
**Hydrodynamique de la nappe du Gäu
(cantons de Soleure et Berne)****THÈSE**

présentée à la faculté des Sciences
de l'Université de Neuchâtel
pour l'obtention du grade de
Docteur ès Sciences

par

François Pasquier

Géologue, hydrogéologue
originaire de Bulle (Suisse)

Soutenue le 25 juin 1986 devant le jury composé de :

Prof. André Burger	Université de Neuchâtel (Suisse)	Directeur
Prof. Lazlo Király	Université de Neuchâtel (Suisse)	Expert
Prof. François Zwahlen	Université de Neuchâtel (Suisse)	Expert
Dr Hansjürg Schmassmann	Liestal	Expert

IMPRIMATUR POUR LA THESE

**Hydrodynamique de la nappe du Gäu
(cantons de Soleure et Berne)**

de M. François Pasquier

UNIVERSITE DE NEUCHATEL

FACULTE DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de
Neuchâtel sur le rapport des membres du jury,

MM. A. Burger (directeur de thèse), L. Kiraly,
F. Zwahlen et H. Schmassmann (Liestal)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 28 mai 2001

Le doyen:



J.-P. Derendinger

Hydrodynamique de la nappe du Gäu (cantons de Soleure et Berne)

Thèse présentée par François Pasquier* au Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (Suisse) en juin 1986, sous la direction de Monsieur le Professeur André Burger. Les autres membres du jury sont Messieurs Lazlo Király, François Zwahlen (Université de Neuchâtel) et Hansjürg Schmassmann (Liestal).

Le manuscrit de la thèse est déposé à la bibliothèque centrale de l'Université de Neuchâtel.

La thèse est résumée par les publications énumérées ci-dessous.

LISTE DES PUBLICATIONS

- 2000: Bilans hydrologiques de la nappe alluviale du Gäu (cantons de Berne et Soleure, Suisse). Bull. d'Hydrogéologie N° 18, 3-29.
- 2000: Calibrage d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines de la nappe alluviale du Gäu, (cantons de Berne et Soleure, Suisse). Bull. d'Hydrogéologie N° 18, 31-48.
- 1987: Indices de l'alimentation de la nappe alluviale du Gäu (SO/BE) par le karst. Bull. Centre d'Hydrogéologie N° 7, 327-334.
- 1982: Fluctuations chimiques et alimentation de la nappe du Gäu soleurois. Bull. Centre d'Hydrogéologie N° 4, 103-144.
- 1982: Inventaire des sources les plus importantes du Jura Nord-Ouest (entre Granges, Olten, Liestal et Delémont). Bull. Centre d'Hydrogéologie N° 4, 259-270.

* François PASQUIER Hydrogéologue-conseil
Saint-Gervais 31
CH - 2108 Couvet

Résumé

La nappe alluviale du Gäu (cantons de Berne et Soleure, Suisse) s'étend au pied du Jura sur 20 km de long et 2 km de large en moyenne. Elle s'écoule vers l'Aar, d'une part de la région d'Oensingen en direction du NE vers Olten, d'autre part d'Oberbipp en direction du SW vers Walliswil. La ligne de partage des eaux souterraines se situe dans la région de Niederbipp. La Dünner, entre Balsthal et Olten, est le principal cours d'eau qui s'écoule au-dessus de l'aquifère.

L'aquifère est constitué d'alluvions sablo-graveleuses issues du remaniement des moraines terminales wurmiennes. Ces alluvions sont décrites, sur la base de profils de forage, de pompages d'essai et d'une prospection électromagnétique VLF, sous la forme de profils hydrogéologiques représentant dans ses grandes lignes la variabilité latérale et verticale de la perméabilité. Les transmissivités ont été décomposées en 5 classes de perméabilité, de 10^{-5} m/s pour les limons à 10^{-1} m/s pour les graviers propres. Les niveaux très perméables occupent 20 à 25 % de l'épaisseur de l'aquifère, et représentent environ 90 % de la transmissivité. Ils sont plus fréquents dans la partie supérieure de l'aquifère, ce qui lui confère une transmissivité particulièrement accrue en hautes eaux. La structure alluviale est complexe, constituée de chenaux perméables formant un réseau anastomosé dans une matrice moins perméable. Le substratum de l'aquifère est constitué essentiellement de calcaires en aval de Härkingen, de molasse entre Walliswil et Niederbipp, et de limons recouvrant la molasse entre Oensingen et Härkingen.

Le débit moyen de la nappe vaut, selon les données de 1976 à 1980, environ 260 l/s à l'exutoire de Walliswil, et 435 l/s à celui d'Olten. Les pompages prélèvent en moyenne 410 l/s, et les débits de transit sont assez faibles, environ 60 l/s à la sortie de la cluse de Balsthal, 165 l/s à Kestenholz et 300 l/s à Gunzgen. L'alimentation le long de la nappe, par les versants, le substratum et l'infiltration des cours d'eau, fournit le complément des débits de soutirage et d'exutoire. Elle croît constamment vers l'aval, où le contact entre les calcaires du Malm et les graviers de l'aquifère se généralise. L'étude des fluctuations piézométriques permet de distinguer les zones où l'alimentation de la nappe est rapide et irrégulière (apports par le karst et la Dünner) des zones où l'alimentation est plus régulière et retardée. Le champ des potentiels a été étudié en étiage et en hautes eaux. Le gradient, très faible dans la région de partage des eaux, passe à environ 6 à 10 pour mille dans les régions aval.

Les principales caractéristiques hydrochimiques de la nappe permettent de distinguer deux provinces : l'une, principalement influencée par les apports du Jura, s'individualise par de faibles teneurs en oxygène 18, nitrates, chlorures, magnésium et sodium, par de fortes teneurs en sulfates et en potassium et par une température basse ; l'autre, principalement influencée par l'infiltration des précipitations, révèle des caractères inverses. Les fluctuations de l'équilibre carbonaté permettent en outre d'identifier la prépondérance des recharges par la zone saturée (orages d'été) ou par la zone non-saturée (recharges principales de printemps et d'automne).

L'alimentation de la nappe a été étudiée au moyen de bilans des eaux météoriques, des eaux de surface et des eaux souterraines cohérents entre eux. Ils révèlent des transferts probables d'eau souterraine des régions internes du Jura vers les régions bordières où se situe la nappe. En moyenne, l'alimentation de la nappe est fournie pour 31 % par l'infiltration des précipitations, 36 % par celle des cours d'eau, et 33 % par les apports souterrains à partir des versants et du substratum. Ces proportions varient localement. Une subdivision de la nappe en cinq secteurs révèle une alimentation importante de la nappe dans son tiers aval oriental, liée à un écoulement longitudinal dans les versants calcaires. Les alimentations ont été modulées pour les états d'étiage et de hautes eaux.

Un modèle numérique bidimensionnel à éléments finis de la nappe a été calibré en régime permanent pour les états d'étiage et de hautes eaux. Les résultats montrent que la répartition des alimentations joue un rôle prédominant, par rapport à celle des transmissivités, pour la restitution correcte, au niveau régional et local, des potentiels et débits de cette nappe complexe (un exutoire majeur à chaque extrémité de la nappe, importants débits d'exfiltration en hautes eaux). La simulation de deux états contrastés de la nappe permet d'approcher en partie la répartition verticale des caractéristiques de l'aquifère et le comportement saisonnier des alimentations. Les possibilités d'utilisation du modèle sont illustrées au moyen de deux exemples simulant l'exploitation intensive de la nappe dans les parties centrale et aval, avec et sans réalimentation artificielle.

Bilans hydrologiques de la nappe alluviale du Gäu (cantons de Berne et Soleure, Suisse)

par François Pasquier *

RESUME

Les bilans des eaux météoriques, des eaux de surface et des eaux souterraines ont été étudiés entre Walliswil et Olten (pied du Jura, cantons de Berne et Soleure) et dans les régions voisines, afin de définir des alimentations cohérentes (recharge, infiltration) pour le calibrage d'un modèle de simulation numérique de la nappe alluviale du Gäu. Les bilans détaillés de la nappe (41 km²) ont été emboîtés dans des bilans plus grossiers d'un vaste système-cadre (916 km²) englobant les versants de la nappe, le bassin de la Dünnerm et une partie des bassins de l'Aar, de la Birse et de l'Ergolz. Les bilans révèlent des transferts probables d'eau souterraine des régions internes du Jura (aires de recharge : Birse, Ergolz) vers les régions bordières (aires d'exutoire : Dünnerm, Aar) où se situe la nappe. En moyenne, l'alimentation de la nappe est fournie pour 31 % par l'infiltration des précipitations, 36 % par celle des cours d'eau, et 33 % par les apports souterrains à partir des versants et du substratum. Ces proportions varient localement. Une subdivision de la nappe en cinq secteurs révèle une alimentation importante de la nappe dans son tiers aval oriental, liée à un écoulement longitudinal dans les versants calcaires. Les alimentations moyennes ont été modulées pour les états d'étiage (60 % de la moyenne) et de hautes eaux (150 %). Les variations d'alimentation sont surtout dues à celles de l'infiltration des précipitations (en étiage 10 % de la valeur moyenne, en hautes eaux 186 % de la valeur moyenne).

MOTS-CLES

Jura, pied du Jura, alluvions, bilan hydrologique, bilan des eaux souterraines, bassin versant, transfert d'eau souterraine

ABSTRACT

Hydrologic balances were established between Walliswil and Olten (foot of the Jura Mountain, cantons of Berne and Solothurn, Switzerland) and in the surrounding areas to define a coherent recharge field for the calibration of a numerical model of the alluvial Gäu aquifer (41 km²). Local detailed balances were linked to coarser balances over a large frame area (916 km²) including the Dünnerm basin and part of the Aar, Birse and Ergolz basins. Regional balances show possible groundwater transfers from recharge areas inside the Jura (Birse, Ergolz) to discharge areas at the foot of the Jura (Dünnerm, Aar), where the Gäu aquifer is located. In average, the groundwater recharge of

* Hydrogéologue-conseil, St-Gervais 31, CH-2108 Couvet

the Gäu aquifer is supplied by rain infiltration (31 %), by river infiltration (36 %) and by underground flow from the aquifer sides and bottom (33 %). These rates vary locally. The subdivision of the aquifer in five sections showed an important recharge in the downstream (north-east) part of the aquifer, related to a longitudinal flow within the limestone valley sides. The average recharge was modulated for low water periods (60 % of the average) and high water periods (150 %). The difference in recharge contribution is mainly due to changes in rain infiltration (10 % of the average value during low water, 186 % during high water).

KEYWORDS

Jura, alluvial deposits, hydrologic balance, groundwater balance, recharge area, discharge area, groundwater transfer

1. Introduction

Les bilans hydrologiques ont été étudiés entre Walliswil et Olten (pied du Jura, cantons de Berne et Soleure) et dans les régions voisines en vue d'une approche cohérente des alimentations pour le calibrage d'un modèle numérique d'écoulement des eaux souterraines de la nappe alluviale du Gäu (figure 1). Le présent article résume une partie importante de la thèse de l'auteur (PASQUIER 1986). Des articles précédents (PASQUIER 1982a, 1987), basés sur les caractéristiques chimiques de l'eau souterraine et les fluctuations piézométriques, ont mis en lumière le rôle joué par les versants et le substratum calcaires dans l'alimentation de la nappe. Un second article de ce même volume, traite de l'utilisation des bilans dans le calibrage du modèle (PASQUIER 2000).

La plaine du Gäu se situe entre la première chaîne du Jura et le repli anticlinal du Born. Elle renferme un aquifère alluvial qui repose directement sur les calcaires dans sa partie aval, et sur un placage molassique dans sa partie amont. Les alluvions sont en grande partie issues du remaniement de la moraine terminale du glacier wurmien située au sud-ouest d'Oensingen. Les alluvions fluvioglaciaires et fluviales contiennent une nappe d'eau souterraine qui se décharge dans l'Aar à ses deux extrémités, Walliswil et Olten. La ligne de partage des eaux souterraines se situe dans la région de Niederbipp. En hautes eaux, la nappe du Gäu se déverse encore vers celle de l'Aaregäu au seuil de Gunzgen et s'exfiltre dans la Dünneren dans la partie orientale, de Gunzgen à Olten.

La nappe du Gäu est alimentée par l'infiltration des précipitations, par l'écoulement souterrain des versants, du substratum et de la cluse de Balsthal, ainsi que par l'infiltration des cours d'eau, principalement la Dünneren mais aussi ses affluents descendant du Jura à Oberbipp, Niederbipp, Oberbuchsiten, Egerkingen, Hägendorf et Rickenbach, ainsi que par le Mittelläubach, un canal de dérivation de la Dünneren qui collecte les eaux de drainage et les écoulements de surface. Afin d'estimer ces différents types d'alimentation, nous avons étudié non seulement la nappe du Gäu (41 km²) et son bassin versant (64 km²), mais aussi, en raison des possibles transferts d'eau souterraine, un vaste système-cadre (916 km²) englobant le bassin de la Dünneren et une partie des bassins de l'Aar, de la Birse et de l'Ergolz (figure 3).

2. Bilans hydrologiques

Par bilans hydrologiques, on entend les bilans relatifs aux processus du cycle hydrologique, mettant en jeu le fractionnement des précipitations en évapotranspiration, ruissellement et infiltration (bilan météorique), la constitution des débits des cours d'eau à partir du ruissellement et des exutoires d'eau souterraine (bilan des eaux de surface), et la formation des écoulements souterrains à partir de l'infiltration efficace des précipitations et des cours d'eau et des apports souterrains par les versants ou le substratum (bilan des eaux souterraines). Les bilans équilibrent les apports et les sorties d'un système donné. En régime permanent, l'alimentation totale de la nappe correspond à la somme de ses exutoires.

Les composantes des bilans météoriques, des eaux de surface et des eaux souterraines sont illustrées sur la figure 2. L'alimentation (A) de la nappe a été subdivisée en infiltration efficace à partir des précipitations (I), en infiltration à partir des cours d'eau (I'), en réinfiltration des eaux prélevées à la nappe (I'') et en apports souterrains par les flancs de la nappe et son substratum (U).

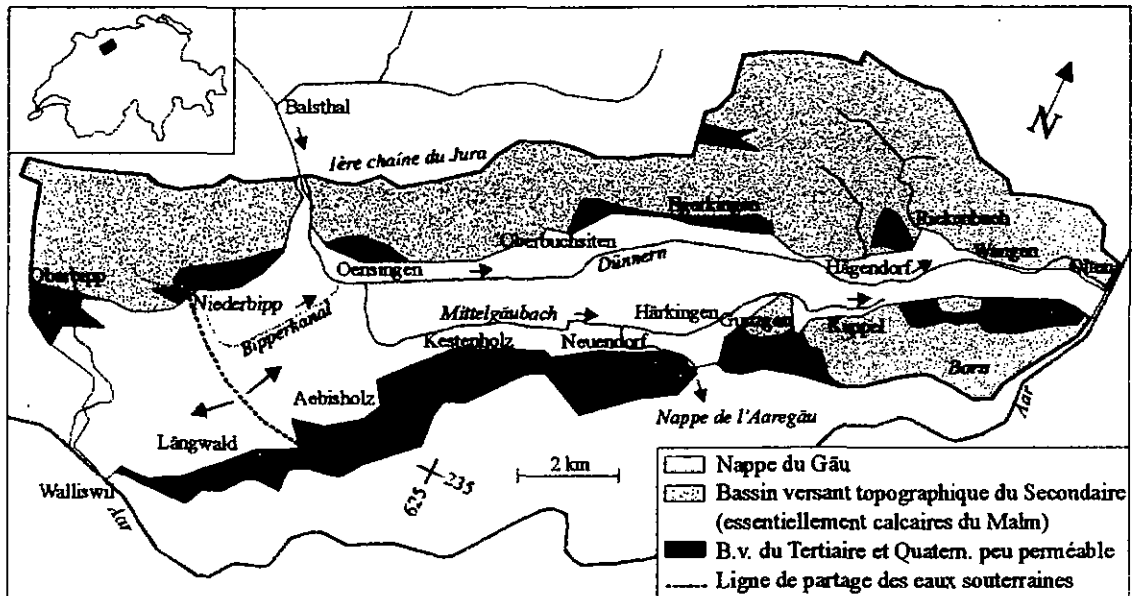


Figure 1 : Situation de la nappe du Gäu et de son bassin versant topographique.

Les exutoires (Z) ont été subdivisés en exutoires provoqués (N), en exutoires naturels en surface (N') et en exutoires souterrains aux limites de la nappe (V). N représente les débits de pompage, N' les exfiltrations dans la Dännerg et les débits d'exurgence (sources et drainages) dans les zones d'exutoire de Walliswil et d'Olten, et V les débits directs à l'Aar et à la nappe voisine de l'Aaregäu.

Le bilan des eaux souterraines s'exprime donc par :

$$A = Z \quad (1)$$

$$A = I + I' + I'' + U \quad (2)$$

$$Z = N + N' + V \quad (3)$$

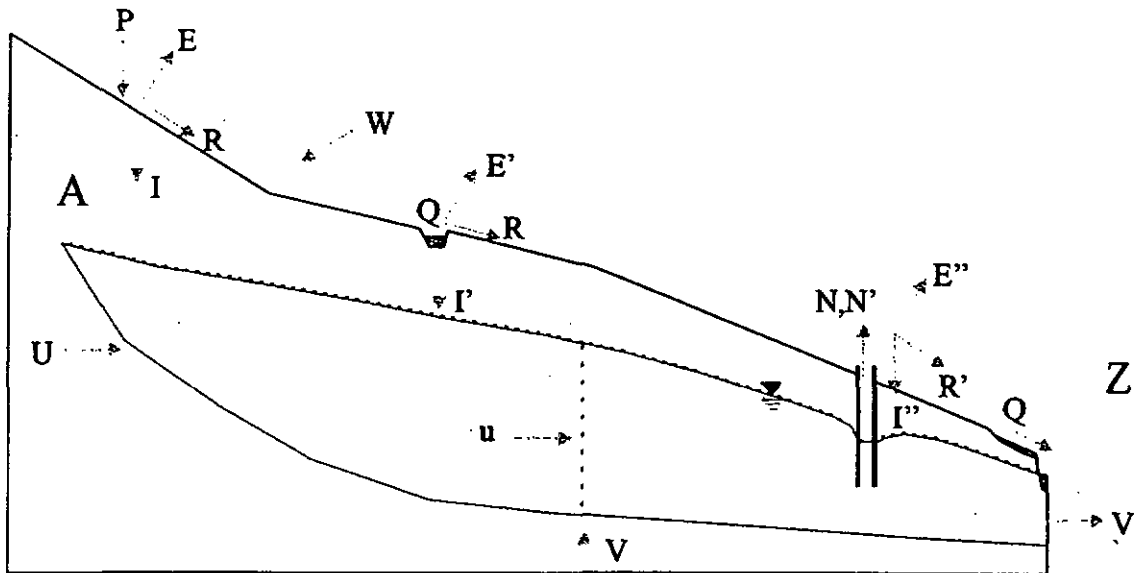


Figure 2 : Paramètres du cycle hydrologique.

LEGENDE

- A = alimentation des eaux souterraines du système considéré
- E = évapotranspiration primaire (sols et couverture végétale)
- E' = évaporation des cours d'eau
- E'' = évapotranspiration des eaux prélevées au système
- I = infiltration primaire efficace (à partir des précipitations)
- I' = infiltration efficace à partir des cours d'eau
- I'' = infiltration efficace à partir des prélèvements au système
- N = exutoires provoqués à l'intérieur du système
- N' = exutoires naturels à l'intérieur du système
- P = précipitations sur le bassin considéré
- Q = débit des cours d'eau
- R = écoulement de surface dû au ruissellement direct et retardé
- R' = écoulement de surface dû aux exutoires des eaux souterraines
- U = apports souterrains aux limites du système
- u = débit de transit souterrain à l'intérieur du système
- V = exportations souterraines aux limites du système
- W = apports de surface aux limites du système
- Z = exutoires des eaux souterraines du système considéré

Les variables des équations 2 et 3 ont fait l'objet d'une estimation directe basée sur des données, observations ou références (voir chapitre suivant). Pour contrôler la cohérence des valeurs admises (I, I', I'', N, N', U, V), nous avons établi, pour la nappe du Gäu et son bassin versant (figure 1) et en situation moyenne, un bilan des eaux météoriques (précipitations = évapotranspiration + ruissellement + infiltration) :

$$P = E + R + I \quad (4)$$

un bilan des eaux de surface (écoulement = apports externes + ruissellement + exfiltration de la nappe - évaporation - infiltrations) :

$$Q = W + R + R' - E' - I' \quad (5)$$

et un bilan des eaux souterraines, où le total des infiltrations ($\Sigma I = I + I' + I''$) et des apports aux limites (U) correspond au total des exutoires d'eau souterraine ($\Sigma N = N + N'$) et des exportations aux limites (V) :

$$\Sigma I + U = \Sigma N + V \quad (6)$$

Le transfert des eaux souterraines d'un bassin versant à l'autre s'exprime alors par ($U - V$), ou par ($\Sigma N - \Sigma I$) que l'on peut plus facilement estimer.

