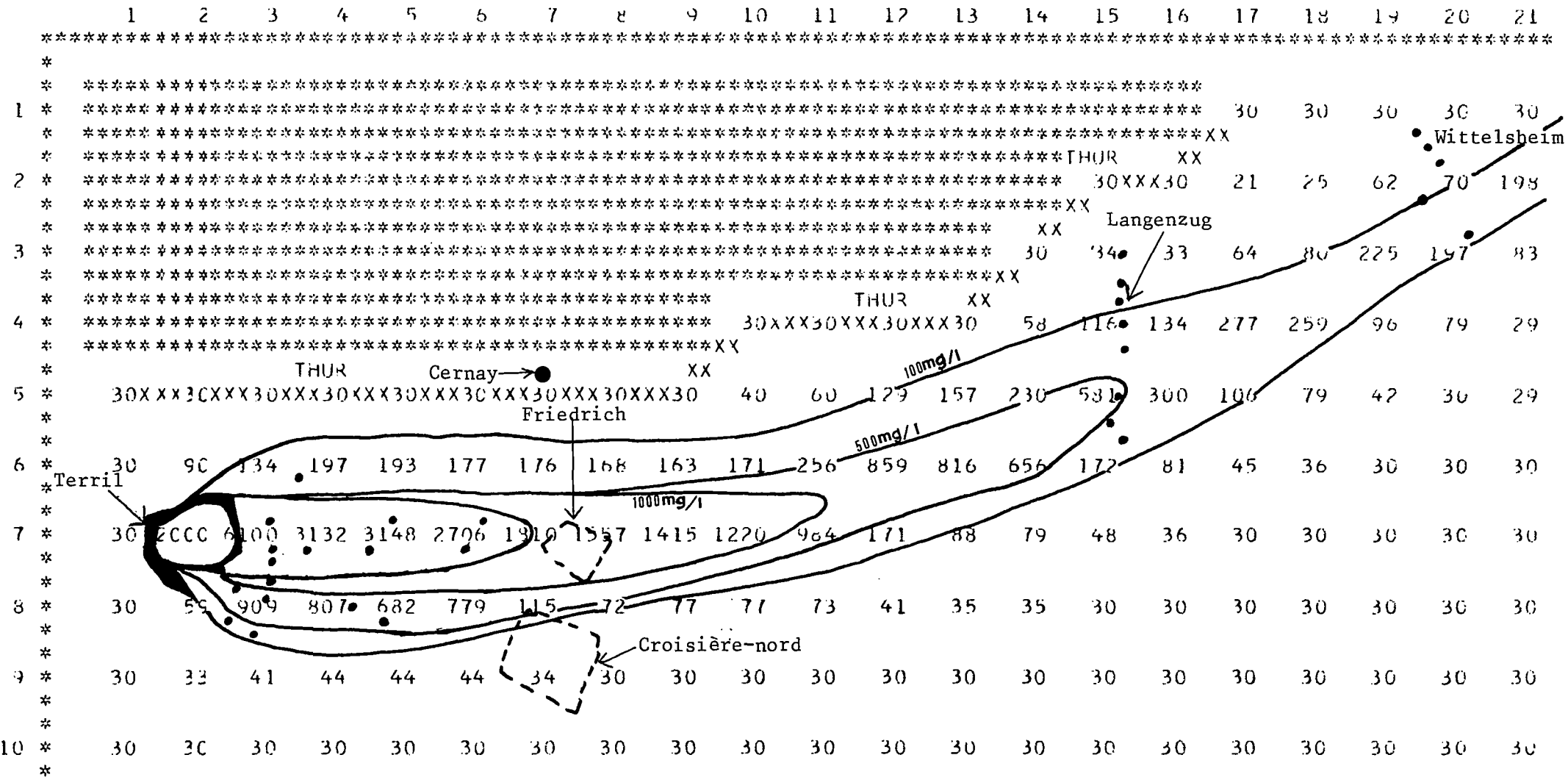
REF 3008

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21



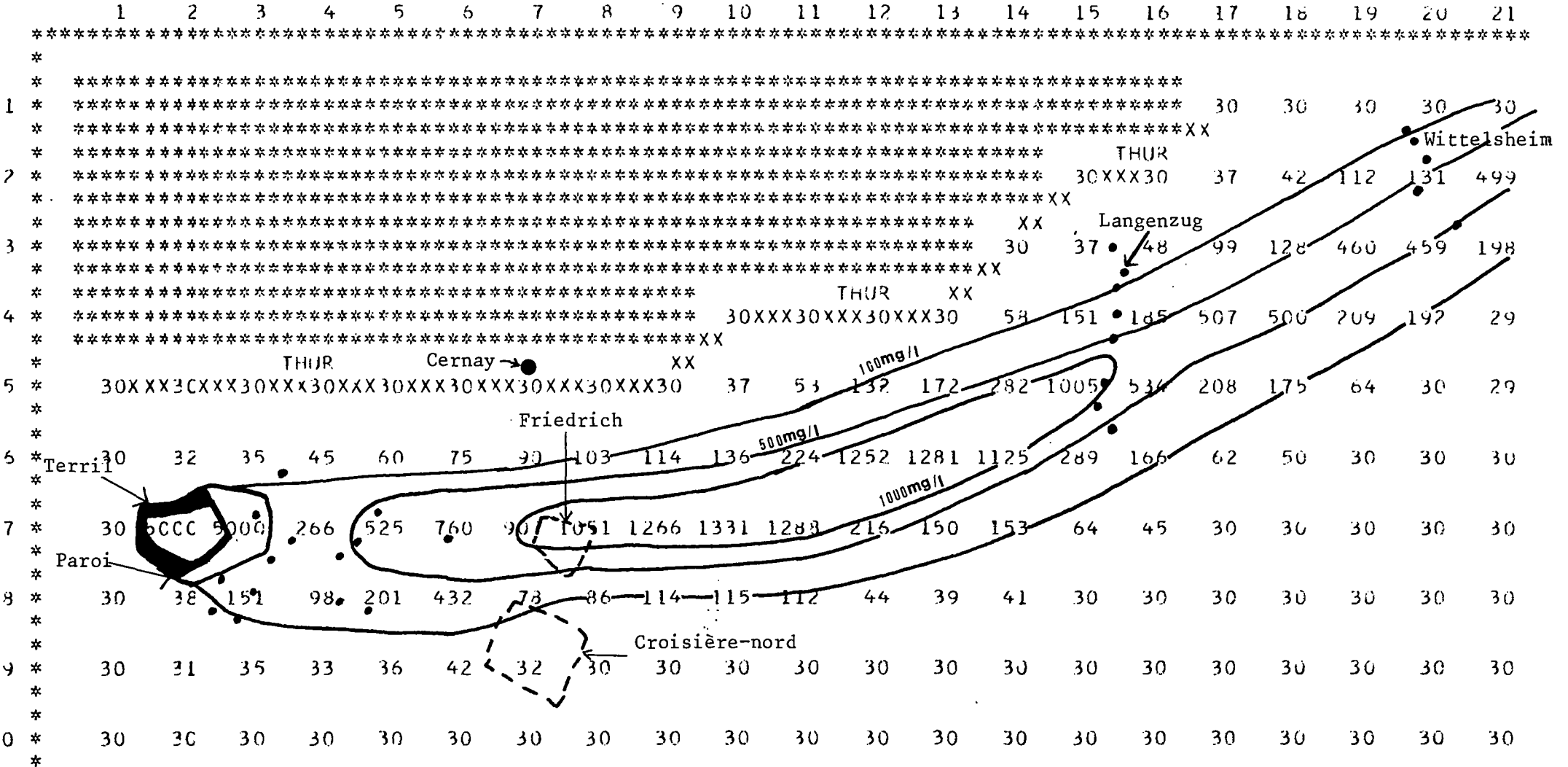
* * * * *
 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES *
 * FA AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * * * * *
 * SIMULATION NO 0 *
 * PAS DE TEMPS NO 10 *
 * CONCENTRATION PAS DE TEMPS 10 *
 * - ANNEE 1970 - *
 * * * * *

REF 3008



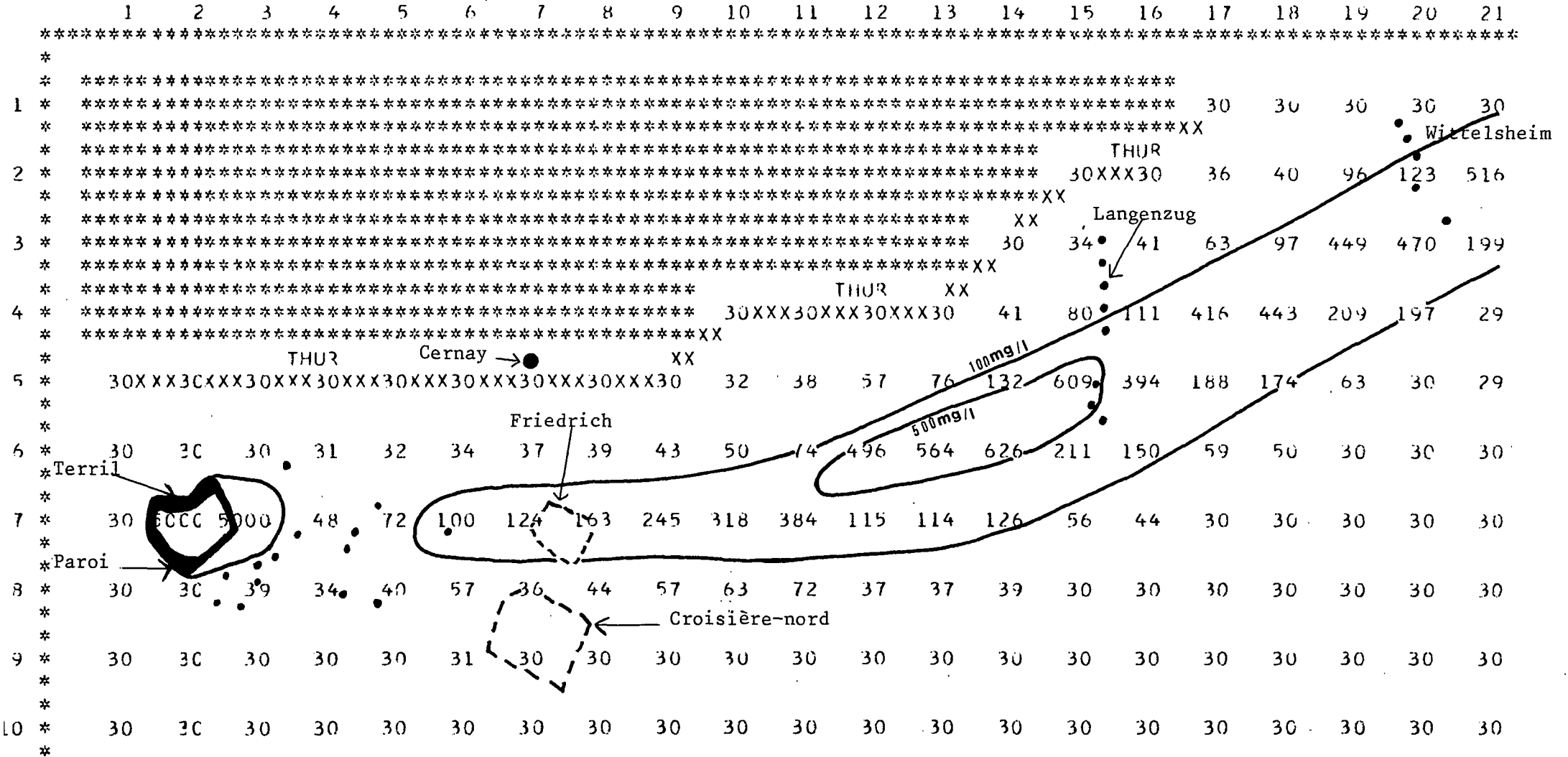
 * ETLDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * * * * *
 * SIMULATION NO 6 *
 * PAS DE TEMPS NO 16 *
 * CONCENTRATION PAS DE TEMPS 16 *
 * - ANNEE 1984 - *