Après avoir établi le bilan global des eaux souterraines de la nappe du Gäu, on a contrôlé la répartition locale des alimentations en subdivisant la nappe en cinq secteurs (figure 4), chacun faisant l'objet d'un bilan individuel. Pour cela, on a introduit dans les équations 2 et 3 un paramètre de contrôle, le débit de transit souterrain (u) d'un secteur à l'autre. Pour le secteur i , $u(i)$ s'ajoute à U , et $u(i+1)$ s'ajoute à V .

3. Calculs et estimations des paramètres des bilans

Sauf mention contraire, toutes les quantifications sont exprimées en l/s et se rapportent à la moyenne à long terme 1901-1960. Les conditions hydrauliques de l'année 1980 et le niveau piézométrique du 1.10.1980 correspondent à peu près à cette moyenne à long terme.

3.1 Précipitations (P)

Le calcul des **précipitations (P)** a été établi sur la base de relations précipitations/altitude différenciées selon trois domaines orographiques : pied du Jura, vallées et crêtes. On a utilisé 37 stations pluviométriques fédérales, cantonales ou autres (études régionales). Les relations précipitation/altitude obtenues sont comparables à celles DE SCHUEPP *et al.* (1978) établies pour le Jura en général, mais révèlent une pluviosité moyenne plus faible, spécialement dans les vallées internes et sur les crêtes. La qualité de la corrélation est mauvaise dans ces deux derniers domaines. La séparation des domaines n'est pas toujours très nette, les conditions orographiques locales pouvant influencer la répartition des précipitations. Pour les bassins externes à celui de la Dünnerg, les précipitations ont été estimées par pondération des surfaces sur la carte pluviométrique de la Suisse (UTTINGER 1965).

(figure 3). En outre, les régimes pluviométriques à Olten et sur la plaine du Gäu sont très semblables.

3.2 Evapotranspiration et évaporation (E, E', E'')

Différentes méthodes, estimations et mesures de l'évapotranspiration (E) en Suisse fournissent des valeurs comprises entre 9 et 90 % des précipitations. Les calculs de bilans de bassins versants divers permettent de resserrer cette fourchette entre 17 et 58 %, et ces calculs appliqués aux bassins versants du Jura (notamment STUDIENGRUPPE VERDUNSTUNG 1978) fournissent des valeurs comprises entre 20 et 50 %.

L'estimation de l'évapotranspiration est délicate à cause des variations de l'exposition, de la couverture végétale, du type de sol, du mode de culture et de la date de récolte. La formule de PRIMAULT (1981) calcule des valeurs mensuelles qui fournissent une somme annuelle correspondant à environ 75 % de la valeur d'après TURC (1954) sur le bassin de la Dünner (0.40 P). BURGER (1983) indique que la formule de Turc donne des résultats satisfaisants dans le Jura. D'après les études régionales des bassins de la Dünner (LUESCHER 1975), de la Birse (MOTOR COLUMBUS AG 1981) et de l'Ergolz (MATOUSEK 1985), on a admis pour le système-cadre dans son ensemble $E = 0.45P$ (soit $E = 0.41P^*$), et cette moyenne a été modulée par bassin selon les indications de ces études avec une erreur estimée à $\pm 25\%$ à cause des incertitudes précitées (tableau 1).

L'évaporation des cours d'eau (E') a été estimée avec un taux d'évaporation de 400 mm/an. Cela représente une quantité négligeable pour le Dünnergäu (environ 5 l/s). En effet, selon ce taux d'évaporation, la Dünner entre Oensingen et Olten (20 km de long sur 15 m de large) devrait évaporer 3.8 l/s et les autres cours d'eau environ 1.2 l/s.

Par contre, l'évaporation (E'') des eaux captées à la nappe (eaux de consommation) peut prendre une valeur significative dans le cas de nappes fortement exploitées. Pour le Gäu, la comparaison des débits pompés et des débits retournant aux STEP, dans des périodes non influencées par des averses, nous amène à fixer E'' aux environs de 100 l/s, soit environ 7.5 % des précipitations sur la nappe. A l'échelle du bassin versant de la nappe, E'' représente 0.025P et peut être négligé. L'évapotranspiration totale correspond alors approximativement à l'évapotranspiration des sols (E).

3.3 Ecoulement de surface (Q, R, R', W)

Le débit des cours d'eau (Q) est formé par les apports externes (W), l'écoulement dû au ruissellement direct et retardé sur et dans le sol (R) et l'écoulement des exutoires des eaux souterraines (R'), auxquels on soustrait l'évaporation et l'infiltration. Le débit d'écoulement des bassins du système-cadre (sans les apports externes) figure dans le tableau 1.

PASQUIER : BILANS HYDROLOGIQUES DE LA NAPPE ALLUVIALE DU GÄU

Tableau 1 : Précipitations P et écoulement propre (Q-W) des bassins du système-cadre.

Bassin versant	No	Surface (km ²)	P (mm/an)	P (l/s)	Q-W (l/s)	(Q-W) / P (-)	E/P (-)
Système-cadre	0.0	916	1131	32866	16170	0.49	0.45
Aar	1.0	173	1150	6282	3300	0.53	0.45
Dünnern	2.0	243	1196	9215	4460	0.48	0.46
Birse	3.0	324	1100	11255	5460	0.49	0.43
Ergolz	4.0	176	1100	6114	2950	0.48	0.47
Dünnern	2.0	243	1196	9215	4460	0.484	0.46
Dünnern-Gäu (y.c. cluse)	2.1	101.6	1222	3933	1740	0.444	
Dünnern amont Balsthal	2.2	75.0	1178	2800	1440	0.514	
Augstbach	2.3	66.4	1179	2502	1280	0.511	
Dünnern-Gäu (y.c. cluse)	2.1	101.6	1222	3933	1740	0.444	
Gäu-plaine	2.1/A1	38.1	1225	1359			
Gäu-flancs	2.1/B1-5	61.0	1290	2495			
Cluse amont	2.1/C	2.5	990	79			
BV nappe du Gäu	A+B	105.2	1232	4109			
Nappe	A	41.1	1129	1472			
Flancs	B	64.1	1297	2637			
Nappe du Gäu	A	41.1	1129	1472			
hors BV-Dünnern	A0	3.0	1200	113			
dans le BV-Dünnern	A1	38.1	1225	1359			
Flancs nappe du Gäu	B	64.1	1297	2637			
hors BV-Dünnern	B0	3.1	1480	142			
Jura Olten-Egerkingen	B1	24.5	1202	934			
Jura Egerkingen-Oensingen	B2	14.0	1539	681			
Jura Oensingen-Oberbipp	B3	9.7	1525	469			
Born Olten-Härkingen	B4	7.1	1030	231			
Sud-est Neuendorf-Walliswil	B5	5.7	1000	180			

Tableau 2 : Débits des cours d'eau du bassin versant de la nappe du Gäu.

Cours d'eau	Date	Débits (l/s)	Référence	Débit moyen (1901-1960) estimé (l/s)	Somme débit (1901-1960) Dünnern (l/s)
BV DUENNERN					
Dünnern à Balsthal	1979-1981	450-31520	Kant. A.W./SO	1437	1437
Mümliswiler et Augstbach	1979-1981	-	Kant. A.W./SO	1278	2715
Dérivation Mittelgäubach	1979-1980	-	Kant. A.W./SO	-119	2596
Bipperkanal à Oensingen	1976-1977	17-72	Werner 1981	* 60	2656
STEP Oensingen	1977-1978	185-200	Kant. A.W./SO	185	2841
Mülbach Oberbuchsiten	1974-75, 1983	6, 50, 40	Pasquier 1986	* 30	2871
Flüelochbach Egerkingen	1974, 1983	5, 30	Pasquier 1986	* 25	2896
Drainage nappe X3+X57	1978-1982	-	Kant. A.W./SO	30	2926
STEP Gunzgen	1974-1978	59-94	Kant. A.W./SO	90	3016
Cholersbach Hägendorf	1974, 1983	20-200	Pasquier 1986	* 175	3191
Drainage Born	1983	10	Pasquier 1986	* 30	3221
Ruisseau Rickenbach	1974-75, 1983	20-200	Pasquier 1986	* 100	3321
Ruisseau Wangen	1974, 1983	10-30	Pasquier 1986	* 25	3346
Ruisseau Rötzmatt	1934-1955	315-325	EAWAG 1957	319	3665
Apports inconnus+erreurs	-	-	Pasquier 1986	800	4465
Evaporation Dünnern	-	-	Pasquier 1986	-5	4460
Dünnern à Otten	1978-1980	420-12000	SHGN	4460	4460
HORS BV DUENNERN					
Oberbipperbach	1976-1977	0-78	Werner 1981	* 65	
Walliswilerbach	1980	-	Pasquier 1986	* 15	
Hardgraben Härkingen	-	-	Pasquier 1986	* 5	
Boningerbach	1979-1980	46	Werner 1981	* 45	

* Apport des versants de la nappe, au total 575 l/s

Dans le bassin de la nappe du Gäu, le cours d'eau le plus important est la Dünnern. En amont de Balsthal, elle constitue avec l'Augstbach et le Mümliswilerbach les apports externes, et dans la plaine du Gäu elle capte le Bipperbach de Niederbipp, le Mülbach d'Oberbuchsiten, le ruisseau d'Egerkingen, le Cholersbach d'Hägendorf et le ruisseau de Rickenbach, ainsi que les affluents des stations d'épuration d'Oensingen et de Gunzgen, et des eaux de ruissellement, de drainage et d'exfiltration de la nappe. Le tableau 2 présente l'évolution des débits le long du cours de la Dünnern, avec l'apport des différents affluents.

Le débit de la Dünner est bien connu à Balsthal et à Olten. Dans la plaine du Gäu, nous avons peu de données sur les débits des affluents de la Dünner et sommes réduits à des estimations grossières, sauf pour le Bipperkanal et le Mittelgäubach. Ce dernier est constitué d'un réseau de canaux qui longe la rive droite de la plaine du Gäu, alimenté lui-même en grande partie par la Dünner (dérivation au nord-ouest d'Oensingen). Il se sépare en deux branches à Neuendorf, l'une allant vers Kappel et l'autre (le Boningerbach) dérivant une partie des eaux vers l'Aaregäu, à Härkingen. Les canaux sont équipés de trois limnigraphes qui permettent de calculer, depuis 1979, les différences de débit entre Oensingen et Kappel.

Le **ruissellement (R)** dépend de multiples facteurs, parmi lesquels le régime des averses, la pente et la nature des terrains. Ces derniers varient fortement d'un endroit à l'autre. Compte tenu du peu de données disponibles, nous avons estimé une fourchette de valeurs mensuelles probables pour R en analysant les averses de deux mois très différents, août et décembre 1974, par la formule de IZZARD (in CHOW 1964, p.14-36) qui prend en compte l'intensité des précipitations, la pente et la rugosité du terrain, ainsi que la distance de ruissellement. Nous avons obtenu pour le Dünnergäu $R = 14 \text{ mm} = 0.21 P$ pour le mois d'août 1974, et $R = 43 \text{ mm} = 0.36 P$ pour le mois de décembre de la même année. Ces résultats n'ont qu'une valeur indicative, car la définition des pentes (10 % pour le bassin du Dünnergäu) et des coefficients de rugosité (0.06 pour l'herbe dense) nécessiterait une discrétisation détaillée que nous n'avons pas effectuée. En moyenne pour le Dünnergäu on admettra pour R une valeur centrale de $0.32P \pm 33 \%$ pour le calcul des bilans météoriques.

Dans les bassins internes au Jura, les pentes moyennes sont environ deux fois plus fortes, et les valeurs de ruissellement ont été majorées environ d'un facteur 1.5 en août et 1.2 en décembre, soit en moyenne $0.37P$. Le ruissellement ainsi défini fournit environ 70 % du débit des cours d'eau présentés dans le tableau 1, le reste provenant des eaux souterraines (sources et exfiltrations de nappes).

Dans la plaine du Gäu, la faible pente du terrain (environ 0.4 %) devrait modérer le ruissellement, alors que la densité des surfaces construites (environ 10 %) devrait avoir un effet inverse. Le premier facteur a été jugé prédominant et R a été admis à $0.16P \pm 50\%$. Comme R vaut $0.32P$ pour le Dünnergäu (versants et plaine), il s'ensuit que $R(\text{versants}) = 0.42P$.

L'**écoulement dû aux exutoires des eaux souterraines (R')** est difficile à estimer. Pour le Dünnergäu, le débit des STEP est assez bien connu ($275 \pm 25 \text{ l/s}$), mais les exfiltrations de la nappe dans la Dünner ont dû être approximées d'après la loi de Darcy avec une grande incertitude (90 l/s , min. 40 l/s , max. 200 l/s). L'apport des sources a été jugé équivalent au débit des sources non captées sur les versants ($195 \pm 25 \text{ l/s}$). Le total a donc été estimé à $560 \pm 200 \text{ l/s}$. Ce total correspond à une grande partie des apports inconnus du bilan longitudinal de la Dünner (800 l/s , tableau 2).

3.4 Infiltrations (I, I', I'')

L'**infiltration efficace des précipitations (I)** est très difficile à quantifier, surtout en l'absence de données telles qu'essais lysimétriques et profils hydriques de la zone non

saturée. Elle ne peut pas se déduire des fluctuations piézométriques, car la nappe du Gäu est alimentée également par l'infiltration des rivières et des versants. L'infiltration efficace dépend notamment de la pente des terrains, de la nature du sol et de la zone non saturée, de la couverture végétale et des cultures, du climat et bien sûr du régime des précipitations. TROEHLER (1976) a estimé l'infiltration efficace des précipitations sur le plateau suisse entre 20 et 25 % en moyenne.

Comme les données disponibles se limitaient aux précipitations, nous avons développé un modèle empirique basé sur le régime des précipitations à Egerkingen. Ce modèle prend en compte l'intensité i et de la durée d des averses, l'évapotranspiration E et l'antécédence des précipitations api ; i et d déterminent un taux d'infiltration primaire f d'autant plus grand que l'averse est de plus longue durée (COLLIS-GEORGE 1977) dans un premier temps, mais qui croît jusqu'à un certain maximum puis diminue lentement si l'averse se prolonge (LAFFORGUE 1978); f est donc approximé par deux droites ($f = 0.13 + 1.37(d/i)$ pour $0 < d/i \leq 0.5$ et $f = 0.83 - 0.03(d/i)$ pour $d/i > 0.5$). Notons que $1-f$ représente le ruissellement direct. L'indice d'antécédence des précipitations api tient compte de l'état d'humidité du sol avant l'averse et vaut $0.9^{(1+j)}$, j étant le nombre de jours antécédents où $P < 1\text{mm}$.

L'infiltration efficace peut alors être définie par $I = P f api - E$. Les valeurs mensuelles de f et api ont été calculées en moyennant les valeurs individuelles des averses du mois considéré. L'évapotranspiration E a été calculée d'après TURC (1954) et modulée mensuellement. Les taux d'infiltration efficace mensuels ainsi calculés sont généralement faibles en été et forts en hiver, mais ils varient en fait assez irrégulièrement entre 0 et 0.5 environ. En moyenne annuelle, le taux d'infiltration efficace représente environ 20 % des précipitations, ce qui conduit à une infiltration globale estimée pour la surface de la nappe du Gäu à environ 295 l/s.

L'**infiltration des cours d'eau (I')** a été estimée principalement d'après des jaugeages longitudinaux. WERNER + PARTNER AG & KELLERHALS + HAEFELI AG (1984/97) fournissent des débits d'infiltration du Bipperkanal et de la Dünnerm à Oensingen, basées sur des jaugeages répétitifs.

Le débit d'infiltration du Bipperkanal varie peu, de 14 à 17 l/s, par rapport au débit du canal, qui varie de 8 à 72 l/s. Le tronçon jaugé mesure 3 km, l'infiltration vaut donc environ 5 l/s.km.

Les campagnes effectuées sur la Dünnerm entre Oensingen et Oberbuchsiten indiquent une infiltration moyenne de 34 l/s.km en basses et moyennes eaux. Deux autres jaugeages de la Dünnerm, effectués en amont et en aval d'Oensingen pour un débit moyen de 480 et 1270 l/s, fournissent un débit d'infiltration peu variable, de 49 à 52 l/s.km. Plus en aval, l'estimation est malaisée car les apports à la Dünnerm dans le Gäu sont mal connus (voir tableau 2). Une infiltration de la Dünnerm existe aussi, comme le montre un essai de coloration à Wangen (SIEBER-CASSINA-MOSER 1981) et des débits d'étiage plus importants à Balsthal qu'à Olten, soit 230 l/s le 1.10.1980. L'apport des affluents à cette date est estimé à 350 l/s environ, et le prélèvement pour la dérivation du Mittelgäubach à 130 l/s. L'infiltration de la Dünnerm a donc été estimée à 450 l/s en étiage. En moyenne, le débit

d'infiltration devrait être supérieur. Selon une relation étiage/état moyen analogue à celle du Bipperbach, il pourrait atteindre 600 l/s, soit environ 46 l/s·km calculé sur un tronçon de 13 km. Ce taux d'infiltration de la Dünnerm correspond environ aux valeurs mesurées près d'Oensingen.

La différence de débit du Mittelgäubach/Boningerbach entre Oensingen et Kappel varie entre 27 l/s environ en étiage et 103 l/s environ en période de hautes eaux (AWS dès 1979). En moyenne, pour trois années assez humides (1979 - 1981), elle vaut 66 l/s. Cette différence représente une valeur minimale d'infiltration, car les apports au canal, estimés à environ 40 l/s, ne sont pas pris en compte. Compte tenu des apports intermédiaires, on peut estimer à environ 100 l/s (env. 12.5 l/s·km) les infiltrations moyennes du Mittelgäubach.

N'ayant pas de données d'infiltration des cours d'eau de la région NE (Cholersbach sur 0.5 km, Rickenbach sur 0.5 km et Gheidgraben sur 1.5 km), nous leur attribuerons un taux d'infiltration situé entre celui du Bipperkanal et celui du Mittelgäubach, soit 7 l/s·km.

La **réinfiltration I''** des eaux prélevées à la nappe, naturellement (sources) ou artificiellement (pompages), est peu importante. Elle nous paraît significative surtout dans les gravières, où une partie des débits pompés se réinfiltré après usage. Ailleurs, les eaux pompées contribuent presque uniquement à l'évapotranspiration (consommation, irrigation) et au ruissellement (eaux de lavage). A défaut d'indication précise, on a admis pour I'' 1/3 du débit pompé dans les gravières de Iff, Aebisholz et Portland, soit environ 15 l/s. On constate que I'' joue un rôle mineur dans les bilans, et qu'on pourrait le négliger.

3.5 Exutoires des eaux souterraines (N, N', V)

Les exutoires des eaux souterraines du système-cadre figurent dans le tableau 3. Ils sont représentés en grande partie par les **sources en surface ou en tunnel (N')** (PASQUIER 1982b), le reste étant réparti de manière sensiblement égale entre les prélèvements par **pompage (N)** et les **exutoires souterrains (V)**. Les données sont en partie bien étayées (pompages, débits des tunnels, sources de plus de 100 l/min), en partie estimées très grossièrement, par comparaison avec l'un ou l'autre des bassins les mieux connus (Dünnerm et Ergolz). Les débits souterrains d'un bassin à l'autre (V1) ne sont en général pas connus, ils seront estimés schématiquement par le traitement des bilans. Seuls les exutoires aux limites du système (V2) sont indiqués dans le tableau. Ils correspondent à l'écoulement dans les alluvions de la Birse, de l'Ergolz et de l'Aar à la sortie du système-cadre (figure 3).

Les exutoires de la **nappe du Gäu** sont représentés dans le tableau 4. Les **prélèvements par pompage (N)** représentent 415 l/s en moyenne. Ils sont surtout concentrés dans le secteur 3 (captages d'Oensingen et de Niederbipp) et dans le secteur 5 (captages du Gheid pour la ville d'Olten). Les **exutoires de surface (N')** sont les sources et drainages d'Olten à l'extrémité est de la nappe et ceux de Walliswil à son extrémité sud-ouest, ainsi que les exfiltrations de la nappe dans la Dünnerm.

A **Olten**, un captage à drains horizontaux et un réseau de drainages collectent les exurgences de la nappe dans un canal avec déversoir (Rötzmatt) où le débit varie entre 100 et 480 l/s (STAEDTISCHE WERKE OLTEN 1950, EAWAG 1957). Les nombreuses valeurs

de débit ont été corrélées à celles du niveau de la nappe, ce qui permet de fixer le débit moyen (235 l/s), d'étiage (environ 100 l/s) et de hautes eaux (environ 300 l/s). Plus en aval, d'anciens drainages (Schützenmatte) captent encore de l'eau de la nappe (150 l/s en hautes eaux) et l'amènent à l'Aar au voisinage de la piscine. Faute de données suffisantes, on a estimé le débit de ces derniers drainages à 100 l/s en moyenne et 50 l/s en étiage.