REF 3006



 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 6 *
 * PAS DE TEMPS NO 18 *
 * CONCENTRATION PAS DE TEMPS 18 *
 * - ANNEE 1988 - *

REF 3006



 * ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES *
 * EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
 * ** *
 * SIMULATION NO 6 *
 * PAS DE TEMPS NO 20 *
 * CONCENTRATION PAS DE TEMPS 20 *
 * - ANNEE 1997 - *

REF 3006

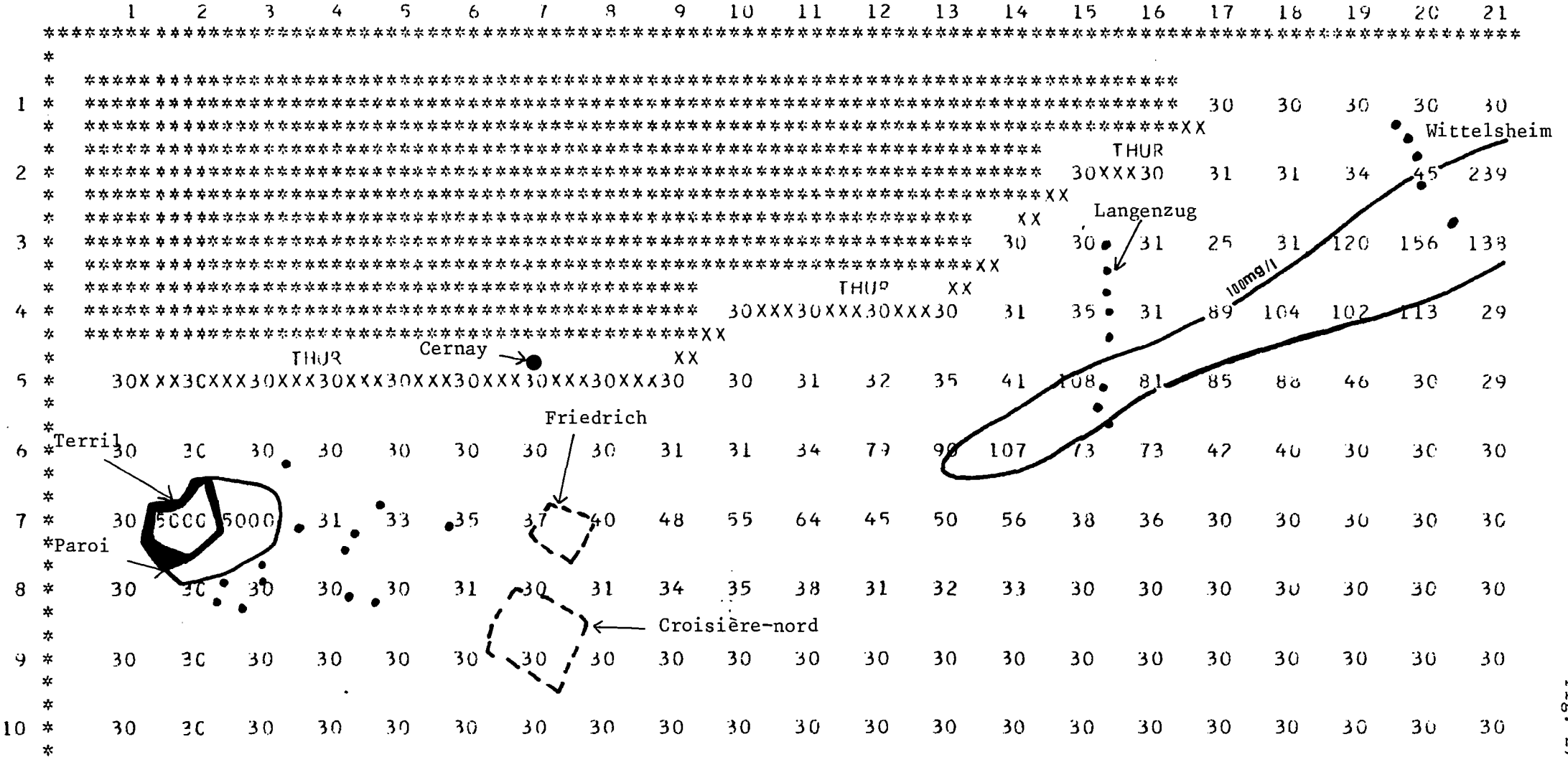


Fig. 27

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
* ** *
* SIMULATION NO 8 *
* PAS DE TEMPS NO 10 *
* PROFIL LONGITUDINAL SUR L'AXE *
* G/S (1970) *
*****
    
```

REF 3008

DONNEES

COURBE D'EVOLUTION (HISTOGRAMME)

** LIGNE ***	COLONNE ***	CHARGE	TRANSITANT	0.00E+00	0.40E+02	0.80E+02
* 7 *	* 4 *		38.2495 *	*****[*****.*****[*****.*****[*****	*****	*****
* 7 *	* 5 *		49.6258 *	*****	*****	*****
* 7 *	* 6 *		76.5956 *	*****	*****	*****
* 7 *	* 7 *		87.6395 *	*****	*****	*****
* 7 *	* 8 *		78.0490 *	*****	*****	*****
* 7 *	* 9 *		56.1947 *	*****	*****	*****
* 7 *	* 10 *		57.8530 *	*****	*****	*****
* 7 *	* 11 *		61.6918 *	*****	*****	*****
* 6 *	* 12 *		48.4471 *	*****	*****	*****
* 6 *	* 13 *		62.1840 *	*****	*****	*****
* 6 *	* 14 *		66.9066 *	*****	*****	*****
* 5 *	* 15 *		16.1358 *	*****	*****	*****
* 5 *	* 16 *		16.9550 *	*****	*****	*****
* 4 *	* 17 *		8.0183 *	*****	*****	*****
* 4 *	* 18 *		11.2114 *	*****	*****	*****
* 3 *	* 19 *		5.7527 *	*****	*****	*****
* 3 *	* 20 *		7.1922 *	*****	*****	*****

SOMME DES CHARGES TRANSITANT=

0.7487E+00 KG/S

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*
*          **
*          SIMULATION NO      8
*          PAS DE TEMPS NO    14
*          PROFIL LONGITUDINAL SUR L'AXE
*          G/S (1980)
*****
    
```

REF 3008

DONNEES

COURBE D'EVOLUTION (HISTOGRAMME)

** LIGNE ***	COLONNE ***	CHARGE	TRANSITANT	0.00E+00	0.40E+02	0.80E+02
* 7 *	4 *		21.7504 *	*****	*****	*****
* 7 *	5 *		29.2299 *	*****	*****	*****
* 7 *	6 *		49.2644 *	*****	*****	*****
* 7 *	7 *		79.5718 *	*****	*****	*****
* 7 *	8 *		70.7185 *	*****	*****	*****
* 7 *	9 *		51.2420 *	*****	*****	*****
* 7 *	10 *		60.3725 *	*****	*****	*****
* 7 *	11 *		75.1496 *	*****	*****	*****
* 6 *	12 *		65.9582 *	*****	*****	*****
* 6 *	13 *		91.4656 *	*****	*****	*****
* 6 *	14 *		111.3824 *	*****	*****	*****
* 5 *	15 *		28.1935 *	*****	*****	*****
* 5 *	16 *		31.9202 *	*****	*****	*****
* 4 *	17 *		16.5033 *	*****	*****	*****
* 4 *	18 *		25.3639 *	*****	*****	*****
* 3 *	19 *		14.6773 *	*****	*****	*****
* 3 *	20 *		21.5619 *	*****	*****	*****

SOMME DES CHARGES TRANSITANT=

0.8443E+00 KG/S

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
* ** *
* SIMULATION NO 8 *
* PAS DE TFMP NO 20 *
* PROFIL LONGITUDINAL SUR L'AXE *
* G/S (1992) *
*****
    