A Walliswil, la partie ouest de la nappe s'exfiltre par une série de sources et de canaux de drainage situés plus bas que l'Aar. Ces derniers récoltent donc aussi de l'eau d'infiltration de l'Aar. L'ensemble des eaux collectées est relevé par une vis sans fin et déversé à l'Aar par un canal unique équipé d'un limnigraphe. Le débit brut de ce canal dépend principalement du niveau de la nappe, mais aussi de celui de l'Aar et du ruissellement en cas de précipitations, et vaut en moyenne environ 275 l/s (année hydrologique 1974-1975, CSD 1975). Le débit net (part de la nappe) a été estimé à environ 75 % du débit brut, par décomposition empirique de ce dernier au cours d'une année hydrologique (écrêtement des pics dus au ruissellement, infiltration de l'Aar proportionnelle à son niveau et calibrée grâce à la minéralisation différente des eaux de l'Aar et de la nappe). On en conclut que le débit net moyen (part de la nappe) est d'environ 210 l/s. WERNER + PARTNER AG & KELLERHALS + HAEFELI AG (1984/97) fournissent pour la nappe en hautes eaux une répartition comparable (débit net de 75 à 85 % du débit brut), mais une valeur moyenne du débit brut entre 1976 et 1980 nettement supérieure (385 ± 85 l/s).

La Dünnerne draine la nappe de manière permanente à Olten-Hammer sur un tronçon d'environ 300 m (débit déterminé d'après la loi de Darcy à environ 30 l/s), et de manière temporaire, en hautes eaux, entre Egerkingen et Wangen mais principalement entre Gunzgen et Kappel. Le débit a été estimé d'après la loi de Darcy entre 150 et 200 l/s le 8.4.1980, en hautes eaux, soit environ 60 l/s en moyenne. D'après ces estimations, le débit moyen d'exfiltration serait au total de 90 l/s. Cependant, en comparant les apports à la Dünnerne entre Balsthal et Olten pour des débits similaires à Olten mais des états différents de la nappe, on a pu déduire une relation linéaire entre les apports probables par exfiltration et le niveau de la nappe. Il en résulte un débit d'exfiltration moyen estimé à 275 l/s environ (trois fois plus que l'estimation d'après la loi de Darcy), réparti en 30 l/s dans le secteur 4 et 245 l/s dans le secteur 5. En très hautes eaux seulement, deux ouvrages liés à l'autoroute drainent encore la nappe à Egerkingen pendant un à deux mois les années humides. D'après les enregistrements de 1978 à 1983, le débit moyen a été évalué à 5 l/s pour les deux ouvrages.

Des exutoires souterrains de la nappe (V) sont connus à Olten, Walliswil et Härkingen (en hautes eaux). A Olten, la nappe se déverse par un écoulement souterrain dans les alluvions sous l'Aar, où le potentiel est un peu plus faible que dans la rivière (0.4 à 0.6 m en moyenne). Le débit moyen d'exutoire a été estimé grossièrement d'après la loi de Darcy à environ 100 l/s. A Walliswil, un écoulement direct de la nappe dans l'Aar a lieu dans la partie est. Il est déterminé à environ 50 l/s d'après la loi de Darcy. A Härkingen, le seuil d'Usserdorf permet le déversement de la nappe du Gäu vers l'Aaregäu en hautes eaux. Le débit moyen très modeste (environ 5 l/s, assez incertain d'après CSD 1980) est dû aux faibles transmissivités du seuil. Enfin, on a admis qu'il n'y a pas d'infiltration de la nappe dans le substratum calcaire, car les potentiels sont supposés plus faibles dans la nappe que

dans son environnement immédiat (indices d'alimentation de la nappe par le karst, PASQUIER 1987).

Globalement, les exutoires de la nappe du Gäu sont estimés en moyenne à 1390 l/s (tableau 4), dont 69 % (960 l/s) dans le secteur 5, 19 % (266 l/s) dans le secteur 1 et le reste, essentiellement des pompages, dans les secteurs 2, 3 et 4.

Tableau 3 : Exutoires des eaux souterraines du système-cadre.

Bassin versant	Surface km ²	Sources N' (l/s)	Tunnels N' (l/s)	Pompages N. (l/s)	Sorties aux limites V2 (l/s)	Total (l/s)
Aar	173	946	240	90	450	1726
1.1	16	66	7	55	200	
1.2	46	440	0	25	200	
1.3	114	440	233	10	50	
Dünnern	243	1528	75	435	200	2238
2.1	102	989	15	415	200	
2.2	75	439	0	10	0	
2.3	66	100	60	10	0	
Birse	324	472	58	80	150	760
Ergolz	176	467	86	68	80	701
Système	916	3413	459	673	880	5425

3.6 Débit de transit et apports souterrains (u, U)

Le débit de transit (u) à travers la nappe du Gäu a été estimé par divers auteurs entre 200 et 550 l/s dans la partie centrale (FROELICHER 1966, WERNER 1979) et entre 900 et 1100 l/s dans la partie aval (BALDINGER & SCHMASSMANN 1955, EAWAG 1957, FROELICHER 1963). D'après ces données, une forte alimentation survient entre Gunzgen et Olten.

Nos estimations par la loi de Darcy à partir des cartes de transmissivité et de potentiel (figure 4a) sont beaucoup plus modestes : en hautes eaux, environ 200 l/s dans la partie centrale, 100 l/s entre Gunzgen et Kappel, 450 l/s à Wangen et 250 l/s à Olten/Gheid. En moyenne et à la limite amont des secteurs, $u_1 = 0$ (ligne de partage des eaux souterraines), u_2 négligeable approximé à 0 l/s (à l'entrée du modèle au milieu de la cluse de Balsthal), $u_3 = 135$ l/s (à la sortie de la cluse de Balsthal), $u_4 = 68$ l/s (au rétrécissement de Kestenholz) et $u_5 = 86$ l/s (au verrou de Gunzgen). Pour équilibrer les bilans (chapitre suivant), les valeurs de u_3 , u_4 et u_5 ont été amenées respectivement à 58 l/s, 165 l/s et 297 l/s (figure 4b). La partie centrale de la nappe paraît ainsi alimentée essentiellement par la région d'Oensingen (environ 150 l/s). La nappe perd une bonne part de son débit par exfiltration dans la Dünnern au passage de Gunzgen, pour être ensuite fortement réalimentée en amont de Wangen, probablement par le sillon de Rickenbach. Le transit dans la partie sud-ouest de la nappe (Längwald) a été évalué à 150 l/s environ.

Tableau 4 : Exutoires de la nappe du Gäu (débits estimés avant bilans).

Secteur	Lieu	Pompage	Exfiltrat	Sources,	Débit aux	Débit de	Total
		N	Dünnern	drains	limites	transit	
		(l/s)	N'	N'	V	u	(l/s)
		(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)
1	Gravière Iff	6.2					
1	Walliswil			210	50		
1	Total	6.2	0	210	50	0	266
2	Von Roll/cluse	28.5					
2	Oensingen Badmatt	1.6					
2	sortie cluse					135	
2	Total	30.1	0	0	0	135	165
3	Niederbipp-neu	23.5					
3	Niederbipp-Tela	6.7					
3	Oensingen-Moos	36.4					
3	Gravière Aebisholz	2.5					
3	section Kestenholz					68	
3	Total	69.1	0	0	0	68	137
4	Oberbuchsiten	4.5					
4	Niederbuchsiten	7.0					
4	Neuendorf	3.9					
4	Egerkingen	4.5					
4	Härkingen	4.3					
4	X3+X57 autoroute	5.0					
4	Gunzgen		30				
4	Härkingen				5		
4	section Gunzgen					86	
4	Total	29.2	30	0	5	86	150
5	Kappel	44.2					
5	Wangen	31.7					
5	Olten-Gheid	158.5					
5	Olten-Portland	36.5					
5	Olten-Hunziker	8.9					
5	Olten-Strandbad	0.4					
5	Dünnern-Kappel		155				
5	Dünnern-Olten		90				
5	Olten-Rützmatt			235			
5	Olten-Schützenmatt			100			
5	alluvions Aar-Olten				100		
5	Total	280.2	245	335	100	-	960
1-5	TOTAL	414.8	275	545	155	-	1390

Les apports souterrains (U) à la nappe du Gäu par les versants et le substratum ne sont pas directement observables. Ils ont été postulés sur la base du chimisme et des fluctuations piézométriques (PASQUIER 1987), principalement dans la partie aval de la nappe et dans la région d'Oensingen. De plus, une simulation rudimentaire des écoulements souterrains dans le système-cadre (PASQUIER 1980) indique un apport approximatif de 400 l/s.

4. Résultats (équilibre des bilans)

Sauf mention contraire, toutes les quantifications sont exprimées en l/s et se rapportent à la moyenne à long terme 1901-1960. Les conditions hydrauliques de l'année 1980 et le niveau piézométrique du 1.10.1980 correspondent à peu près à cette moyenne à long terme.

4.1 Bilan des eaux souterraines de la nappe du Gäu

Les exutoires de la nappe du Gäu sont les pompages (N), les exutoires naturels en surface (N') et souterrains (V) de Walliswil, de Gunzgen-Kappel et d'Olten (indices w, g et o, respectivement). Ils ont été estimés au chapitre précédent (tableau 4). Les fourchettes d'incertitude ont été définies empiriquement suivant la qualité des données (5 à 20 % pour N et 10 à 100% pour N' et V). On a ainsi obtenu pour la nappe du Gäu, en moyenne (l/s) :

$$N = 415 (\pm 20)$$

$$N'w = 210 (\pm 20), N'o = 335 (\pm 50) \text{ et } N'g = 275 (\pm 85), \text{ d'où } N' = 820 (\pm 155)$$

$$Vw = 50 (\pm 30), Vo = 100 (\pm 60) \text{ et } Vg = 5 (\pm 5), \text{ d'où } V = 155 (\pm 95)$$

$$Z = N + N' + V = 1390 \pm 280 \quad (3.1)$$

Les alimentations proviennent de l'infiltration des précipitations (I), de celle des cours d'eau (I'), de celle des exutoires artificiels et naturels de la nappe (I'') et des apports par les versants ou le substratum (U). Selon les estimations du chapitre 3, I correspond à $0.2P \pm 50\%$ sur l'aire de la nappe. I' vaut 15 ± 5 l/s pour le Walliswiler-Oberbipperbach, 15 ± 5 l/s pour le Bipperkanal, 600 ± 200 l/s pour la Dünneren, 100 ± 3 l/s pour le Mittelgäubach, et 20 ± 10 l/s pour les affluents de la zone nord-est (Cholersbach, Rickenbach, Gheidgraben). I'' est défini à 15 l/s $\pm 75\%$, et U correspond à $0.15P$ des versants $\pm 75\%$. On a donc en moyenne (en l/s) :

$$I = 295 (\pm 150)$$

$$I' = 750 (\pm 250)$$

$$I'' = 15 (\pm 10)$$

$$U = 400 (\pm 300)$$

$$A = I + I' + I'' + U = 1460 (\pm 710) \quad (2.1)$$

Au bilan, les alimentations doivent être égales aux exutoires (régime permanent). La valeur centrale et la fourchette de compatibilité des équations 2 et 3 sont :

$$A = Z = 1420 (\pm 250) \quad (1.1)$$

Pour satisfaire à l'équation 1.1, il faut réduire légèrement les paramètres de l'équation 2.1, et augmenter ceux de l'équation 3.1. L'importance relative des paramètres d'alimentation peut se contrôler par le bilan des eaux de surface (pour I'), le bilan météorique (pour I), et le bilans des transferts souterrains (pour U). L'augmentation des paramètres d'exutoire (+ 30 l/s) sera effectuée à part égale sur les moins bien connus d'entre eux (N' et V).

4.2 Bilan météorique de la nappe du Gäu

Il a pour but le contrôle de l'infiltration I au moyen de l'équation 4. Les précipitations vraies P* au-dessus de la nappe du Gäu (41 km²) ont été estimées à 1.08P ± 12.5 % (P représentant la moyenne à long terme 1901-1960), l'évapotranspiration E à 0.412P ± 25 % et le ruissellement R à 0.16P ± 50 %. On obtient ainsi pour la surface de la nappe du Gäu :

$$P*(1590 \pm 200) - E(680 \pm 170) - R(235 \pm 120) = I(675 \pm 490) \quad (4.1)$$

L'équation 4.1 fournit une valeur de I compatible avec celle de l'équation 2.1, mais définie par une plus large fourchette (185 < I < 1165). Elle ne permet donc pas de resserrer la valeur de I. Cependant, la valeur centrale de I dans l'équation 4.1 est supérieure à la valeur maximale de I dans l'équation 2.1. On choisira donc cette dernière valeur (I = 445) comme représentative de l'infiltration efficace des précipitations.

En effet, la méthode adoptée pour obtenir une valeur à probabilité maximale consiste à rester dans la fourchette admise par l'estimation directe, tout en tirant au maximum la valeur vers la valeur centrale obtenue par les bilans. La fourchette d'erreur de la nouvelle valeur est alors en principe définie par la distance à la borne la plus proche de l'estimation directe (± 0 si la nouvelle valeur correspond à une borne de l'estimation directe). En réalité, on admettra une erreur minimale de ± 10 %.

4.3 Bilan des eaux de surface de la nappe du Gäu et de ses versants

Il a pour but le contrôle de l'infiltration des cours d'eau I' au moyen de l'équation 5, basée sur le débit des cours d'eau à l'entrée et à la sortie du bassin. Comme on ne connaît pas suffisamment le débit des cours d'eau issus des versants de la nappe (voir tableau 2, "apports inconnus + erreurs"), il faut englober ces derniers dans le bilan. W représente les apports de surface aux limites du système considéré. Pour la surface de la nappe et son bassin versant (surface 107.6 km²), c'est le débit de la Dünner à la cluse de Balsthal (erreur admise de ± 5 %). Le ruissellement direct et retardé R a été estimé à 0.32P ± 33%, l'évaporation des cours d'eau E' à 5 l/s ± 33 %. Le débit des cours d'eau Q est le débit de la Dünner à Olten (4460 l/s ± 5 %) et des cours d'eau qui sortent du bassin de la Dünner, à Walliswil et à Gunzgen (130 l/s ± 10%). L'écoulement dû aux exutoires de la nappe R' comprend les exfiltrations dans la Dünner et le déversoir de Rötzmatt à Olten (510 ± 150 l/s), la part (85 %) du débit des STEP issu des captages de nappe et des sources (235 ± 25 l/s), et enfin le débit des sources non captées sur les versants (195 ± 25 l/s). On obtient ainsi le bilan des eaux de surface suivant :

$$W(2715 \pm 140) + R(1315 \pm 440) - E'(5 \pm 2) - Q(4590 \pm 236) + R'(935 \pm 150) = I'(370 \pm 1018) \quad (5.1)$$

On voit que I' peut être compris entre 0 et 1388 l/s. La valeur centrale pour la nappe et ses versants (370 l/s) est inférieure à la valeur minimale de I' dans l'équation 2.1 pour la surface de la nappe seulement ($I'_{\min} = 500$ l/s). On choisira donc $I' = 500$ l/s comme valeur représentative de l'infiltration des cours d'eau sur la surface de la nappe. L'estimation première de l'infiltration de la Dünnerm (600 l/s) paraît donc trop grande.

4.4 Bilan des transferts souterrains

La cohérence des circulations souterraines entre les différents bassins versants du système-cadre a été contrôlée par un bilan d'ensemble, fournissant des ordres de grandeur des eaux infiltrées dans le sous-sol (ΣI), des exutoires internes aux bassins (ΣN) et des exportations d'un bassin vers l'autre ($V1$) et à l'extérieur du système ($V2$). ΣI est connu par le bilan des eaux météoriques ($P - E - Q = \Sigma I$, autre expression de l'équation 4) et ΣN est connu par inventaire (tableau 3). Dès lors, l'équation 6 ($\Sigma N - \Sigma I = U - V$) fournit le solde des transferts.

Les bilans ne permettent de connaître que le solde des transferts ($U - V$). Ce solde (tableau 5) montre un déficit des infiltrations par rapport aux exutoires ($\Sigma N - \Sigma I > 0$; zone d'exutoire) dans les bassins de l'Aar et de la Dünnerm, et l'inverse dans les bassins de la Birse et de l'Ergolz (zone d'alimentation). Le déficit est équilibré par les transferts, qui se font de manière plausible du Jura vers l'Aar et d'WNW vers l'ESE (figure 3).

Pour définir U ou V , il faut supposer l'un pour trouver l'autre. On a donc admis qu'il n'y a pas d'apport externe au système, ni d'apport au bassin de la Birse situé en zone d'alimentation ($U = 0$). En raison de la direction générale d'écoulement, on a supposé un léger apport au bassin de l'Ergolz ($U = 60$ l/s), une exportation du bassin de l'Aar vers celui de la Dünnerm dans la première chaîne du Jura ($V1 = 240$ l/s) et une exportation du bassin de la Dünnerm vers celui de l'Aar ($V1 = 535$ l/s, dont 235 l/s sont connus à travers la nappe du Gäu). Les exportations à l'extérieur du système ($V2$) ont été estimées par ailleurs (tableau 3). On en a déduit les transferts des bassins de la Birse et de l'Ergolz ($V1$) vers ceux de la Dünnerm et de l'Aar (U).

Sur la figure 3, on a imaginé une répartition de ces transferts compatible avec le tableau 5 et tenant compte des transferts connus ou supposés (PASQUIER 1980). Selon ce schéma, le bassin de la Dünnerm reçoit 1101 l/s des bassins voisins et en restitue 535 l/s vers celui de l'Aar et 200 à la limite du système. Les apports transitent par la première chaîne du Jura (versants de la nappe du Gäu).

En ce qui concerne les versants de la nappe du Gäu, il s'agit de contrôler s'ils peuvent assurer l'alimentation de la nappe du Gäu et les exportations postulées plus haut.

Le bilan météorique des versants fournit une première estimation de l'infiltration. Les précipitations vraies P^* sont évaluées à $1.1 P \pm 12.5 \%$, l'évapotranspiration E à $0.46P \pm 25 \%$ et le ruissellement R à $0.42P \pm 35 \%$ ($0.32P$ pour les versants et la plaine et $0.16P$ pour la plaine).

Tableau 5 : Bilan du système-cadre (en l/s).

Bassin versant	No	Surface (km ²)	P* (1.1P) (l/s)	E	Q	ΣI	ΣN	ΣN-ΣI	V2	V1	U
			bilan météorique				transferts				
Système	0.0	916	36130	14782	16170	5178	4298	-880	880	-	0
Aar	1.0	173	6910	2829	3300	781	1276	495	450	240	1185
Dünnern	2.0	243	10115	4230	4460	1425	1791	366	200	535	1101
Birse	3.0	324	12380	4850	5460	2070	610	-1460	150	1310	0
Ergolz	4.0	176	6725	2873	2950	902	621	-281	80	261	60

P, Q et E d'après le tableau 1; ΣN et V2 d'après le tableau 3

ΣI comprend toutes les infiltrations (= P* - E - Q)

ΣN comprend tous les exutoires d'eau souterraine à l'intérieur du système

Les hypothèses de transfert (U, V1) sont en *italique fin* et les résultats de ces hypothèses en *italique gras*

On obtient (en l/s) :

$$P*(2900 \pm 360) - E(1213 \pm 300) - R(1107 \pm 390) = I(580 \pm 1050) \quad (4.2)$$

L'infiltration peut être comprise entre 0 et 1630 l/s. Si l'on utilise l'autre expression de l'équation 4 avec Q tiré du tableau 2 ($\pm 25\%$), on obtient, en l/s :

$$P*(2900 \pm 360) - E(1213 \pm 300) - Q(445 \pm 140) = \Sigma I(1112 \pm 800) \quad (4.3)$$

ΣI peut être compris entre 312 et 1912 l/s, et est composé de I, I' et I''. I'' peut être négligé. La comparaison des équations 4.2 et 4.3 indique que I' vaut environ 300 l/s. En introduisant ΣI dans l'équation 6 on obtient, en l/s :

$$\Sigma I(1112 \pm 800) - \Sigma N(183 \pm 20) + U(1101 \pm 220) = V(2030 \pm 1040) \quad (6.1)$$

On a admis ici que tous les apports au bassin de la Dünnern (U) transitent par les versants de la nappe du Gäu, mais il est probable qu'une partie de ces apports alimente les grands cours d'eau en amont de Balsthal (R' estimé à environ 800 l/s). La valeur centrale de V est probablement surestimée. Les exportations V des versants sont à répartir entre l'alimentation de la nappe et l'exportation directe vers le bassin de l'Aar, estimé à environ 300 l/s. Même en prenant la valeur minimale de V (990 l/s), il reste encore 690 l/s pour l'alimentation de la nappe du Gäu.

En conséquence, on considère que la valeur plausible de l'alimentation de la nappe par les versants se situe entre 400 et 700 l/s.