```

REF 3008

DONNEES

COURBE D'EVOLUTION (HISTOGRAMME)

** LIGNE ***	COLONNE ***	CHARGE TRANSITANT	0.00E+00	0.40E+01	0.80E+01	0.12E+02
* 7 *	4 *	0.3847 *	*****[*****.	*****[*****.	*****[*****.	*****[*****[**
* 7 *	5 *	0.5263 *	*	*	**	*
* 7 *	6 *	1.0084 *	****	****	*****	*****
* 7 *	7 *	1.8162 *	*****	*****	*****	*****
* 7 *	8 *	2.0417 *	*****	*****	*****	*****
* 7 *	9 *	1.9135 *	*****	*****	*****	*****
* 7 *	10 *	2.6482 *	*****	*****	*****	*****
* 7 *	11 *	4.0213 *	*****	*****	*****	*****
* 6 *	12 *	4.4927 *	*****	*****	*****	*****
* 6 *	13 *	6.8927 *	*****	*****	*****	*****
* 6 *	14 *	10.9379 *	*****	*****	*****	*****
* 5 *	15 *	3.0040 *	*****	*****	*****	*****
* 5 *	16 *	4.6261 *	*****	*****	*****	*****
* 4 *	17 *	2.5744 *	*****	*****	*****	*****
* 4 *	18 *	4.5294 *	*****	*****	*****	*****
* 3 *	19 *	3.0750 *	*****	*****	*****	*****
* 3 *	20 *	5.7017 *	*****	*****	*****	*****

SOMME DES CHARGES TRANSITANT=

0.6019E-01 KG/S

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*          **          *
*          SIMULATION NO 8          *
*          PAS DE TEMPS NO 10       *
*          PROFIL TRANSVERSAL (NORD-SUD) *
*          G/S (1970)               *
*****
    
```

REF 3008

DONNEES

COURBE D'EVOLUTION (HISTOGRAMME)

** LIGNE ***	COLONNE ***	CHARGE TRANSITANT	0.00E+00	0.40E+01	0.80E+01	0.12E+02
* 2 *	15 *	1.3208 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 3 *	15 *	2.1601 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 4 *	15 *	4.7641 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 5 *	15 *	16.1358 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 6 *	15 *	12.2108 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 7 *	15 *	2.7842 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 8 *	15 *	1.2349 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 9 *	15 *	0.7097 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 10 *	15 *	0.9709 *	*****]	*****.	*****[*****.

SOMME DES CHARGES TRANSITANT=

0.4229E-01 KG/S


```

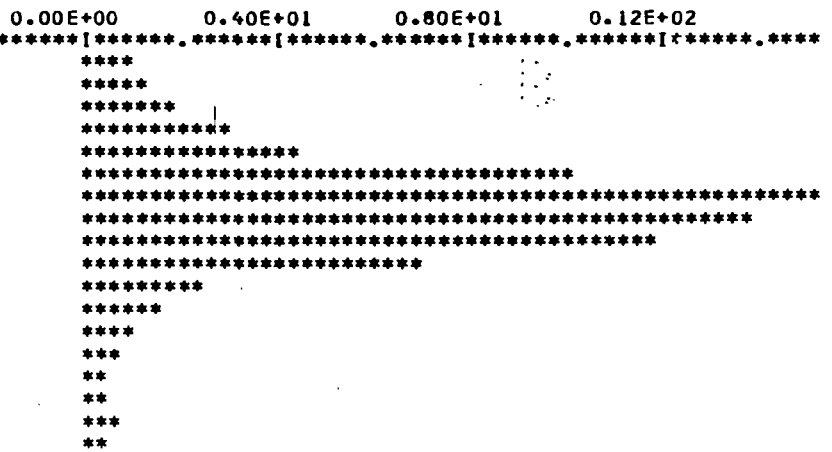
*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*
* SIMULATION NO 8
* PAS DE TEMPS NO 10
* PROFIL TRANSVERSAL (NORD-SUD)
* G/S (1970)
*****
    
```

REF 3008

DONNEES

COURBE D'EVOLUTION (HISTOGRAMME)

** LIGNE **	** COLONNE **	** CHARGE TRANSITANT **
* 2 *	* 15 *	* 1.3208 *
* 3 *	* 15 *	* 2.1601 *
* 4 *	* 15 *	* 4.7641 *
* 5 *	* 15 *	* 16.1358 *
* 6 *	* 15 *	* 12.2108 *
* 7 *	* 15 *	* 2.7842 *
* 8 *	* 15 *	* 1.2349 *
* 9 *	* 15 *	* 0.7097 *
* 10 *	* 15 *	* 0.9709 *



SOMME DES CHARGES TRANSITANT=

0.4229E-01 KG/S

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*
*          **
*          SIMULATION NO      8
*          PAS DE TEMPS NO    14
*          PROFIL TRANSVERSAL (NORD-SUD)
*          G/S (1980)
*****
    
```

REF 3008

DONNEES

COURBE D'EVOLUTION (HISTOGRAMME)

** LIGNE **	** COLONNE **	** CHARGE TRANSITANT **	0.00E+00	0.10E+02	0.20E+02	0.30E+02
* 2 *	15 *	1.3208 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 3 *	15 *	2.3448 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 4 *	15 *	6.4634 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 5 *	15 *	28.1935 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 6 *	15 *	21.1851 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 7 *	15 *	3.8991 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 8 *	15 *	1.2349 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 9 *	15 *	0.7097 *	*****]	*****.	*****[*****.
* 10 *	15 *	0.9709 *	*****]	*****.	*****[*****.

SOMME DES CHARGES TRANSITANT=

0.6632E-01 KG/S

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*
*          **
*          SIMULATION NO      8
*          PAS DE TEMPS NO    20
*          PROFIL TRANSVERSAL (NORD-SUD)
*          G/S (1992)
*****
    
```