4.5 Bilans affinés pour la nappe du Gäu

Le bilan météorique de la nappe du Gäu et le bilan des eaux de surface de la nappe et de ses versants ont permis de fixer les valeurs optimales pour l'infiltration des précipitations

($I = 445 \pm 0$ l/s) et des cours d'eau ($I' = 500 \pm 0$). Avec $I'' = 15 \pm 10$, le bilan des eaux souterraines de la nappe permet de préciser l'apport par les versants et le substratum (U) :

$$A (1420 \pm 250) - \Sigma I (960 \pm 10) = U (460 \pm 240) \quad (2.2)$$

Cette valeur de U est compatible avec le bilan météorique des versants (4.2) et les transferts souterrains entre régions voisines (6.2). On choisit donc $U = 460$ l/s comme valeur optimale de l'alimentation de la nappe par les versants.

Selon l'équation 1.1, le débit des exutoires doit être augmenté de 30 l/s. On a réparti cette augmentation proportionnellement aux incertitudes, soit 5 l/s sur N'o, 10 sur N'g, 3 sur Vw, 9 sur Vo et 3 sur Vg. Les fourchettes d'erreur respectives ont été réduites d'autant. On obtient (en l/s) :

$$N(415 \pm 20) + N'w(210 \pm 20) + N'o(340 \pm 45) + N'g(285 \pm 75) + Vw(53 \pm 27) + Vo(109 \pm 51) + Vg(8 \pm 2) = Z (1420 \pm 240) \quad (3.2)$$

Pour la somme des alimentations et celle des exutoires, on adoptera la fourchette d'erreur globale de l'équation 3.2 (exutoires), répartie selon les différentes composantes de l'alimentation en fonction des incertitudes respectives. On obtient alors l'estimation finale des composantes de l'alimentation pour un état moyen de la nappe, soit (en l/s) :

$$A(1420 \pm 240) = I(445 \pm 45) + I'(500 \pm 50) + I''(15 \pm 5) + U(460 \pm 140) \quad (2.3)$$

L'infiltration des précipitations (I) représente donc 31 % de l'alimentation de la nappe, l'infiltration des cours d'eau (I') 35 %, la réinfiltration des eaux prélevées à la nappe (I'') 1 % et l'apport par les versants et le substratum (U) 33 %.

4.6 Répartition par secteur des alimentations de la nappe

Le secteur 1 (9.9 km²) est caractérisé par un apport nul sur sa limite orientale (ligne de partage des eaux souterraines), un substratum molassique, peu de cours d'eau, une zone non saturée très épaisse (> 30 m) et assez perméable (dépôts sablo-graveleux, perméabilité généralement supérieure à 10⁻³ m/s), ainsi qu'une couverture boisée étendue (~ 50 %). En conséquence, l'infiltration des précipitations devrait être forte et celle des cours d'eau modeste. L'apport par les versants est d'ampleur inconnue à priori, il provient du flanc nord de la chaîne du Weissenstein.

Le secteur 2 (0.6 km²) occupe la cluse de Balsthal. Il est traversé par la Dünneren et recoupe la première chaîne du Jura. Il possède un grand bassin versant par rapport à sa surface. L'aquifère et son toit sont faiblement perméables. Des régions externes aux versants (notamment celle du Weissenstein) alimentent la nappe par le coeur de la première chaîne.

Le secteur 3 (11.9 km²) est constitué par la plaine au sud d'Oensingen, caractérisée par des sols cultivés, une épaisse zone non saturée (~ 20 m) peu perméable au sommet, un substratum limoneux et molassique, sauf à l'extrémité orientale où il est en partie calcaire.

Le secteur 4 (12.5 km²) est constitué par la plaine centrale du Gäu, entre Kestenholz et Gunzgen. Il est caractérisé par une grande surface de plaine par rapport à celle des versants, une assez grande densité de cours d'eau, et un substratum peu perméable. Son alimentation

sera donc essentiellement due à l'infiltration primaire I en hautes eaux, et à l'infiltration des cours d'eau I' en étiage.

Le secteur 5 (6.2 km²) est constitué par l'étroite plaine de la Dünnerg en aval de Gunzgen, affectée de versants calcaires très étendus en contact direct avec l'aquifère. Les cours d'eau et les versants jouent les rôles dominants pour l'alimentation de la nappe.

Dans un premier temps, les alimentations ont été réparties par secteur de manière proportionnelle à leur surface (pour I), à la longueur des cours d'eau (pour I') et à l'étendue des versants (pour U). Par rapport aux débits de transit souterrain d'un secteur à l'autre (u1 à u5), les alimentations se sont avérées nettement trop fortes dans la cluse et dans la partie centrale de la nappe (secteurs 2, 3 et 4). D'une part les transmissivités des alluvions étaient sous-estimées à la sortie de ces secteurs, d'autre part l'alimentation par les versants y était largement surestimée.

Pour ajuster les bilans, on a effectué :

- des corrections sur les débits de transit, ce qui implique une modification des transmissivités; u3 a passé de 135 à 58 l/s (T résultant $\sim 4.0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$), u4 de 68 à 165 l/s (T $\sim 1.7 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$), et u5 de 86 à 297 l/s (T $\sim 2.4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$). Le facteur de correction des transmissivités vaut 0.43 dans la région de u3, 2.43 dans celle de u4 et 3.45 dans celle de u5.
- des corrections sur les débits d'alimentation. L'apport par les versants (U) a été diminué dans les secteurs 2 (de 63 à 41 l/s), 3 (de 73 à 17 l/s) et 4 (de 115 à 26 l/s), et majoré dans les secteurs 1 (de 73 à 97 l/s) et 5 (de 136 à 279 l/s). L'infiltration des précipitations et des rivières a été modulée d'après l'épaisseur et la nature de la zone non saturée. Ainsi, du secteur 1 au 5, on a attribué à I une valeur de 0.4P, 0.3P, 0.2P, 0.25P, 0.4P (la moyenne pour la nappe est de 0.3P), et à I' de la Dünnerg une valeur de 0 (pas de Dünnerg au secteur 1), 1.07I*, 0.52I*, 0.75I*, et 1.57I*, I* représentant l'infiltration moyenne de 25 l/s.km, soit 350 l/s sur 14 km.

On a ainsi obtenu les bilans sectoriels du tableau 6 pour l'état moyen de la nappe (figure 4).

4.7 Modulation pour les états d'étiage et de hautes eaux

Àfin de préparer les données d'entrée du modèle numérique de simulation des écoulements souterrains, on a modulé les alimentations moyennes pour les états d'étiage et de hautes eaux (tableau 6), en se basant sur la variation des **débits d'exutoire (Z)**. Les fourchettes d'erreur ont été définies proportionnellement à celles de l'état moyen de la nappe :

- en étiage (e), les pompages sont un peu plus importants qu'en moyenne, soit $N_e = 1.1N$, et le débit des exutoires naturels à Walliswil, Olten et Gunzgen est plus faible qu'en moyenne, soit $(N'w + Vw)e = 0.5(N'w + Vw)$, $(N'o + Vo)e = 0.575(N'o + Vo)$, $(N'g + Vg)e = 0.1(N'g + Vg)$. On obtient donc les débits d'exutoire suivants (en l/s) :

$$N_e(456 \pm 22) + (N'w + Vw)e(132 \pm 23) + (N'o + Vo)e(258 \pm 55) + (N'g + Vg)e(30 \pm 8) = Z_e(876 \pm 108) \quad (3.3)$$

- en hautes eaux (h), $Nh = 0.9N$, $(N'w+Vw)h = 1.73(N'w+Vw)$, $(N'o+Vo)h = 1.264(N'o+Vo)$, $(N'g+Vg)h = 2.40(N'g+Vg)$. On obtient donc (en l/s) :

$$Nh(373\pm 18) + (N'w+Vw)h(455\pm 82) + (N'o+Vo)h(568\pm 122) + (N'g+Vg)h(703\pm 185) = Nh(2099\pm 407) \quad (3.4)$$

L'alimentation moyenne (A) vaut 1420 l/s. Comme pour Z, $A_e = 0.6A$ et $A_h = 1.5A$. En période d'étiage, I tend vers 0, U diminue sensiblement et I' et I'' se maintiennent environ au niveau moyen (les tronçons d'infiltration sont plus longs mais les débits des cours d'eau sont plus faibles). Par contre, la répartition sectorielle de l'infiltration des cours d'eau (I') peut varier, comme d'ailleurs celle des exfiltrations (N'g). En période de hautes eaux, I' et I'' devraient se maintenir environ au niveau moyen, et U et I augmenter sensiblement.

Tableau 6 : Bilan des eaux souterraines de la nappe, par secteur (en l/s).

Secteur	Surface (km ²)	I	I'	I''	U	u(i)	A=Z	u(i+1)	N	N'	V
Etat moyen (1.10.1980)											
1	9.9	152	17	2	97	0	268	0	5	210	53
2	0.6	7	40	0	41	0	88	58	30	0	0
3	11.9	84	72	4	17	58	235	165	70	0	0
4	12.5	111	180	3	26	165	485	297	30	150	8
5	6.2	91	191	6	279	297	864	-	280	475	109
2-5	31.2	293	483	13	363	-	1152	-	410	625	117
1-5	41.1	445	500	15	460	-	1420	-	415	835	170
1-5 (%)	-	31	35	1	33	-	100	-	29	59	12
Etiage (31.11.1976)											
1	9.9	15	9	2	113	0	139	0	7	105	27
2	0.6	1	40	0	35	0	76	43	33	0	0
3	11.9	8	60	3	15	43	129	52	77	0	0
4	12.5	11	145	2	23	52	233	200	33	0	0
5	6.2	9	176	5	204	200	594	-	306	225	63
2-5	31.2	29	421	10	227	-	737	-	449	225	63
1-5	41.1	44	430	12	390	-	876	-	456	330	90
1-5 (%)	-	5	49	1	45	-	100	-	52	38	10
Hautes eaux (8.4.1980)											
1	9.9	350	25	2	83	0	460	0	5	363	92
2	0.6	16	40	0	60	0	116	89	27	0	0
3	11.9	100	85	5	25	89	304	241	63	0	0
4	12.5	183	215	4	40	241	683	360	27	277	19
5	6.2	180	205	7	474	360	1226	-	251	837	138
2-5	31.2	479	545	16	599	-	1639	-	368	1114	157
1-5	41.1	829	570	18	682	-	2099	-	373	1477	249
1-5 (%)	-	39	27	1	33	-	100	-	18	70	12

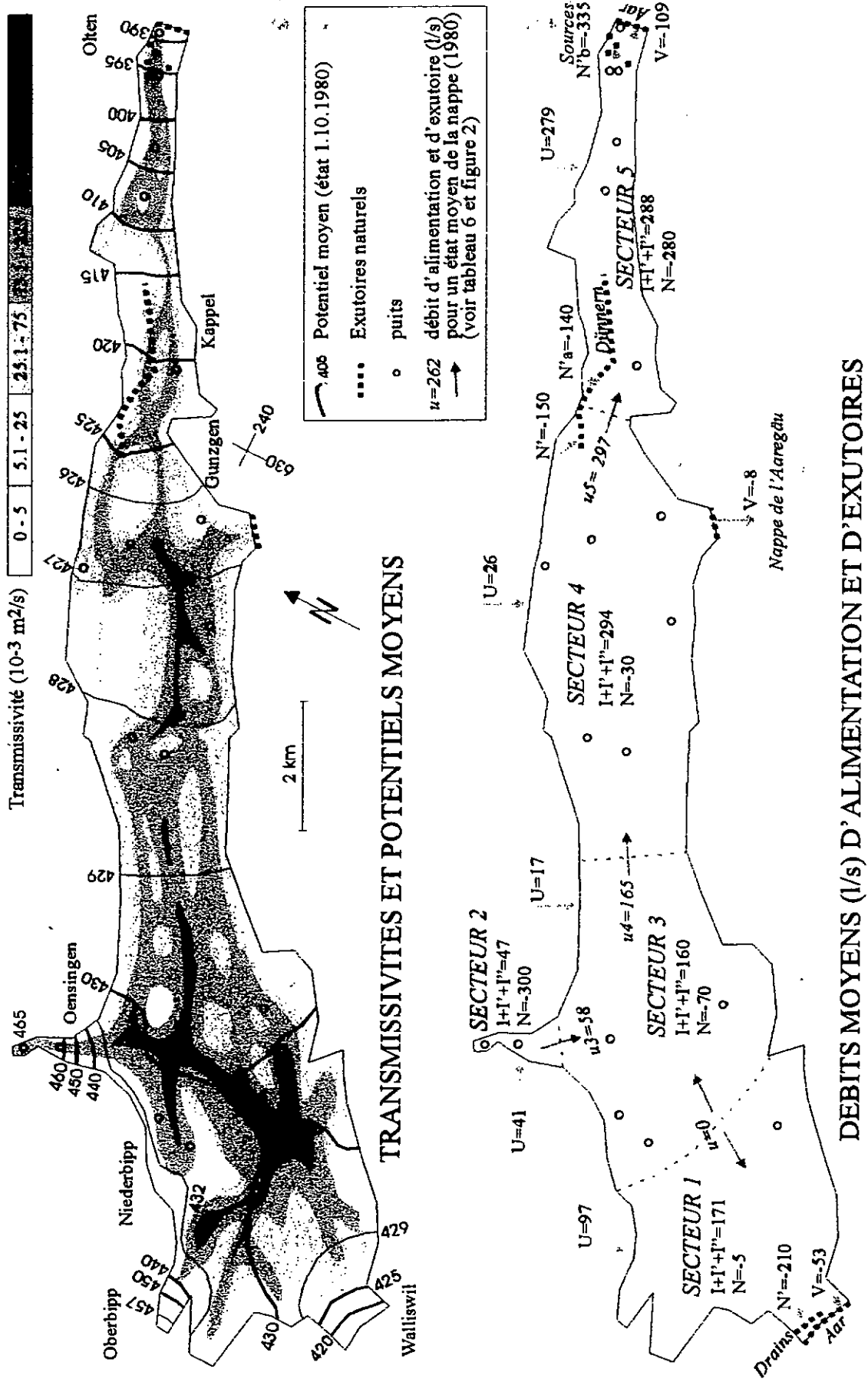


Figure 4 : Transmissivités, potentiels et débits moyens de la nappe par secteur .

La répartition des alimentations par secteur est essentiellement fonction du rôle respectif de I et I' d'une part, de I et U d'autre part. En amont de Gunzgen, I joue un rôle majeur en hautes eaux, et I' en étiage. En aval de Gunzgen, U joue un rôle majeur en hautes eaux, et I' en étiage. On a donc modulé l'alimentation comme suit :

- le **bilan d'étiage** a été défini avec $I_e = 0.1 I$, conformément au rapport des pluies efficaces. I' a été réduit de moitié sauf pour la Dünner, dont les tronçons d'infiltration sont nettement plus longs en étiage. U et u ont été choisis de manière à équilibrer le bilan.

Dans le secteur 1, U_e est anormalement plus grand que U. L'ajustement du modèle (PASQUIER 2000, article suivant dans ce numéro) montrera qu'il faut en déplacer une partie dans le secteur 3, vers l'est. Dans les secteurs 2, 3 et 4, U a été maintenu en dessous de sa valeur moyenne, ce qui a pour conséquence de minimiser u_3 , u_4 et u_5 . Les perméabilités sont donc probablement plus fortes dans la partie supérieure de l'aquifère. Globalement, on obtient $I_e = 0.1 I$, $I'_e = 0.86 I'$, $U_e = 0.85 U$.

L'alimentation de la nappe se répartit alors comme suit (fourchettes d'erreur proportionnelles à celles de l'état moyen) :

$$A_e(876 \pm 170) = I_e(44 \pm 4) + I'_e(430 \pm 43) + I''_e(12 \pm 4) + U_e(390 \pm 119) \quad (2.4)$$

- le **bilan de hautes eaux** a été modulé suivant les principes inverses du bilan d'étiage. I a été augmenté, selon les secteurs, d'autant plus fortement que I moyen représente une plus grande part des précipitations, soit, des secteurs 1 à 5, d'un facteur 2.3, 2.3, 1.2, 1.65 et 2.3, soit en moyenne 1.86. I' a été modulé de manière inverse à la situation d'étiage ($I'h = 1.14 I'$), et U également ($U_h = 1.48U$). Les débits de transit (u) sont un peu plus faibles que prévu d'après la situation moyenne, sauf pour u_4 . Les alimentations se répartissent comme suit (fourchettes d'erreur proportionnelles à celles de l'état moyen) :

$$A_h(2099 \pm 354) = I_h(289 \pm 84) + I'_h(570 \pm 57) + I''_h(18 \pm 6) + U_h(682 \pm 207) \quad (2.5)$$

On remarquera qu'on obtient un même ordre de grandeur des erreurs calculées pour A_e et Z_e d'une part (± 170 et ± 108), A_h et Z_h d'autre part (± 354 et ± 407).

5. Conclusions

Le travail sur les bilans a permis d'ajuster les paramètres d'alimentation de la nappe alluviale du Gäu avec une certaine sécurité, car il nécessite la cohérence entre les termes des écoulements météoriques, de surface et souterrains. Cette cohérence a été recherchée non seulement pour la surface de la nappe et son bassin-versant, mais aussi, au moins pour les ordres de grandeur, pour les bassins voisins jusqu'aux grands exutoires régionaux (Aar, Birse, Ergolz, tunnels de base du Hauenstein et de Granges).

Les résultats ont révélé des transferts probables d'eau souterraine des régions internes du Jura (aires de recharge : Birse, Ergolz) vers les régions bordières (aires d'exutoire : Dünner, Aar) où se situe la nappe. En moyenne, l'alimentation de la nappe est fournie pour 31 % par l'infiltration des précipitations, pour 36 % par l'infiltration des cours d'eau, et

pour 33 % par les apports souterrains à partir des versants et du substratum. Ces proportions varient localement.

La nappe alluviale du Gäu a été subdivisée en secteurs pour l'étude des variations locales des termes de l'alimentation. Ce travail sur les bilans sectoriels de la nappe nous a amenés à admettre :

- une augmentation des transmissivités dans la plaine (~facteur 3) et une diminution dans la cluse (~ facteur 2);
- un écoulement longitudinal des eaux souterraines dans la première chaîne du Jura, d'Oensingen vers la zone de Kappel-Wangen, et du Weissenstein vers la région d'Oberbipp;
- une nette influence de la nature lithologique et de l'épaisseur de la zone non saturée sur les infiltrations, qui doivent être modulées régionalement (de 0.5 à 1.6 fois la valeur moyenne).

Enfin, le bilan des alimentations et des exutoires pour l'état moyen de la nappe a été modulé pour les états d'étiage et de hautes eaux. Dans la partie centrale de la nappe, l'alimentation est fournie en majorité par l'infiltration des précipitations (I) en hautes eaux, et par celle des cours d'eau (I') en étiage. Dans la partie aval de la nappe, l'apport par les versants (U) et l'infiltration des cours d'eau (I') jouent un rôle majeur pour tout état hydrologique, mais le premier est prépondérant en hautes eaux et la seconde en étiage.

Les bilans du tableau 6 ne sont sans doute pas exacts, mais ils sont suffisamment détaillés pour permettre un bon calibrage du modèle de simulation numérique de la nappe alluviale du Gäu.

Remerciements

Je tiens à remercier le Prof. P. Perrochet et le Dr. M. Bouzelboudjen du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel pour leurs critiques constructives lors de la relecture de cet article. Celui-ci résume une partie importante de ma thèse de doctorat déposée en 1986, et à ce titre je remercie chaleureusement pour leur soutien et leurs conseils Messieurs A. Burger (directeur de thèse), H. Schmassmann, L. Kiraly, F. Zwahlen (membres du jury) et I. Müller. Les données et résultats présentés dans cet article ont été obtenus grâce à la collaboration de nombreux bureaux privés et institutions publiques, principalement l'Office de l'Economie Hydraulique et Energétique du canton de Berne, le "Kantonales Amt für Wasserwirtschaft" du canton de Soleure et la Ville d'Olten.

Références

AWS, Amt für Wasserwirtschaft Solothurn dès 1979. Hydrographisches Jahrbuch des Kantons Solothurn.

BALDINGER F. & SCHMASSMANN H. 1955. Gutachten über den Einfluss einer Kies- und Sandgewinnung bei der Mühle in Rickenbach (Kanton Solothurn) auf die Grundwassernutzung im Dünnerthal. Expertenbericht an das schweizerische Bundesgericht, non publié.