REF 3008

DONNEES

COURBE D'EVOLUTION (HISTOGRAMME)

** LIGNE ***	COLONNE ***	CHARGE TRANSITANT	0.00E+00	0.20E+01	0.40E+01
* 2 *	15 *	1.3208 *	*****	*****	*****
* 3 *	15 *	1.9292 *	*****	*****	*****
* 4 *	15 *	1.4269 *	*****	*****	*****
* 5 *	15 *	3.0040 *	*****	*****	*****
* 6 *	15 *	5.1971 *	*****	*****	*****
* 7 *	15 *	2.2062 *	*****	*****	*****
* 8 *	15 *	1.2349 *	*****	*****	*****
* 9 *	15 *	0.7097 *	*****	*****	*****
* 1C *	15 *	0.9709 *	*****	*****	*****

SOMME DES CHARGES TRANSITANT=

0.1800E-01 KG/S

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*          **          *
* SIMULATION NO      8      *
* PAS DE TEMPS NO   21     *
* CONCENTRATION PAS DE TEMPS 21 *
* - ANNEE 1994 -          *
*****

```

REF 3008

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1																						
2																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						
9																						
10																						

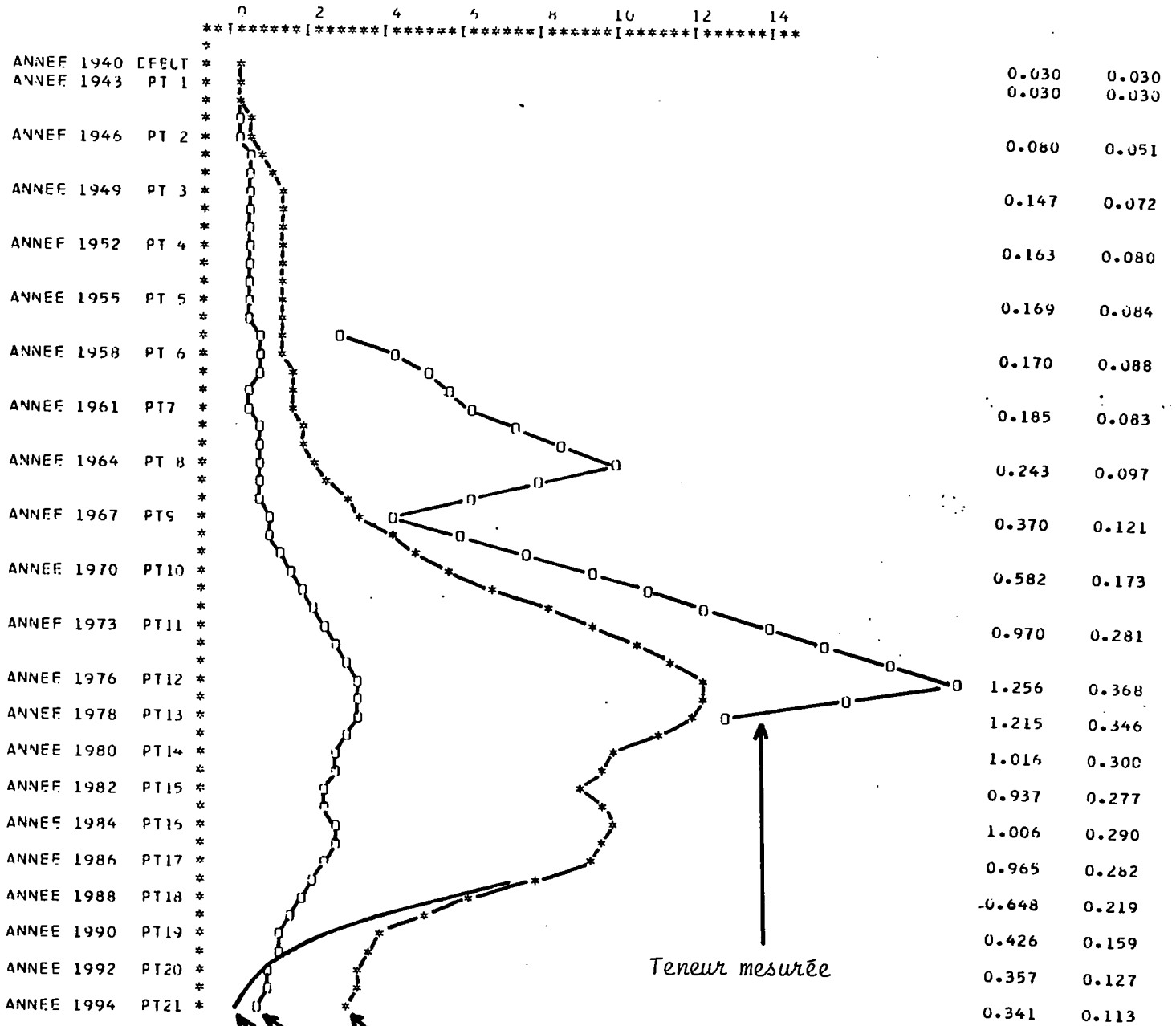
Figure 34

```

*****
* ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
* EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*
* **
* SIMULATION NO 8
* PAS DE TEMPS NJ 22
* EVOLUTION DES CONCENTRATIONS AU DROIT
* DU LANGE-ZUG
*****
* ***** MAILLE 5 15 *****
* ***** MAILLE 6 15 *****
*****
    
```

REF 3008

5 15 6 15
***** 00000000



Teneur mesurée

Teneur calculée dans l'axe, dépollution 90 %

Teneur calculée à 500 m de l'axe

Teneur calculée dans l'axe, dépollution 100 %

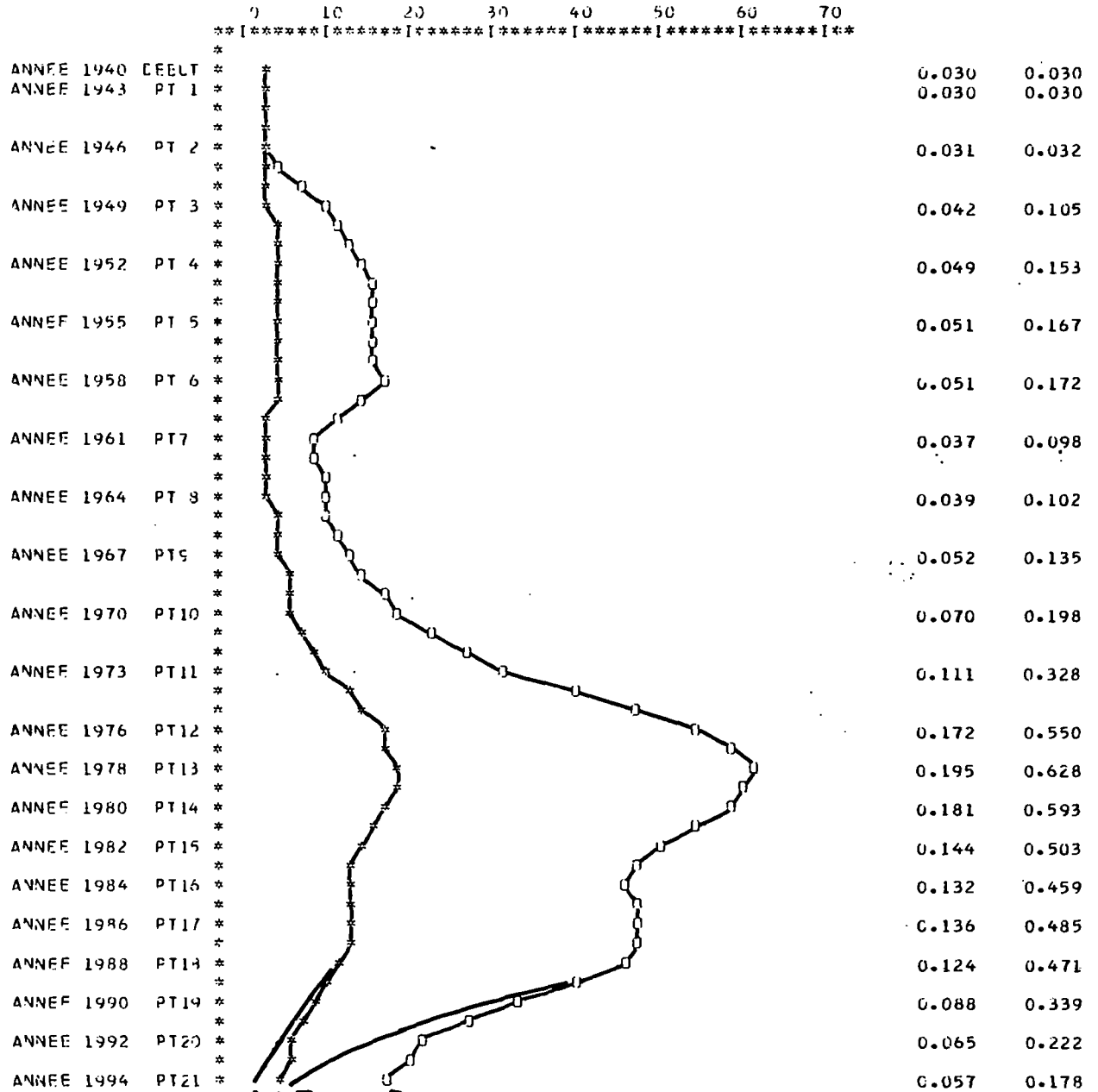
```