- BURGER A. 1983. Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. *Gaz-Eaux-Eaux usées*, 9 : 533-583.
- CHOW VEN TE 1964. *Handbook of applied Hydrology*, Mc Graw-Hill.
- COLLIS-GEORGE N. 1977. Infiltration equations for simple soil systems. *Water Res. Research* 13, 2 : 395-403.
- CSD COLOMBI-SCHMUTZ-DORTHE AG 1975. Trinkwasserversorgung KKW-Graben, Hydrogeologischer Bericht über den Pumpversuch. Bericht z.H. Bernische Kraftwerke AG vom 20.12.1975, non publié.
- CSD COLOMBI-SCHMUTZ-DORTHE AG 1980. Rekultivierungskonzept Kiesgruben Aaregäu, Hydrogeologisches Gutachten. Bericht BE 1261 vom 29.7.1980 an das Kant. Amt für Wasserwirtschaft, Solothurn, non publié.
- EAWAG 1957. Bericht über die Grundwasseruntersuchungen im Gheid. Bericht No 1725 an der Wasserversorgung, Olten, non publié.
- FROELICHER H. 1963. Erweiterung der Wasserversorgung Hägendorf; Sondierungen und Pumpversuch in Kappel 1963. Kant. Amt für Wasserwirtschaft, Solothurn, non publié.
- FROELICHER H. 1966. Das Grundwasservorkommen im Dünnerngäu und die Möglichkeiten seiner Nutzung. Kant. Amt für Wasserwirtschaft, Solothurn, non publié.
- LAFFORGUE A. 1978. Détermination des variations de la capacité d'absorption d'un sol en place sans averses simulées. *Bull. des Sciences Hydrologiques*, 23, 3, 9.
- LUESCHER P. 1975. Beiträge zur Hydrographie, Hydrometeorologie und Hydrologie des Dünnerntals (Solothurner Jura). Diss. Univ. Bern.
- MATOUSEK F. 1985. Hydrogeologie der Vorderen Frenke. Diss. ETH Zurich.
- MOTOR COLUMBUS Ingenieurunternehmung AG 1981. Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern, Hydrogeologie Laufental (Schlussbericht). Bern (WEA).
- PASQUIER F. 1980. Ajustement par modèle mathématique d'un système hydrogéologique dans le Jura. Rapport inédit, déposé au Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, non publié.
- PASQUIER F. 1982a. Fluctuations chimiques et alimentation de la nappe alluviale du Gäu soleurois. *Bull. du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel*, 4 : 103-144.
- PASQUIER F. 1982b. Inventaire des sources les plus importantes du Jura nord-ouest (entre Granges, Olten, Liestal et Delémont). *Bull. du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel*, 4 : 259-270.
- PASQUIER F. 1986. Hydrodynamique de la nappe du Gäu (cantons de Soleure et Berne). Thèse de doctorat, Univ. Neuchâtel.
- PASQUIER F. 1987. Indices de l'alimentation de la nappe alluviale du Gäu (SO/BE) par le karst. *Bull. du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel*, 7 : 327-334.
- PASQUIER F. 2000. Calibrage d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines (nappe alluviale du Gäu, cantons de Berne et Soleure, Suisse). *Bull. d'Hydrogéologie*, ce volume.
- PRIMAULT B. 1981. Extension de la validité de la formule suisse de calcul de l'évapotranspiration. *Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie*, 103.

- SCHUEPP M., BOUET M., BIDER M. & URFER C. 1978. *Klimatologie der Schweiz, Band II : Regionale Klimabeschreibungen, 1. Teil : Gesamtübersicht, Westschweiz, Wallis, Jura und Juranordfuss sowie Mittelland.* Schweiz. Meteor. Zentralanstalt, Zurich.
- SEVRUK B. 1982. Regionalization of the systematic error in Swiss summer precipitation measurements for hydrological purposes. Proc. Symp. Hydrolog. Basins, Sondertr. Landeshydrologie, Bern, 1982.
- SHGN, Service hydrologique et géologique national. *Annuaire hydrologique de la Suisse.* Dép. féd. de l'Intérieur.
- SIEBER-CASSINA-MOSER 1981. Infiltrationsverhältnisse im Dünnem-Abschnitt Rickenbach Wangen. Bericht SO 104 an die Bürgergemeinde Wangen bei Olten, non publié.
- STAEDTISCHE WERKE OLTEN. Messdaten des Grundwassers im Gheid, Daten ab 1950.
- STUDIENGRUPPE "VERDUNSTUNG" DER SNG 1978. Die Verdunstung in der Schweiz, Beitr. zur Geol. der Schweiz, Hydrologie, 25.
- TROEHLER B. 1976. Zur Grösse der Grundwasserneubildung durch Niederschläge in Talebenen des schweizerischen Mittellandes. *Gas Wasser Abwasser*, 56. Jg., No 7.
- TURC L. 1954. Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Troisième journée d'hydrogéologie, Alger* : 36-43.
- UTTINGER H. 1965. Niederschlagskarte 1:500000. Beiheft Ann. schweiz. meteorol. Zentralanstalt (Jg 1964), Zürich.
- WERNER-STUDIENBÜRO 1981. *Hydrographische Jahrestabellen 1976-1980.* Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern, non publié.
- WERNER + PARTNER AG & KELLERHALS + HAEFELI AG 1984/97. *Hydrogeologie Bipperamt, Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern.* Schlussbericht, Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern, non publié.

Calibrage d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines de la nappe alluviale du Gäu (cantons de Berne et Soleure, Suisse)

*par François Pasquier **

RESUME

Les étapes du calibrage d'un modèle bidimensionnel à éléments finis en régime permanent de la nappe alluviale du Gäu, entre Walliswil et Olten (cantons de Berne et Soleure, Suisse), sont décrites pour les états d'étiage et de hautes eaux. Le calibrage se fonde sur l'étude de la structure et des caractéristiques de l'aquifère et sur la définition du champ des alimentations au moyen de bilans hydrologiques détaillés. En particulier, il se base sur le respect des débits aux exutoires et des débits de transit d'un secteur à l'autre de la nappe étudiés au préalable. Les résultats montrent que la répartition des alimentations joue un rôle prédominant, par rapport à celle des transmissivités, pour la restitution correcte, au niveau régional et local, des potentiels et des débits de cette nappe complexe (un exutoire majeur à chaque extrémité de la nappe, importants débits d'exfiltration en hautes eaux). La simulation de deux états contrastés de la nappe permet d'approcher en partie la répartition verticale des caractéristiques de l'aquifère et le comportement saisonnier des alimentations.

MOTS-CLES

Modèle numérique, pied du Jura, alluvions, bilan des eaux souterraines, régime permanent, étiage, hautes eaux

ABSTRACT

The calibration phases of a 2-D finite element model for permanent flow of the Gäu alluvial aquifer between Walliswil and Olten (cantons of Berne and Solothurn, Switzerland) are described for low and high water periods. The calibration is based on the structure and characteristics of the aquifer as well as on the recharge field defined by detailed hydrologic balances. The reproduction of the flow rates at the different discharge points and from one aquifer section to the other is a main criterion for calibration. The results show that the recharge distribution, at regional as well as at local scale, is a more sensitive input than transmissivity distribution for the correct restitution of the potential and flow fields of this complex aquifer (one main discharge area at each end of the aquifer, important discharge in the river during high water periods). The simulation of two contrasted hydrologic conditions allows to approach the vertical distribution of the aquifer characteristics and the seasonal behaviour of the recharge components.

* Hydrogéologue-conseil, St-Gervais 31, CH-2108 Couvet

KEYWORDS

Numerical model, Jura, alluvial deposits, groundwater balance, permanent state, low water, high water

1. Introduction

Le calibrage d'un modèle numérique bidimensionnel d'écoulement des eaux souterraines de la nappe alluviale du Gäu a été réalisé en régime permanent pour deux états hydrologiques différents, en étiage et en hautes eaux. Le présent article résume cette partie de la thèse de l'auteur (PASQUIER 1986), qui a bénéficié des connaissances antérieures sur la nappe du Gäu (EAWAG 1957, FROELICHER 1966, WERNER 1979). Des articles précédents (PASQUIER 1982, 1987), basés sur les caractéristiques chimiques de l'eau souterraine et les fluctuations piézométriques, ont mis en lumière le rôle joué par les versants et le substratum calcaires dans l'alimentation de la nappe. Un premier article de ce volume (PASQUIER 2000), traite de l'élaboration des bilans hydrologiques permettant de définir le champ des alimentations de la nappe pour des états moyen, d'étiage et de hautes eaux utilisés dans le calibrage du modèle.

2. Méthodologie

Nous avons simulé la nappe du Gäu par un modèle numérique à éléments finis bidimensionnel plan (FEM 200, KIRALY 1978), en régime permanent et pour deux états hydrologiques différents, en étiage et en hautes eaux. Une simplification supplémentaire a consisté à considérer que la transmissivité est isotrope.

L'équation générale qui décrit les écoulements laminaires dans une nappe bidimensionnelle en régime permanent est :

$$\text{div} (T \text{ grad } \Phi) + q = 0 \quad (1)$$

où

$T = K \cdot D$ = transmissivité (m^2/s)

K = perméabilité (m/s)

D = épaisseur de l'aquifère, zone saturée (m)

Φ = potentiel hydraulique correspondant au niveau H (m) d'une nappe libre bidimensionnelle

q = densité de source ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$), alimentation (q positif) ou prélèvement (q négatif)

div , grad = opérateur différentiel

La région d'écoulement est subdivisée en éléments quadratiques caractérisés par une géométrie (figure 1), une transmissivité et une alimentation distribuée.

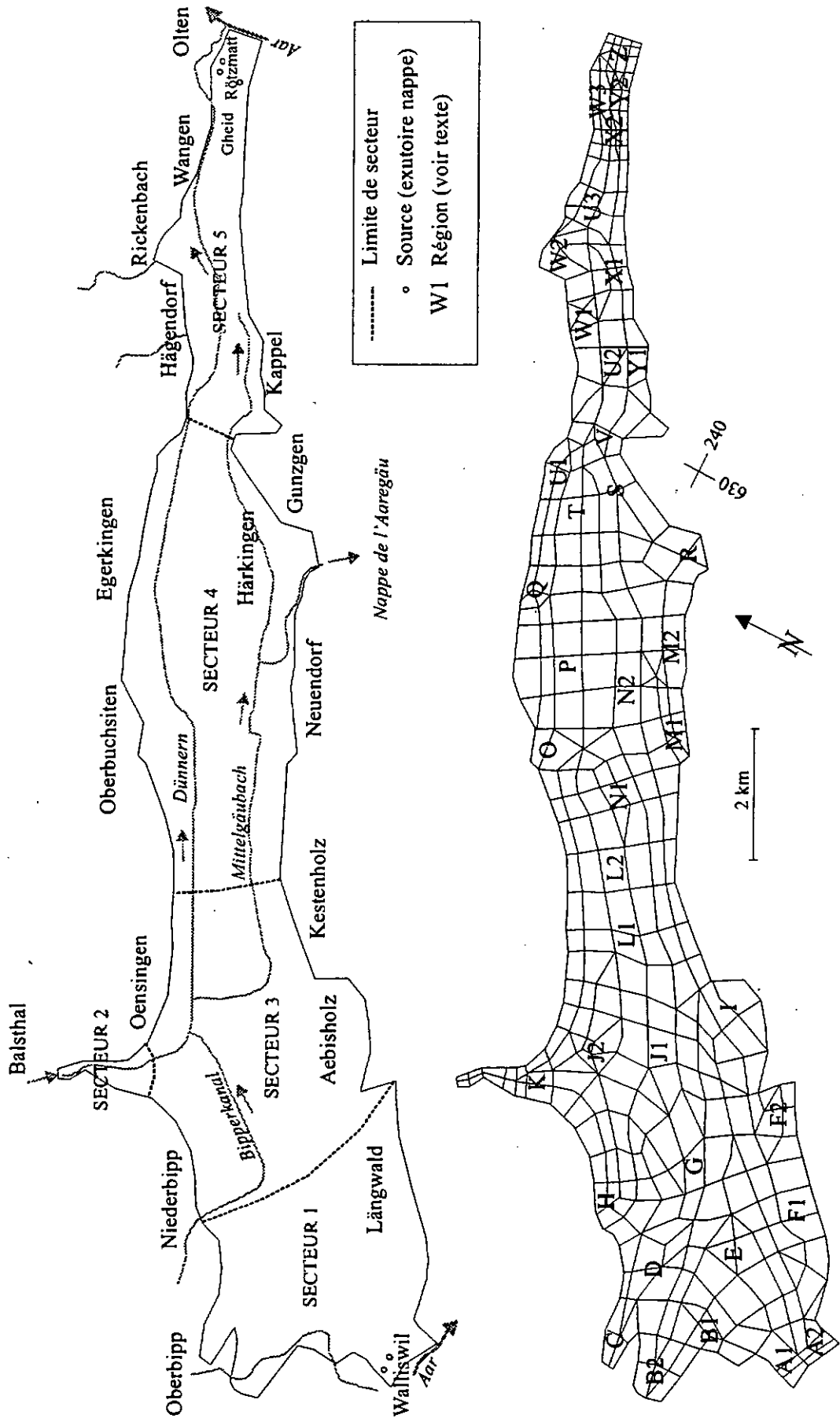


Figure 1 : Situation de la nappe alluviale du Gäu et réseau d'éléments finis du modèle.

Des débits ou des potentiels sont imposés aux limites et à certains nœuds à l'intérieur du modèle (pompages, contact avec la rivière). Le modèle calcule le débit Q aux nœuds où le potentiel H est imposé (nœuds à niveau constant, en général aux exutoires de la nappe), et il calcule le potentiel aux nœuds où le débit est imposé (nœuds à débit constant, positif en cas d'injection, négatif en cas de soutirage, et nul par défaut sur la très grande majorité des nœuds du modèle).

En bordure du modèle, nous avons introduit des éléments unidimensionnels pour faciliter l'imposition de l'alimentation distribuée provenant des versants du Gäu. La limite du modèle le long de l'Aar (régions A et Z de la figure 1) ne contient pas d'élément unidimensionnel.

Enfin, l'infiltration des cours d'eau (principalement la Dünner) a été simulée par une alimentation distribuée sur la surface et non sur la longueur, car la zone non saturée est généralement très épaisse (10 à 30 m), souvent limoneuse près de la surface, et ainsi génératrice de dispersion des infiltrations.

3. Caractéristiques de l'aquifère

Les caractéristiques physiques de l'aquifère ont été étudiées à partir des profils de forage, de pompages d'essai et de mesures géophysiques (méthode radio-magnétotellurique RMT, TURBERG & MUELLER 1997). La variabilité latérale et verticale de la perméabilité est illustrée par des profils hydrogéologiques, dans les parties centrale et aval de l'aquifère (figure 2). Sur de tels profils, la transmissivité a été subdivisée selon la lithologie en cinq classes alluviales possédant chacune une perméabilité typique. On peut donc y déduire directement la transmissivité de n'importe quel endroit. Neufs profils calibrés par des valeurs de perméabilité (profil BB' de la figure 2), ainsi que 34 profils qualitatifs tirés de la géophysique (profil AA' de la figure 2), ont été utilisés pour établir la carte des transmissivités de l'aquifère (figure 4).

En moyenne, les niveaux très perméables (graviers sableux et graviers propres, $K > 10^{-2}$ m/s) occupent 20 à 25 % de l'épaisseur de l'aquifère et représentent environ 90 % de la transmissivité. Ces niveaux sont plus fréquents dans la partie supérieure de l'aquifère, ce qui lui confère en hautes eaux une transmissivité par endroits très grande. La perméabilité moyenne est assez semblable dans le domaine des moraines remaniées (partie occidentale de la nappe, secteur 1) et dans celui des alluvions purement fluviales. Elle est plus faible dans les régions influencées par les cônes de déjection jurassiens (C, H, K, O, Q, W sur la figure 1) et dans celles à dominante morainique (B, F). Les plus grandes épaisseurs de gravier (régions D, E, G, J) se situent pourtant juste en aval du front de la moraine terminale wurmienne, dans la zone de partage des eaux souterraines. A l'est de Gunzgen (secteur 5), la part des limons diminue et celle des sables graveleux augmente.

Le substratum de l'aquifère est constitué essentiellement de calcaires en aval de Gunzgen, de molasse entre Walliswil et Niederbipp, et de limons recouvrant la molasse entre Oensingen et Gunzgen. En dehors de la partie orientale, les calcaires sont encore, par endroits, en contact avec les graviers de l'aquifère entre Oensingen et Kestenholz (d'après la géophysique).

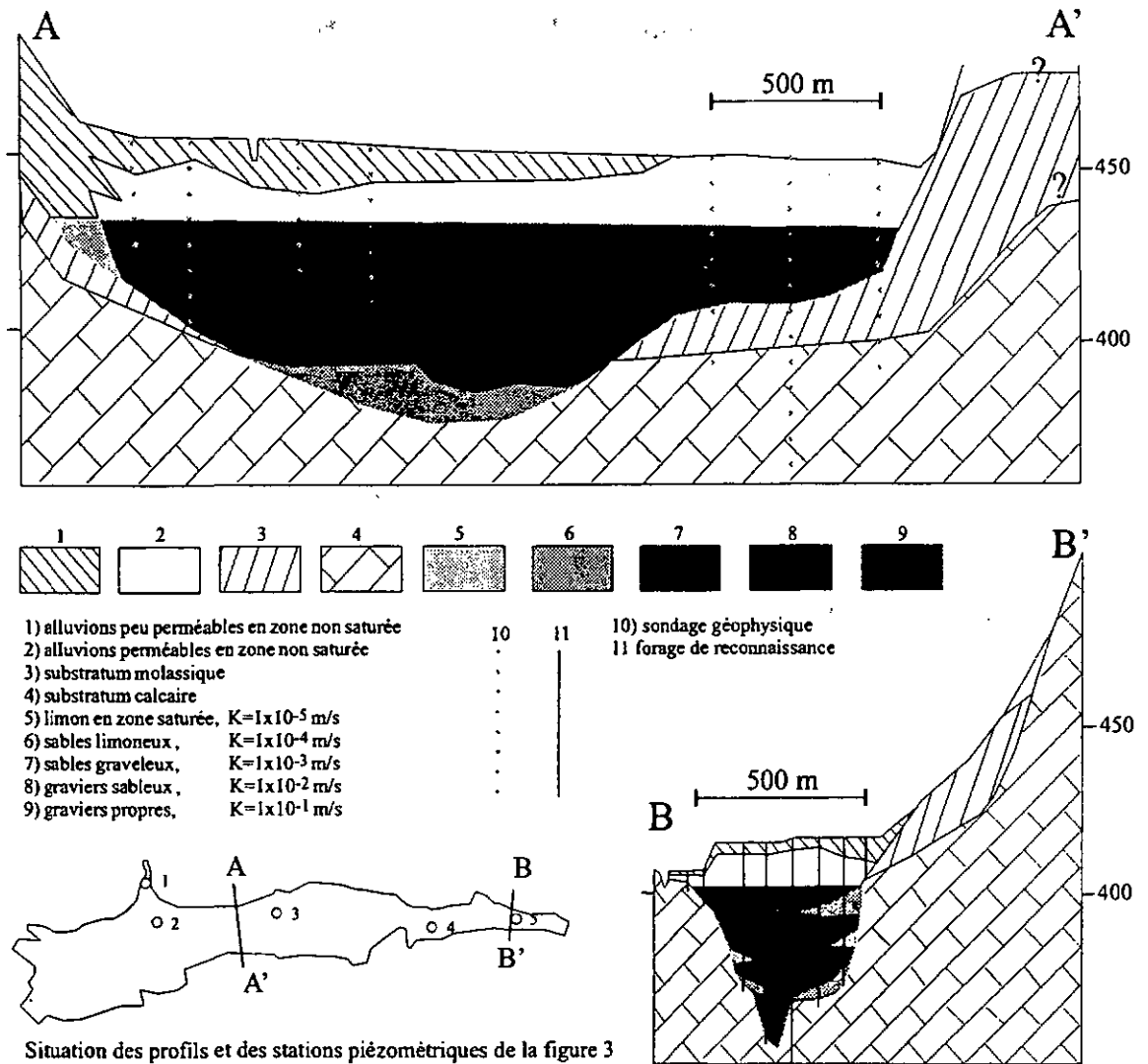


Figure 2 : Profils hydrogéologiques de la nappe alluviale du Gäu.

4. Caractéristiques hydrauliques de la nappe

Les fluctuations piézométriques de quelques puits situés d'amont en aval de la nappe sont présentées sur la figure 3. Ces fluctuations permettent de distinguer les zones où l'alimentation de la nappe est rapide et irrégulière (apports par le substratum karstique et la Dünnerm) et les zones où l'alimentation est plus régulière et retardée.

L'inertie des ondes de recharge est inversement proportionnelle au taux de contact entre les graviers de l'aquifère et les calcaires du substratum ou la Dünnerm. Elle croît de la région centrale de l'aquifère vers la région plus amont d'Oensingen et atteint son maximum dans la région SW, au Längwald, où la zone non saturée est très épaisse et recouverte de moraine.

Le champ des potentiels en étiage et en hautes eaux (figure 6) montre deux systèmes d'écoulement. L'un occupe la partie SW de l'aquifère et s'écoule vers l'Aar d'Oberbipp à Walliswil, avec un gradient de 0.25 ‰ dans la zone amont et d'environ 10 ‰ dans la zone aval. L'autre, le système d'écoulement principal, s'écoule vers l'Aar d'Oensingen à Olten, avec un gradient de 0.25 ‰ dans la région d'Oensingen, et d'environ 5 et 6 ‰ dans les régions centrale et aval. Entre deux, dans la région de Niederbipp, se trouve la zone de partage des eaux souterraines. Selon l'état hydrologique, la ligne de partage se déplace d'environ 500 m vers le NE (étiage) ou vers le SW (hautes eaux). En hautes eaux, deux exutoires temporaires s'ajoutent aux exutoires permanents. La nappe est d'une part drainée par la Dünnern entre Gunzgen et Kappel, d'autre part elle se déverse dans la nappe de l'Aaregäu au seuil de Gunzgen.

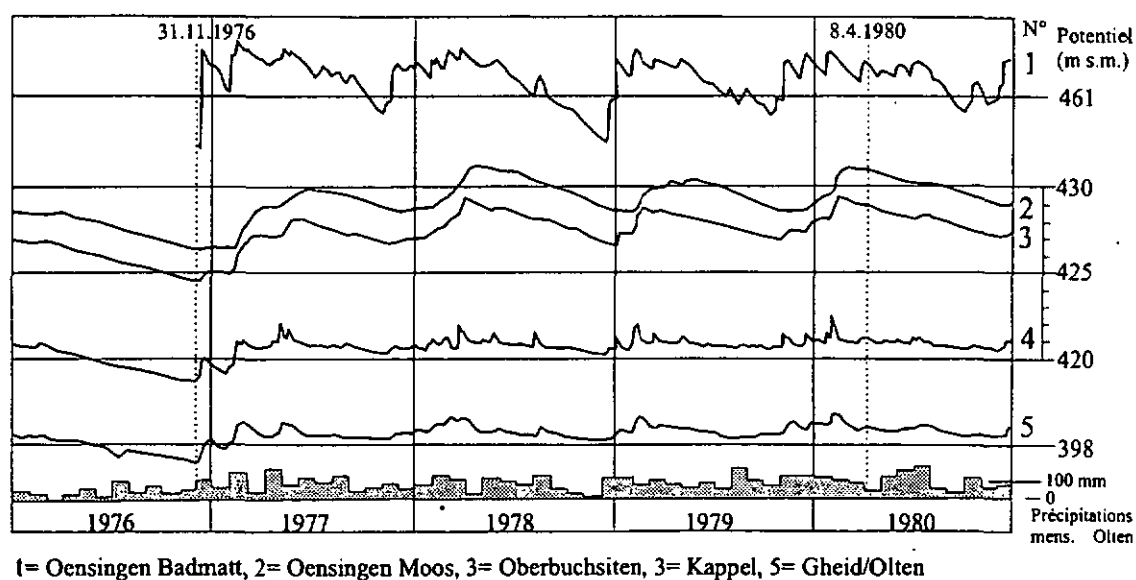


Figure 3 : Fluctuations piézométriques de la nappe du Gäu.

Le champ des alimentations (figure 5) a été décrit dans un précédent article de ce volume (PASQUIER 2000). En moyenne, l'alimentation de la nappe est fournie pour 31 % par l'infiltration des précipitations, 36 % par celle des cours d'eau, et 33 % par les apports souterrains à partir des versants et du substratum. Ces proportions varient localement. Le tableau 1 fournit pour un état moyen de la nappe les valeurs d'alimentation par secteur et par type. Le débit moyen à l'exutoire de Walliswil vaut environ 260 l/s. Le débit des exutoires d'Olten vaut en moyenne environ 435 l/s, et celui des soutirages par pompage 410 l/s, en grande partie dans le secteur 5. Les débits de transit dans la nappe sont assez faibles, environ 60 l/s à la sortie de la cluse de Balsthal, 165 l/s à Kestenholz et 300 l/s à Gunzgen. L'alimentation le long de la nappe fournit le complément des débits de soutirage et d'exutoire. Elle croît constamment vers l'aval, où le contact entre les calcaires du Malm et les graviers de l'aquifère se généralise.

5. Choix des situations simulées

Nous avons choisi comme situation d'étiage celle du 30 novembre 1976, survenant à la suite de près de deux ans sans recharge importante. Le niveau de la nappe se trouvait alors environ 0.45 m plus haut que lors de l'étiage le plus prononcé de la décennie, en automne 1972 (AWS 1982). Pour l'ensemble de la nappe, la situation d'étiage ne correspond pas vraiment à un régime permanent, mais à un régime où les alimentations ont eu le temps de se stabiliser à un très faible niveau.

Le choix de la situation en hautes eaux était plus délicat, car les recharges de la nappe ont un caractère éminemment transitoire, et les niveaux maxima ne sont pas synchrones d'un endroit à l'autre de la nappe (voir figure 3). Nous avons choisi la situation du 8 avril 1980, qui fait suite à une période de recharge soutenue pendant cinq mois (dès novembre 1979), à la suite de trois années humides (1977 à 1979). A cette date, les niveaux de crue dans la partie occidentale de la nappe sont atteints depuis 15 jours à près de deux mois suivant les endroits, et la décrue s'amorce à peine. Dans la partie orientale, une recharge secondaire permet à la nappe d'atteindre une sorte de "niveau moyen de hautes eaux". Au printemps 1980, la nappe s'est élevée jusqu'à 0.25 m au-dessous du niveau maximal de la décennie (printemps 1970; AWS 1982). La situation de hautes eaux choisie correspond assez bien, pour l'ensemble de la nappe, à un régime pseudo-permanent, même si localement l'état hydraulique est moins stable qu'en étiage.

L'amplitude des variations de niveau entre les situations d'étiage et de hautes eaux choisies atteint 4.75 m dans les parties centrale et amont de la nappe. Cela représente 84 % de l'amplitude maximale de la décennie relevée au puits d'Oberbuchsiten (5.63 m entre la crue de 1970 et l'étiage de 1972). Nous espérons ainsi saisir dans ses grandes lignes la phénoménologie des alimentations de la nappe, malgré l'absence d'un traitement en régime transitoire.

Les exutoires permanents sont subdivisés en plusieurs émergences, qui permettent un calibrage local plus serré.

- A Olten, la nappe se déverse d'une part dans les alluvions sous l'Aar, d'autre part dans la Dünneru. Elle est aussi captée par les systèmes de drainage de Rötzmatt.
- A Walliswil, un réseau de drainage collecte d'une part les exfiltrations de la nappe du Gäu, d'autre part celles des alluvions du thalweg de l'Aar, situé plus bas que la rivière. Du côté oriental, la nappe se déverse directement dans l'Aar.

En hautes eaux, les potentiels sont fixés dans quatre zones d'exutoire, deux aux extrémités et deux dans des régions plus ou moins centrales de la nappe, au seuil de Gunzgen et le long de la Dünneru entre Gunzgen et Kappel.

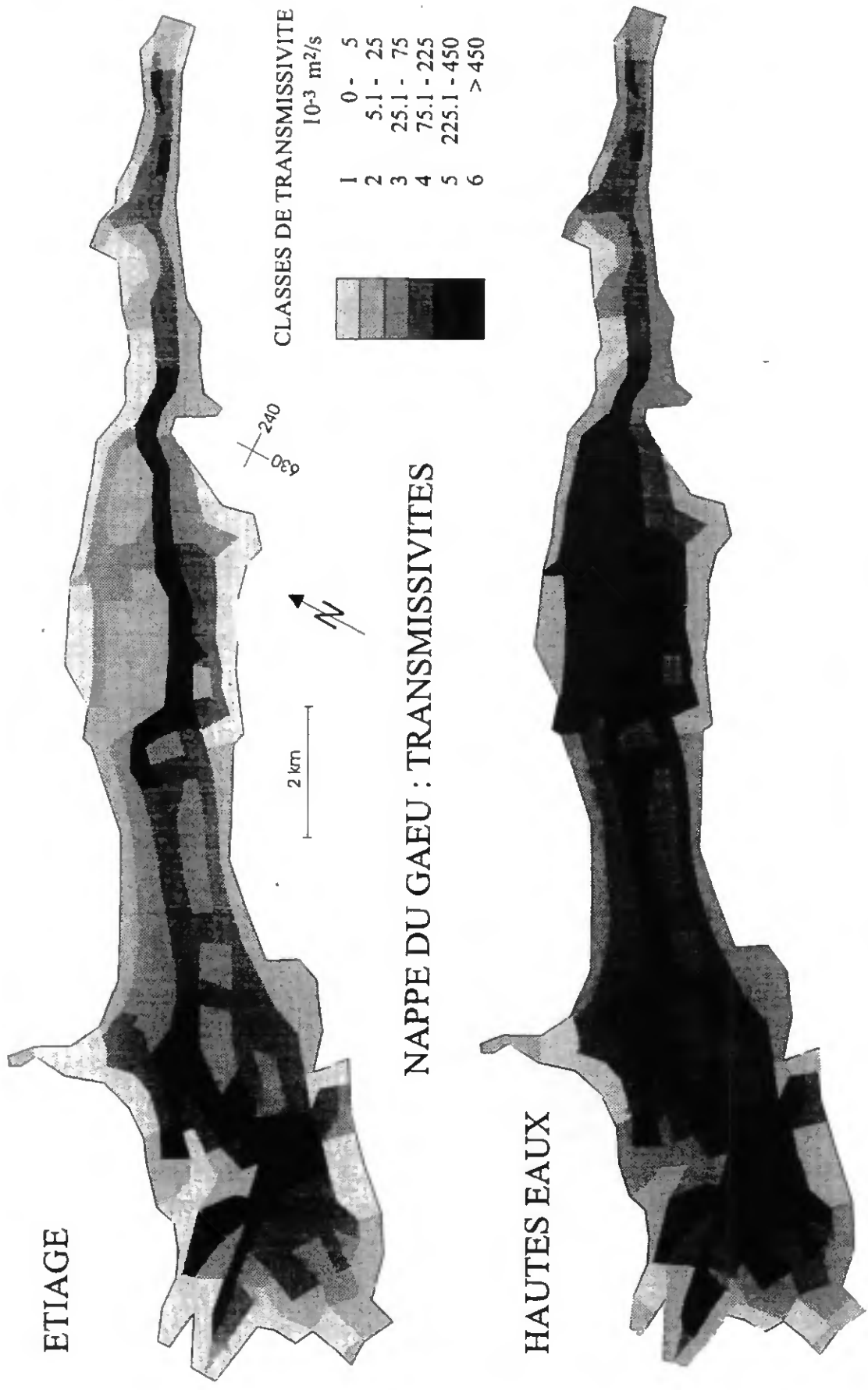


Figure 4 : Transmissivités calibrées de la nappe du Gâu en étiage et en hautes eaux.

6. Calibrage du modèle

Pour simuler la nappe du Gäu en régime permanent, nous avons tenté de définir aussi précisément que possible les débits d'alimentation et les débits d'exutoire au moyen de bilans en situation d'étiage et de hautes eaux (PASQUIER 2000). De plus, nous avons subdivisé la nappe en cinq secteurs (figure 1), chacun avec ses caractéristiques d'alimentation, et défini le débit de transit d'un secteur à l'autre.

Comme les transmissivités sont moins bien connues que les débits aux exutoires, le calibrage du modèle numérique s'est fait en modifiant essentiellement le champ des transmissivités et accessoirement celui des alimentations, de manière à ajuster le champ des potentiels simulés à celui des potentiels observés, et à retrouver le débit estimé aux exutoires.

Le tableau 1 décrit le bilan des alimentations et des exutoires des cinq secteurs de la nappe, en étiage et en hautes eaux. Les débits de contrôle aux différents exutoires et à l'entrée de chaque secteur sont considérés comme des critères aussi contraignants que les potentiels de contrôle. Le calibrage s'est effectué en plusieurs étapes, chacune avec un objectif principal. Les modifications de transmissivité sont résumées schématiquement dans le tableau 2, avec le rapport des transmissivités en étiage et en hautes eaux, et la perméabilité de la couche supérieure résultante. Les résultats du calibrage sont exprimés par le champ des transmissivités (figure 4), celui des alimentations (figure 5), ainsi que par le champ des potentiels résultants (figure 6) et les débits aux exutoires (tableau 3).

6.1 Calibrage de l'état d'étiage (30 novembre 1976)

La première étape a consisté à ajuster le **gradient axial** et la **concavité des équipotentielles** d'étiage sur les chenaux perméables. Ces éléments ne peuvent être restitués que si l'alimentation de la nappe en étiage est répartie sur l'ensemble de la nappe et ne provient pas essentiellement de la cluse de Balsthal. Cela justifie la réduction du débit de transit à la sortie de la cluse opérée sur la base des bilans sectoriels de la nappe (PASQUIER 2000).

La deuxième étape a consisté à ajuster approximativement les **débits de transit** à l'entrée des secteurs 3, 4 et 5. Pour ce faire, il a fallu opérer des transferts d'alimentation du centre de la nappe vers ses extrémités (des secteurs 3 et 4 vers les secteurs 1 et 5), ce qui a conduit à une réduction de moitié environ des transmissivités admises initialement dans la partie centrale de la nappe. Dans la zone de partage des eaux souterraines, la transmissivité du sillon perméable méridional (région G-I) a dû être réduite également, pour ajuster les directions d'écoulement. La transmissivité de ce sillon, basée sur la géophysique, était surestimée en raison de la forte épaisseur de graviers en zone non saturée (plus de 30 m).

La troisième étape a consisté à ajuster la **ligne de partage des eaux** souterraines au sud d'Oensingen. Cette ligne sépare les secteurs 1 et 3, et son ajustement a représenté un des problèmes les plus délicats du calibrage du modèle. En effet, son déplacement affecte les bilans de tous les secteurs de la nappe, sauf celui du secteur 2 (cluse de Balsthal). Des modifications de transmissivité, dans les régions E-G-J1, notamment une réduction dans la

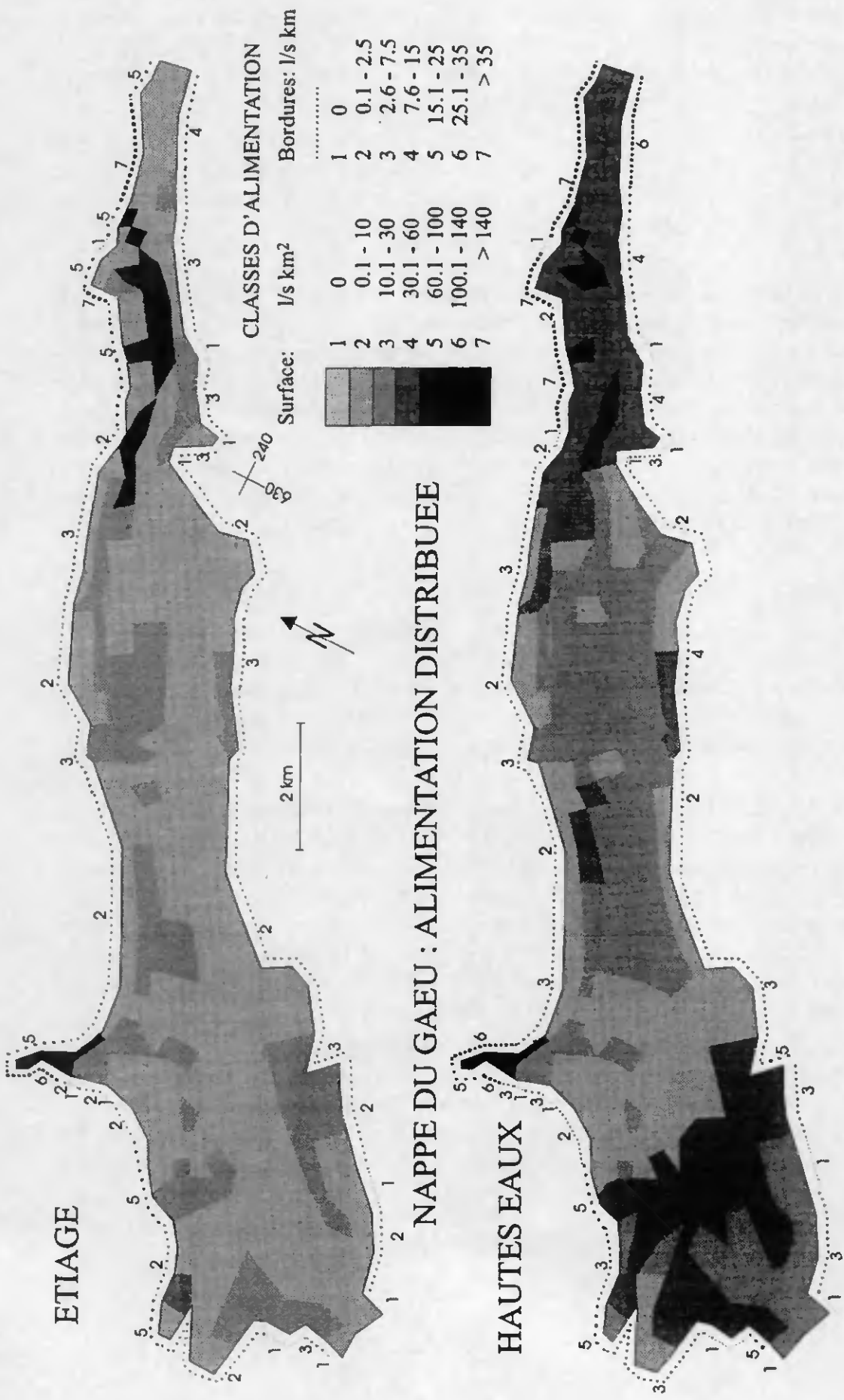


Figure 5 : Alimentations calibrées de la nappe du Gäu en étiage et en hautes eaux.

région G, n'ont pas suffi à déplacer sensiblement la ligne de partage des eaux. Cette dernière a été déplacée vers le sud par une augmentation de l'alimentation dans les régions G (infiltration du Bipperkanal et apport par le substratum) et D-E-F (secteur 1) et une diminution dans les régions I-J-L (secteur 3). L'alimentation de la nappe dans ces régions est attribuée à l'infiltration des précipitations. Il résulte des corrections effectuées que cette infiltration est très forte dans le secteur 1, entre Niederbipp et le Längwald (environ 10 % des précipitations en étiage), ce qui peut s'expliquer par la présence d'une moraine perméable recouverte de prairies et de forêts, et très faible entre Oensingen et Kestenholz, dans le secteur 3 (0.25 % des précipitations en étiage), ce qui peut s'expliquer par la présence de champs cultivés sur sol limoneux. A Oensingen et au nord de Kestenholz, l'alimentation de la nappe est plus forte en raison de l'infiltration de la Dünner (12 l/s·km) et d'un apport par le substratum localement calcaire (6 l/s·km²).

La quatrième étape a consisté à relever les **potentiels trop bas au puits de Niederbipp** (région H), dont le débit de pompage est important (28 l/s). La modification des transmissivités aux alentours ne résout pas le problème, car soit le cône de rabattement devient peu étendu et profond (erreur sur le potentiel au puits), soit il devient peu profond mais très étendu (erreur sur le potentiel aux alentours). La solution consiste à déplacer, dans le secteur 3, l'alimentation de la région J2 vers la région H en réduisant l'infiltration de la Dünner et en augmentant l'alimentation d'environ 30 l/s à partir du versant sud de la chaîne du Weissenstein. Il faut alors réduire d'autant l'apport de ce versant au secteur 1 dans la région d'Oberbipp, et compenser le déficit d'alimentation du secteur 1 en y augmentant l'infiltration des précipitations. Ces corrections suppriment une anomalie relevée dans le bilan du versant du secteur 1 (PASQUIER 2000), où l'apport du versant était plus important en étiage qu'en moyenne, et plus important en moyenne qu'en hautes eaux.

La cinquième étape a consisté à ajuster certains **détails locaux** : dans le secteur 4, on a corrigé les potentiels trop bas aux puits de Neuendorf, Egerkingen et Härkingen (régions M2, Q et S2), tous en bordure de nappe, par un déplacement de l'alimentation du centre vers le bord. En bordure, le surplus d'alimentation dû à ces transferts peut être attribué à l'infiltration de la Dünner dans la région U2, mais ailleurs elle doit provenir du substratum ou des flancs de l'aquifère, notamment dans la région M. Nous avons aussi légèrement augmenté la transmissivité du chenal perméable principal, et diminué celle de la région de Neuendorf (région M2). Dans le secteur 5, nous avons corrigé la répartition de l'alimentation dans la région W1-W2, pour donner un peu moins d'importance à l'infiltration de la Dünner et un peu plus à l'apport du karst et des affluents. Pour ajuster les potentiels dans le secteur 1, nous avons transféré une partie de l'alimentation (infiltration du ruisseau d'Oberbipp) de la région B2 vers la région B1, tout en réduisant la transmissivité dans la région B1 et en l'augmentant dans la région B2. Dans cette dernière, le sillon perméable apparaît donc beaucoup plus important que prévu, mais il est protégé des alimentations par une enveloppe morainique peu perméable.

En résumé, l'alimentation a été sensiblement augmentée dans le secteur 1 (infiltration des précipitations) et diminuée dans les secteurs 3 et 4 (infiltration des précipitations et des cours d'eau). La transmissivité a été réduite dans les secteurs 1 et 3 (chenaux perméables fluvioglaciaires) et à l'extrémité orientale du secteur 4 (chenaux alluviaux, ancienne zone d'exutoire), et augmentée dans les parties occidentale et méridionale de ce même secteur (chenaux alluviaux).