*****
*   ETUDE DE LA PROPAGATION DES SULFATES . *
*   EN AVAL DES TERRILS DE THANN ET MULHOUSE *
*                                     ** *
*   SIMULATION NO      8 *
*   PAS DE TEMPS NO   22 *
*   WITTLISHEIM *
*
*****
*   ***** MAILLE  2  20 ***** *
*   ***** MAILLE  3  20 ***** *
*****

```

REF 3006

2 20 3 20
***** 0000000




Teneur dans l'axe, dépollution 90 %
 Teneur dans l'axe, dépollution 100 %
 Teneur à 500 m de l'axe, dépollution 90 %
 Teneur à 500 m de l'axe, dépollution 100 %

- de tester ce système sur le modèle hydrochimique afin de préciser les délais de dépollution de cette partie de l'aquifère.

Il apparaît ainsi que la mise en oeuvre, à partir de 1980/81, du nouveau système de dépollution, en le supposant efficace à 100 %, amènerait le retour à des teneurs en sulfates acceptables au bout d'une dizaine d'années. Une efficacité plus faible (90 %) du système de dépollution est insuffisante, car on observerait encore, dans une quinzaine d'années, des teneurs en sulfates supérieures à 250 mg SO₄/l (norme de potabilité) sur une distance de 6 km en aval du terril.

Ces calculs mettent en évidence la permanence des efforts à poursuivre pour rétablir l'exploitation normale de ce secteur de la nappe phréatique d'Alsace.

L'ingénieur chargé d'étude

P.-O.

Y. BABOT

Le Directeur du Service
Géologique Régional Alsace


J.J. RISLER

Assisté de Ph. VIGOUROUX

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE CONCERNANT :

1. Le secteur d'étude

SCGAL (1969)

Etude de la pollution du puits de l'Institut St-André à Cernay.

SCGAL (1972)

Etude hydrologique par prospection électrique de la nappe de l'Ochsenfeld.

RINCK G. (1977)

Ressources en eau de la région de Cernay - Rapport SGAL.

BABOT Y., GRAFF D. (1978)

Interaction des déchets des industries du titane et électrochimiques sur une même décharge - Rapport 78 SGN 730 ALS - BRGM.

VANÇON J.P. (1977)

Incidence des ballastières de l'Ochsenfeld sur l'écoulement de la nappe de la Thur en aval des terrils de Than - et - Mulhouse.
Rapport 77 SGN 665 ALS - BRGM.

BABOT Y. (1979)

Evolution de la minéralisation des eaux au Sud de Cernay - Rapport 79 SGN 465 ALS - BRGM.

KREBS G., VIGOUROUX P. (1979)

Etude sur modèle mathématique de la neutralisation de la pollution de la nappe de l'Ochsenfeld - Rapport 79 SGN 575 ALS - BRGM.

2. La modélisation hydrochimique

FRIED J.J. et P. UNGEMACH (1970)

A dispersion model for a quantitative study of a ground water pollution by salt.
Water Research Pergamon Press 1971. Vol 5 p. 491-495.

FRIED J.J., GARNIER J.M., UNGEMACH P. (1971)

Etude quantitative d'une pollution de nappe d'eau souterraine : la salure de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin. Bull. BRGM 2e série section III n° 1 - 1971 p. 105-115.

- FRIED J.J. et UNGEMACH P. (1971)
Détermination in-situ du coefficient de dispersion longitudinale d'un milieu poreux naturel. C.R. Acad. Sc. Paris t 272, p. 1327-1329 (17 mai 1971).
- BEAR J. (1972)
Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, 764 p.
- Van GENUCHTEN M. Th. et WIERENGA P.J. (1974)
Simulation of one-dimensional solute transfer in porous media. New Mexico State University, Agricultural Experiment Station, Bull. 628, 40 p.
- FRIED J.J. (1975)
Groundwater pollution - Elsevier, 330 p.
- GAILLARD B. (1976)
Méthode de traceurs pour la détermination des paramètres de transfert de substances en solution dans l'eau des aquifères ; contribution à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau d'alimentation publique.
Thèse Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 25 juin 1976, t. 1, 115 p. ; t. 2, 81 fig.
- SAUTY J.P. (1977)
Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des essais de traçage. Thèse Université Scientifique et Médicale et Institut National de Grenoble, 20 septembre 1977, rapport BRGM 77 SGN 515 HYD, 157 p.
- CHASTAN B., DARVES-BORNOZ J.M., WOLSACK J. (1978)
Résolution numérique du problème de transport miscible en nappe captive par une méthode mixte aux éléments finis. Soc. Hydrotech. de France, XV jour. de l'Hydr. Toulouse sept. 78 question III rapport 13 p. 1-7.
- LALLEMAND-BARRES A., PEAUDECERF P. (1978)
Recherche des relations entre la valeur de la dispersivité macroscopique d'un milieu aquifère, ses autres caractéristiques et les conditions de mesure. Bull. BRGM 2e série, section III n° 4 - 1978 p. 277-284.
- SAUTY J.P. (1978)
Mise au point et utilisation d'abaques pour l'interprétation des expériences de traçages dans les nappes d'eau souterraine. Bull. BRGM 2e série, section III n° 4 - 1978 p. 285-291.
- SAUTY J.P. (1978)
Identification des paramètres du transport hydrodispersif dans les aquifères par interprétation de traçages en écoulement cylindrique convergent ou divergent.
Journal of Hydrology, 39 (1978) p. 69-103.
- BABOT Y., VANÇON J.P. (1979)
Simulation sur modèle de la propagation du sel dans la nappe en aval des terrils de Bollwiller (Haut-Rhin). Résumés scientifiques et Techniques du Service Géologique National pour 1979, BRGM, RS 900 p. 154-155.