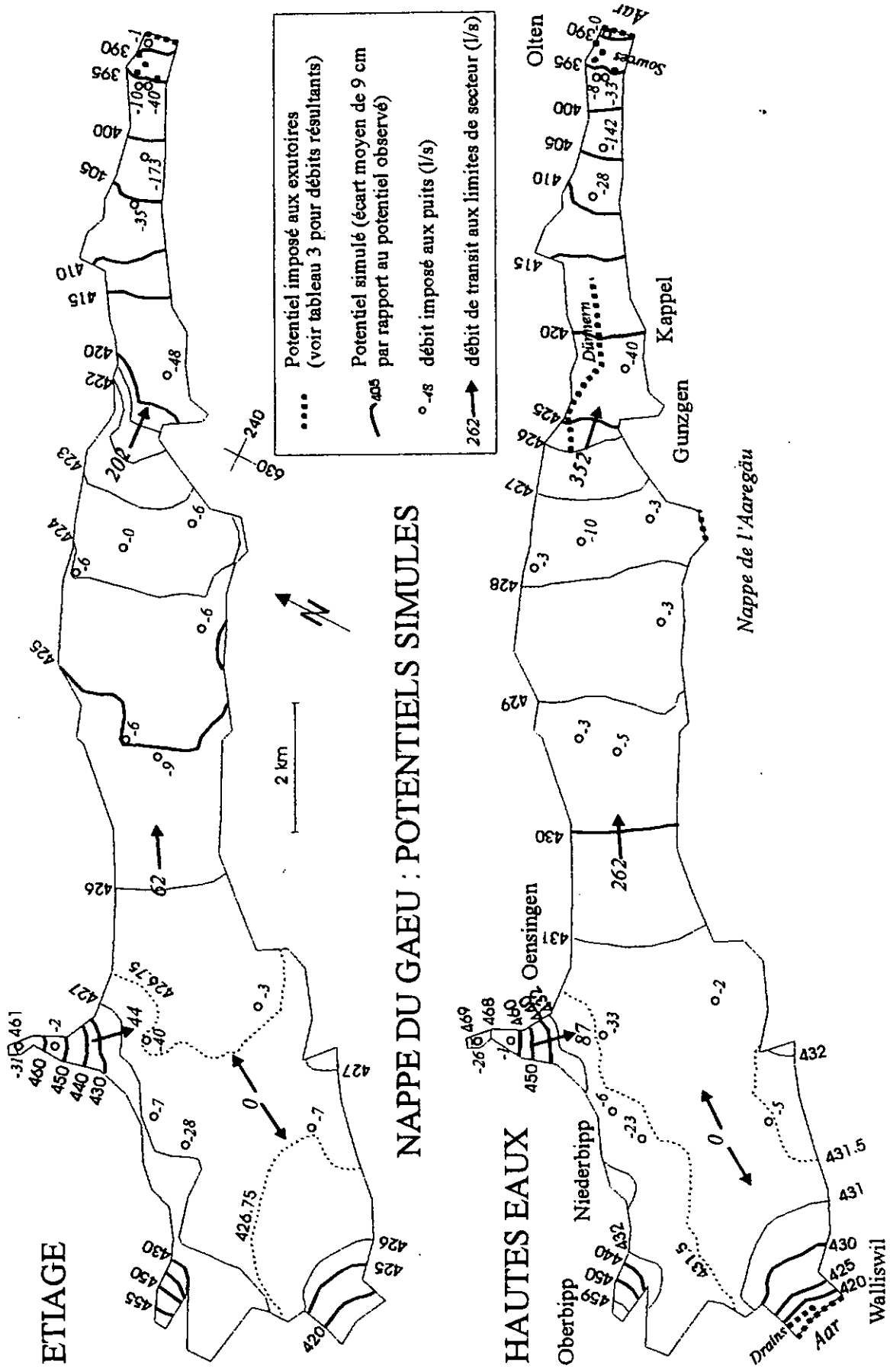


Figure 6 : Potentiels et débits simulés de la nappe du Gäu en étiage et en hautes eaux.

6.2 Calibrage de l'état de hautes eaux (8 avril 1980)

Pour calibrer le modèle en hautes eaux, nous avons multiplié le champ des alimentations d'étiage par un facteur 2.40, correspondant au rapport des alimentations globales. Le champ des transmissivités a été multiplié par un facteur 2.00, correspondant au rapport des débits divisé par celui des épaisseurs de la nappe. Ensuite, on a modulé ces champs car ils présentent de grandes différences locales par rapport à l'état d'étiage (autre répartition alluviale dans les couches supérieures de l'aquifère, exfiltration de la nappe dans la Dünner, débits de pompage réduits, etc.). Par exemple, le rapport des débits d'exutoire en hautes eaux et en étiage vaut 2.42 à Olten et 3.44 à Walliswil. Celui des débits de transit vaut 4.6 à Kestenholz et 1.8 à Gunzgen.

La première étape a consisté à ajuster les **débits d'exfiltration de la nappe** dans la Dünner, entre Gunzgen et Kappel, et le **débit de transfert** du secteur 4 au secteur 5. Cet ajustement a été réalisé essentiellement par une diminution des contrastes de perméabilité entre chenaux graveleux et matrice limoneuse entre Egerkingen et Gunzgen (régions T-U-V). Ceci indique que la partie supérieure de la nappe est occupée à cet endroit par un épendage assez perméable recoupant la matrice peu perméable et les sillons perméables.

La deuxième étape a consisté à relever les **potentiels simulés trop bas au Gheid** (Wangen - Olten), tout en maintenant le débit de transit. Ceci a nécessité une diminution de la transmissivité dans la région U3 et un transfert d'alimentation vers l'amont, de la région W3 vers la région U3. Ces changements reviennent à réduire l'infiltration de la Dünner au Gheid, où la nappe atteint presque le niveau de la rivière, et à l'accroître, ainsi que l'apport des versants, entre Wangen et Rickenbach.

La troisième étape a consisté à ajuster les **gradients entre Oensingen et Kestenholz**, en transférant une partie de l'alimentation de la région J2 (infiltration de la Dünner) vers la région L1 (apport par le substratum calcaire accru de 25 l/s).

La quatrième étape avait pour but d'ajuster la **ligne de partage des eaux**, avec les mêmes outils qu'en étiage, c'est-à-dire en diminuant l'infiltration des précipitations dans le secteur 3 entre Oensingen et Kestenholz (régions J1 - L1), et en l'augmentant dans le secteur 1 entre Oberbipp, Niederbipp et le Längwald (D - E - F).

En résumé, les alimentations ont été augmentées dans le secteur 1 (comme pour l'état d'étiage), et diminuées dans les secteurs 3 (partie orientale) et 4 (infiltration des cours d'eau). Les transmissivités ont été diminuées dans le secteur 1 (comme pour l'état d'étiage), dans la partie méridionale du secteur 4 (chenaux alluviaux) et dans les parties amont du secteur 5 (chenaux de Kappel et de Rickenbach). Elles ont été augmentées dans le secteur 3 (chenaux alluviaux), dans toute la moitié septentrionale du secteur 4 (nappe d'alluvions perméables) et dans la partie aval du secteur 5 (Gheid).

Tableau 1 : Bilan avant et après calibrage des alimentations de la nappe du Gäu.

Secteur	Valeur	Etat moyen						Etiage		Hautes eaux	
		I	I'	I''	U	u	A	u	A	u	A
		(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)
1	avant cal.	152	17	2	97	0	268	0	-	0	-
1	après cal.	182	17	2	67	0	268	0	-	0	-
2	avant cal.	7	40	0	41	0	88	0	-	0	-
2	après cal.	7	40	0	41	0	88	0	-	0	-
3	avant cal.	84	72	4	17	58	235	43	-	89	-
3	après cal.	66	60	4	65	58	235	44	-	87	-
4	avant cal.	111	180	3	26	165	485	52	-	241	-
4	après cal.	111	154	3	31	183	482	62	-	262	-
5	avant cal.	91	191	6	279	297	864	200	-	360	-
5	après cal.	91	192	6	281	294	864	202	-	352	-
1-5	avant cal.	445	500	15	460	-	1420	-	876	-	2099
1-5	après cal.	457	463	15	485	-	1420	-	874	-	2069
1-5 (%)	avant cal.	31	35	1	33	-	100	-	100	-	100
1-5 (%)	après cal.	32	33	1	34	-	100	-	99.8	-	98.6

- A = alimentation des eaux souterraines
I = infiltration primaire efficace (à partir des précipitations)
I' = infiltration efficace à partir des cours d'eau
I'' = infiltration efficace à partir des prélèvements à la nappe
U = apports souterrains aux limites
u = débit de transit souterrain à l'entrée du secteur

Tableau 2 : Modifications des transmissivités (T) et des alimentations (A) pour le calibrage de la nappe du Gäu (- signifie diminution de la valeur, + signifie augmentation) et rapports des transmissivités en étiage et en hautes eaux.

Secteur	Région	Calibrage Etiage		Calibrage Hautes eaux		T(étiage)/ T(h. eaux) (calculé sur la classe T dominante)	K couche supér. (10 ⁻³ m/s)
		Modif. T	Modif. A	Modif. T	Modif. A		
		1	B	-			+
1	C		+		+	1.09	0.01
1	D	-	+	-	+	1.79	46
1	E	-	+		+	2.10	46
1	F	-		-	+	2.20	1.3
1-3	G	-	+	-		1.79	46
3	H	-	-			3.00	6.7
3	I	-	-			4.33	63
3	J	-	-	-	-	1.60	30
3	L1	+	-		-	4.33	63
4	L2	+	-	-	-	4.00	30
4	M1	+	-	-		9.00	4.3
4	M2	+	-		-	9.00	4.3
4	N1	+	-	-	-	2.65	78
4	N2	+		+		1.98	130
4	P			+		10.00	56
4	Q		-	+	-	6.00	67
4	S	-	-	+		2.67	20
4	T	-		+	-	1.87	88
4	U1	-		+	-	6.00	67
4	V	+		+	-	1.02	1.4
5	U2	+		-	-	1.19	11
5	U3			-		1.14	7.2
5	W3			+		2.40	70
5	X1	+				1.19	11
5	X2	+		+		1.00	-
5	Z	-		+		2.40	70

Tableau 3 : Contrôle des débits simulés aux exutoires (l/s).

Exutoire	Étiage			Hautes eaux		
	avant calibrage	après calibrage	différence (%)	avant calibrage	après calibrage	différence (%)
Walliswil	131.6	132.7	0.8	452.0	446.7	1.2
Aar-Olten	62.7	69.0	1.0	137.1	124.6	9.1
Rötzmatt-Olten	223.0	216.8	2.8	540.6	549.0	1.6
Exfiltr. Dünnerm secteur 4	-	-	-	273.3	271.0	0.8
Exfiltr. Dünnerm secteur 5	-	-	-	275.0	283.8	3.2
Scuil de Gunzgen	-	-	-	17.5	20.7	18.3
Total (sans pompage)	417.3	418.5	0.3	1696.0	1695.8	0.0
Pompages (débit imposé)	456	456	-	373	373	-

7. Conclusions

Pour ajuster le modèle, nous avons modifié aussi peu que possible l'image de la nappe acquise au cours de la phase de préparation. En particulier, nous avons tenté de restituer très fidèlement non seulement le champ des potentiels observés, mais aussi le champ des débits déduit du travail sur les bilans (voir PASQUIER 2000). Les modifications nécessaires au respect des critères de contrôle ont toujours été examinées sous l'angle de la vraisemblance hydrogéologique (structure d'alluvionnement cohérente, vraisemblance des facteurs stimulant ou réduisant l'infiltration).

La confiance qu'on peut accorder au modèle dépend de facteurs difficilement quantifiables. La qualité du calibrage dépend certainement de la représentativité des données et de la justesse des hypothèses admises. Dans le cas de la nappe du Gäu, les valeurs de contrôle les moins sûres sont celles des débits de transit et des débits d'exfiltration de la nappe dans la Dünnerm en hautes eaux. La confiance en ces valeurs se fonde sur la vraisemblance d'hypothèses indépendantes du modèle, telles que la conformité aux bilans de la nappe, de ses versants et des bassins voisins (PASQUIER 2000) et la cohérence entre les valeurs de transmissivité résultant de ces débits et la structure observée de l'aquifère.

Les débits de contrôle les plus importants se sont révélés être les débits de transit d'un secteur à l'autre de la nappe, sans lesquels nous aurions admis des transmissivités nettement trop grandes, ainsi que des alimentations trop fortes dans les parties amont et centrales de la nappe, et trop faibles dans les parties aval. La ligne de partage des eaux souterraines (limite à flux nul) doit s'ajuster sur la base des potentiels dans une zone à gradient très faible et fluctuations saisonnières marquées. Heureusement, cette zone d'environ 6 km² est couverte par un nombre suffisant de piézomètres (~2/km²). Par contre, dans la zone d'exfiltration de la nappe dans la Dünner (entre Gungen et Wangen), nous disposons de trop peu de piézomètres pour la localisation précise des zones d'exfiltration en fonction de l'état hydraulique de la nappe.

Le champ des alimentations a été peu modifié lors du calibrage. On a surtout effectué des redistributions locales à l'intérieur des secteurs, majorant ou péjorant les différentes composantes de l'alimentation. Le principal changement concerne le taux d'infiltration des précipitations, sensiblement augmenté dans le secteur 1 et diminué dans le secteur 3 (tableau 2). Ce taux vaut 31 % des précipitations sur l'ensemble de la nappe en état moyen, mais environ 51 % dans le secteur 1, 33 % dans le secteur 2, 15 % dans le secteur 3, 23 % dans le secteur 4 et 38 % dans le secteur 5. Le taux d'infiltration des cours d'eau est un peu plus bas que prévu dans les secteurs 3 et 4. L'apport par les versants a été peu modifié, hormis un transfert d'alimentation (à partir de la chaîne du Weissenstein) du secteur 1 vers le secteur 3.

Le champ des transmissivités calibré pour la situation d'étiage correspond d'assez près à la carte des transmissivités établie au préalable, mais pour des moyennes à hautes eaux. Cela indique que la structure alluviale a été saisie de manière compatible avec les caractéristiques de l'écoulement, mais que les perméabilités des alluvions sont un peu plus grandes à l'échelle régionale qu'à l'échelle concernée par les essais de pompage. En hautes eaux, cet effet d'échelle se manifeste par un facteur 3 à 10 environ.

La dimension verticale des changements de transmissivité a été saisie par le contraste étiage/hautes eaux. Ce contraste fournit une première idée de la répartition verticale des perméabilités. Il permet d'identifier les régions où la partie supérieure de l'aquifère est peu perméable et où la nappe est quasi-captive (bordure du secteur 1 et secteur 2), ainsi que les régions où la partie supérieure de l'aquifère est très perméable (secteur 4, de Niederbuchsiten à Gungen).

Le modèle numérique de la nappe alluviale du Gäu, ajusté en étiage et en hautes eaux, est certainement perfectible. Nous pensons qu'il reflète la réalité dans ses grandes lignes. Nous n'avons pas relevé de contradiction entre les hypothèses ou les résultats du modèle et les faits observés, qu'ils soient de nature hydrodynamique, géologique ou hydrochimique. Un tel modèle peut être utilisé pour dégrossir les problèmes de gestion globale de la nappe, car il traite celle-ci dans son ensemble. Il peut également servir de point de départ à des études plus détaillées devant traiter de problèmes spécifiques.

Remerciements

Je tiens à remercier le Prof. P. Perrochet et le Dr. M. Bouzelboudjen du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel pour leurs critiques constructives lors de la relecture de cet article. Celui-ci résume une partie importante de ma thèse de doctorat déposée en 1986, et à ce titre je remercie chaleureusement pour leur soutien et leurs conseils Messieurs A. Burger (directeur de thèse), H. Schmassmann, L. Kiraly, F. Zwahlen (membres du jury) et I. Müller. Les données et résultats présentés dans cet article ont été obtenus grâce à la collaboration de nombreux bureaux privés et institutions publiques, principalement l'Office de l'Economie Hydraulique et Energétique du canton de Berne, le "Kantonales Amt für Wasserwirtschaft" du canton de Soleure et la Ville d'Olten.

Références

- AWS, Amt für Wasserwirtschaft Solothurn 1982. Hydrographisches Jahrbuch des Kantons Solothurn 1981.
- EAWAG 1957. Bericht über die Grundwasseruntersuchungen im Gheid. Bericht No 1725 an der Wasserversorgung Olten.
- FROELICHER H. 1966. Das Grundwasservorkommen im Dünnergäu und die Möglichkeiten seiner Nutzung. Kant. Amt für Wasserwirtschaft, Solothurn.
- KIRALY L. 1978. La notion d'unité hydrogéologique, essai de définition. Thèse de doctorat, Univ. Neuchâtel.
- PASQUIER F. 1982. Fluctuations chimiques et alimentation de la nappe alluviale du Gäu soleurois. Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 4 : 103-144.
- PASQUIER F. 1986. Hydrodynamique de la nappe alluviale du Gäu (cantons de Soleure et Berne). Thèse de doctorat, Univ. Neuchâtel.
- PASQUIER F. 1987. Indices de l'alimentation de la nappe alluviale du Gäu (SO/BE) par le karst. Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 7 : 327-334.
- PASQUIER F. 2000. Bilans hydrologiques de la nappe alluviale du Gäu (cantons de Berne et Soleure, Suisse). Bull. d'Hydrogéologie, ce volume.
- TURBERG P. & MÜLLER I. 1997. Contribution de la méthode radiomagnétotellurique à la délimitation des structures hydrogéologiques en milieu hétérogène de subsurface. Colloque GEOFCAN, Géophysique des sols et des formations superficielles, septembre 1997, Bondy, France. BRGM, INRA, ORSTOM, UPMC.
- WERNER-Studienbüro 1981. Hydrogeologie Bipperamt : Zwischenberichte 1976, 1977, 1978, 1979 und 1980 an das Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern.
- WERNER + PARTNER AG & KELLERHALS + HAEFELI AG 1984/97. Hydrogeologie Bipperamt, Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern. Schlussbericht, Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern.

INDICES DE L'ALIMENTATION DE LA NAPPE ALLUVIALE
DU GÄU (SO/BE) PAR LE KARST*

F. Pasquier

La nappe alluviale du Gäu (cantons de Soleure et Berne, Suisse) s'étend au pied du Jura sur 20 km de long et 2 km de large en moyenne (voir fig. 1). Elle s'écoule vers l'Aare, d'une part de la région d'Oensingen vers Olten, d'autre part de la région d'Oberbipp vers Walliswil. La ligne de partage des eaux souterraines se situe dans la région de Niederbipp. Le cours d'eau de la Dünnerne parcourt la plaine du Gäu de Balsthal à Olten.

Les fluctuations piézométriques atteignent une ampleur de 4,5 m environ dans les régions centrale et amont, et de 2 à 3 m dans les régions aval. En hautes eaux, l'épaisseur de la zone saturée est de 40 m environ sur l'axe alluvial tout au long de la nappe, et celle de la zone non saturée est de 40 à 60 m dans la région du Längwald (partie SW, zone de moraines), de 25 à 30 m dans la région de Niederbipp-Oensingen-Kestenholz, puis diminue d'Oberbuchsiten à Gunzgen de 20 à 5 m environ (zone d'exutoire temporaire avant l'approfondissement du lit de la Dünnerne), et augmente à nouveau entre Kappel et Olten (10 à 15 m).

Dans la partie aval, plus étroite, le substratum de l'aquifère est constitué essentiellement par les calcaires du Malm, et la Dünnerne est partiellement en contact avec la nappe. Là, des alimentations par la rivière et par le karst de la première chaîne du Jura et de l'anticlinal avancé du Born sont aisément compréhensibles. Par contre, dans les parties centrale et amont, le lit de la Dünnerne se situe nettement au-dessus de la nappe, généralement dans une formation limoneuse peu perméable, et le substratum de l'aquifère est constitué essentiellement par de la molasse marneuse oligo-miocène (Chattien-Aquitaniens) recouverte en partie, dans le fond de la cuvette, par des limons argileux (voir profils, fig. 3).

* Extrait de la thèse "Hydrodynamique de la nappe du Gäu", Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 1986.

Pourtant, même dans ces conditions, on peut identifier les indices d'une alimentation substantielle de la nappe par le karst, notamment sur sa bordure SE, la plus éloignée du Jura.

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau fournissent une première indication d'une alimentation de la nappe par le karst dans des régions où une telle alimentation n'est pas évidente, comme entre Holzhäusern et Kestenholz. Si l'on considère la répartition des duretés carbonatées (fig. 2), on constate que des eaux très douces (moins de 225 mg HCO₃-/l) se rencontrent non seulement au sortir de la cluse de Balsthal, mais également en bordure SE de la nappe, dans la région sus-mentionnée, au voisinage de la culmination piézométrique. Plus en aval, entre Egerkingen et Olten, on rencontre des eaux un peu moins douces malgré un apport important par le karst, d'une part en raison du mélange entre les eaux transitant de l'amont et les apports locaux, d'autre part en raison d'une plus grande dureté des eaux karstiques locales, comme l'indique la dureté des sources de cette région. On remarquera au passage qu'à l'exception de la région d'Oberbipp-Niederbipp, alimentée en partie par le noyau triasique de l'anticlinal du Weissenstein déversé vers le Sud et écroulé à l'Ouest d'Oberbipp, toutes les zones de la nappe où l'eau est douce se situent à proximité de groupes de sources.

Mais revenons à la région de Holzhäusern-Kestenholz. On pourrait penser que la douceur des eaux y est due à une infiltration préférentielle des précipitations à travers un sol moins limoneux. Cependant, si l'on considère la répartition des teneurs en oxygène 18 (fig. 2), on voit que ces dernières sont minimales justement là où les eaux sont douces, ce qui indique un apport par des eaux d'infiltration plus froides, provenant en principe de régions plus élevées, par exemple les chaînes du Jura. On pourrait encore objecter qu'il s'agit d'infiltrations d'hiver, les cartes de la figure 2 étant dressées pour le mois de janvier 1985. Cependant, si l'on considère la répartition des températures (fig. 2), on constate que les régions d'Oberbipp, de Holzhäusern et d'Oensingen sont celles où la température est la plus élevée. En direction de Kestenholz, l'eau souterraine est un peu plus fraîche, mais les fluctuations thermiques saisonnières du puits d'Aebisholz (gravière du profil II) y montrent un déphasage d'environ 6 mois par rapport aux fluctuations de surface, le maximum thermique étant atteint en février (10.0°C) et le minimum en juillet (9.2°C).

De manière plus générale, la température de juillet est inférieure à la température moyenne annuelle dans les régions d'Oensingen, d'Aebisholz-Kenstenholz et de Wangen-Olten. Il semble donc bien, d'après les critères physico-chimiques, qu'une alimentation substantielle de la nappe par le karst ait lieu non seulement dans la partie aval, où l'aquifère est en contact direct avec les calcaires du Malm, mais également dans la partie amont où ce contact est très sporadique et de prime abord insignifiant.

La structure géologique du substratum permet de saisir dans une certaine mesure les relations possibles entre les circulations karstiques et la nappe du Gäu dans la région amont. Sur la figure 1, on voit qu'un haut-fond calcaire entre en contact avec les graviers de l'aquifère entre Oensingen et Kestenholz, là où la vallée se resserre. La profondeur et la nature du substratum ont été cartographiées par interprétation de mesures géophysiques (électromagnétique de très basse fréquence VLF = Very Low Frequency). Toujours d'après les mesures VLF, les calcaires forment un dôme sous la bordure méridionale de l'aquifère (voir profils, fig. 3), dôme qui appartient peut-être au complexe des anticlinaux de Born et de Wynau. L'aquifère pourrait être alimenté par les calcaires même à travers une couverture molassique, à la faveur de failles. A Oensingen et à Egerkingen, une série de sources apparaissent là où les couches de la première chaîne du Jura sont très redressées, c'est-à-dire là où celle-ci a subi une forte compression (voir fig. 2). Entre Oensingen et Oberbuchsiten, par contre, la vallée est étroite et les couches sont en pente douce. Il est probable que sur ce segment, la compression ait été absorbée sur le versant opposé, là où apparaissent les sources de Kestenholz. C'est ce que suggèrent les failles hypothétiques de la figure 3.

L'étude des fluctuations piézométriques apporte également des arguments en faveur d'une alimentation de la nappe par le karst dans la région centrale-amont. Si l'on suit l'évolution d'une recharge printanière sur un profil en long entre Oensingen et Oberbuchsiten (points A à E de la fig. 1), on constate que la recharge est déphasée dans le temps, d'aval en amont, et que son ampleur diminue pour un déphasage croissant. La figure 4 illustre ce phénomène. Les profils piézométriques 1 à 5 représentent les états successifs de la nappe au cours de la recharge (fig. 4.A). Les courbes I à IV de la figure 4.B représentent les changements du niveau de la nappe entre ces états, le long du profil. L'alimentation

parvient donc à la nappe d'abord dans la région d'Oberbuchsitzen-Kestenholz, et ensuite seulement dans celle d'Oensingen, située pourtant plus en amont et tout près de la cluse de Balsthal.

Pour ce qui concerne les alimentations provenant de la surface (infiltrations des précipitations et des cours d'eau), la rapidité des recharges est influencée par l'épaisseur de la zone non saturée. Le 1.1.1979, cette dernière vaut 31 m aux points A et B, 23 m au point C, 20 m au point D et 15 m au point E. Si l'on applique aux variations du niveau de la nappe une correction pour éliminer l'effet des différences d'épaisseur de la zone non saturée, le déphasage constaté plus haut n'est pas oblitéré, ni d'ailleurs l'amortissement de l'onde de recharge vers l'amont. En particulier, la recharge au point D reste toujours plus importante et plus précoce qu'au point C, que la correction soit de type linéaire ou quadratique. Sur la figure 4.B, la correction empirique Δh en cm vaut $0.1 (31-z)^2 \cdot n$, z étant l'épaisseur de la zone non saturée en cm, et n valant -1, -0.3, +0.3 et +1 pour les phases I à IV. L'amplitude maximale de l'onde de recharge se trouve alors déplacée du point E vers le point D. Dans la région de Kestenholz, une alimentation préférentielle à partir du substratum est donc tout à fait plausible.

Pour conclure, signalons encore que le champ des alimentations, ajusté pour le calibrage d'un modèle mathématique de la nappe du Gäu, confirme l'hypothèse d'une alimentation à partir du substratum dans la partie amont de la nappe, notamment dans les régions d'Oberbipp, Niederbipp, Holzhäusern et Kestenholz.

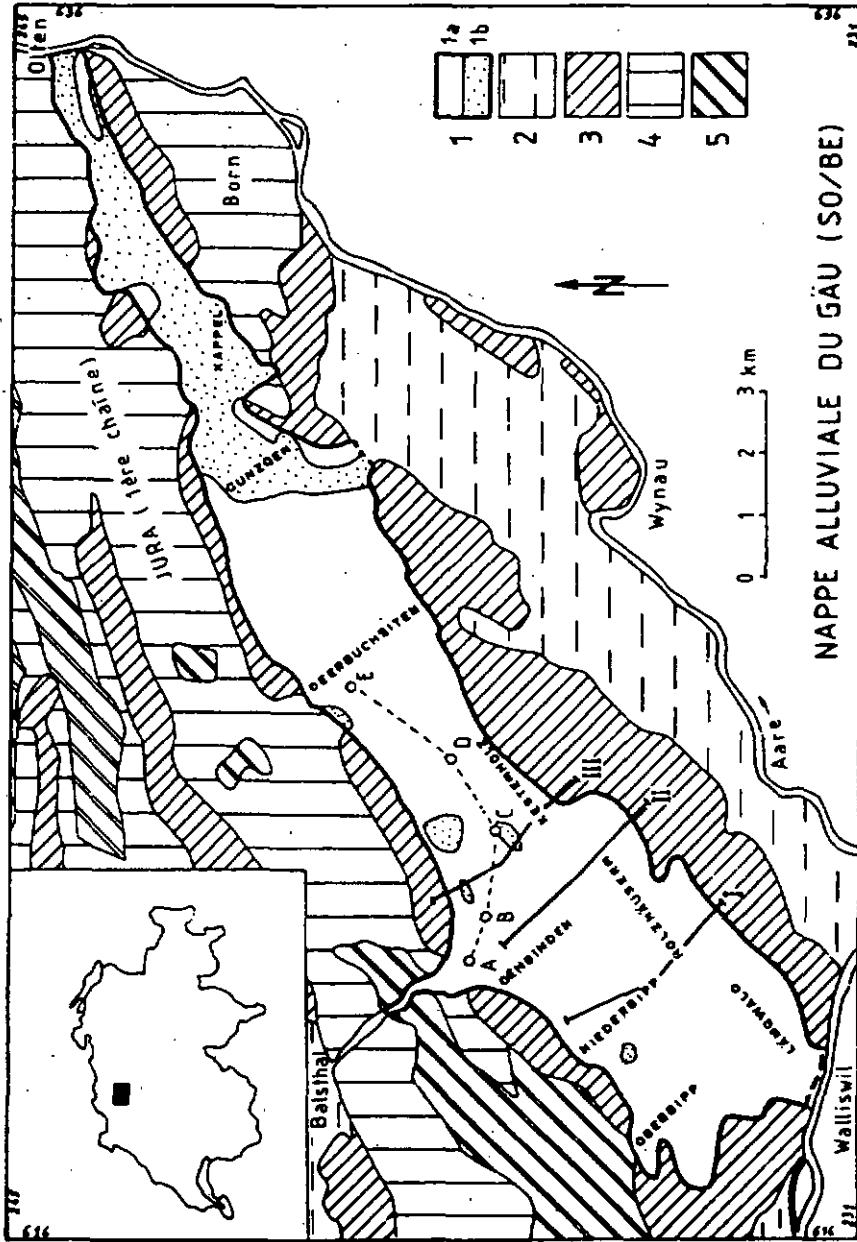


Fig. 1 : Situation de la nappe du Gäu. 1 = nappe du Gäu, Quaternaire perméable; 1a = substratum de molasse ou de limon; 1b = substratum de calcaire. 2 = Quaternaire perméable. 3 = Tertiaire et Quaternaire peu perméable. 4 = Malm. 5 = Dogger, Lias et Keuper. I à III = profils géologiques (voir fig. 3), A à E = profil piézométrique (voir fig. 4)

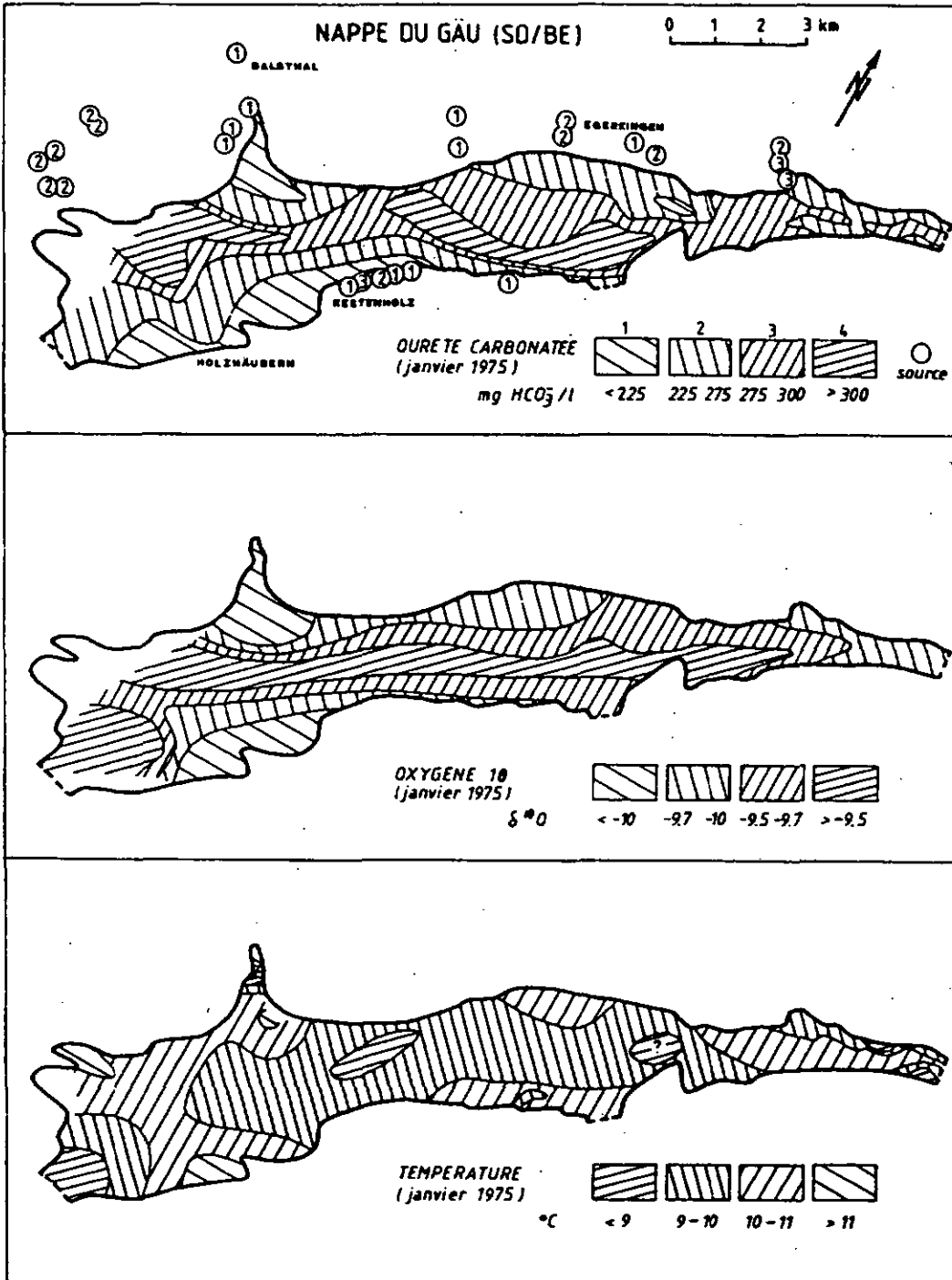


Fig. 2 : Caractéristiques physico-chimiques de la nappe du Gäu

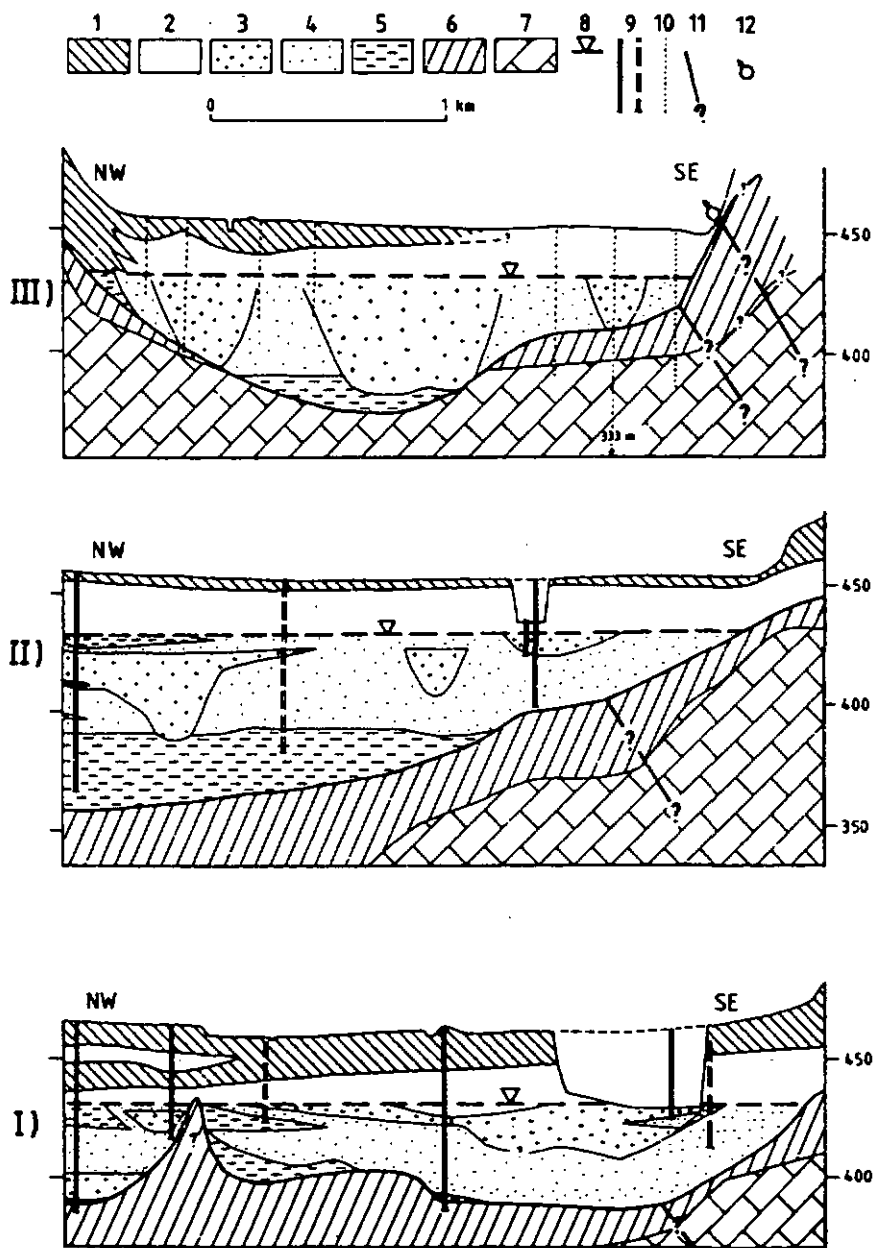


Fig. 3 : Profils géologiques (situation voir fig. 1).
1 et 2 = zone non saturée; 1 = peu perméable, 2 = perméable. 3 et 4 = aquifère; 3 = très perméable, 4 = peu et moyennement perméable. 5 à 7 = substratum; 5 = limons, 6 = molasse, 7 = calcaire. 8 = niveau piézométrique de hautes eaux (avril 1979). 9 = forage, forage projeté. 10 = mesure VLF. 11 = faille hypothétique. 12 = source.

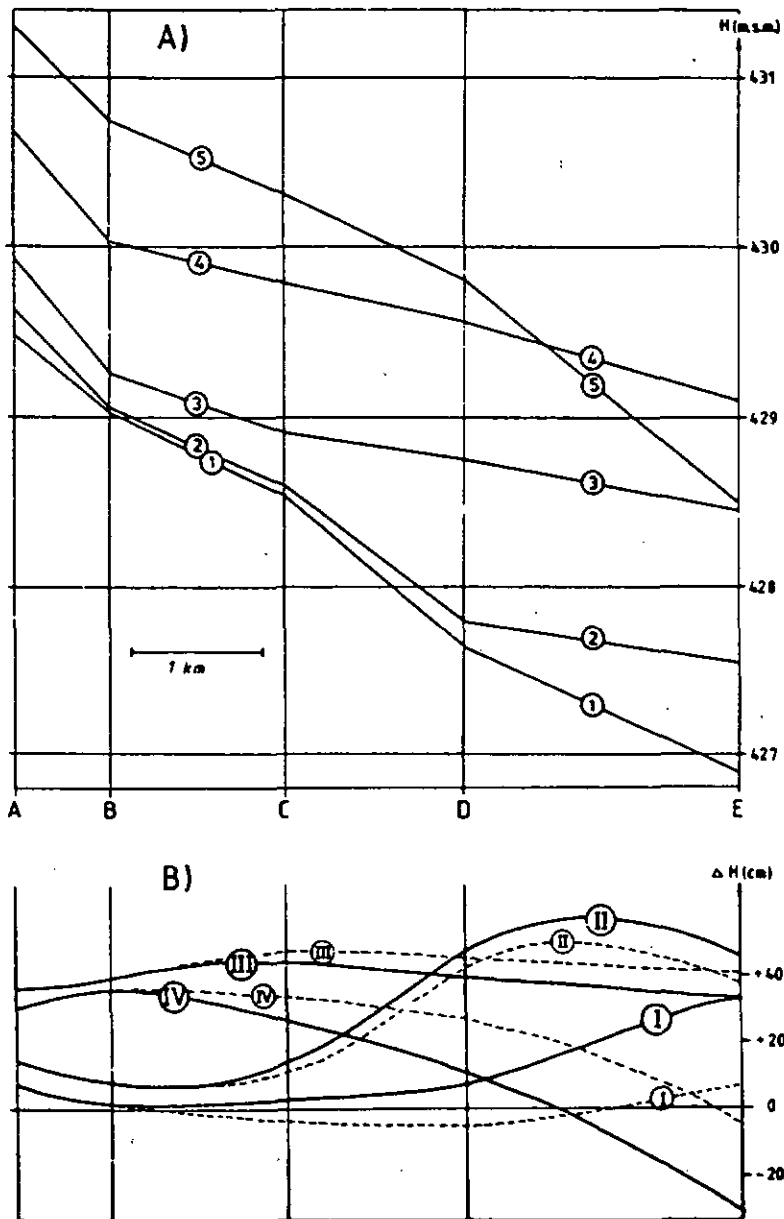


Fig. 4 : Profils piézométriques (situation voir fig. 1).
A - Profils piézométriques successifs lors de la recharge du printemps 1979, soit états 1 = 1.1.79, 2 = 12.1.79, 3 = 10.2.79, 4 = 20.2.79, 5 = 30.5.79.
B - Déplacements de l'onde de recharge : variations du niveau de la nappe le long du profil A-E entre les états 1 et 2 (I), 2 et 3 (II), 3 et 4 (III), 4 et 5 (IV). Traitillé = mêmes variations, corrigées pour éliminer l'effet des différences d'épaisseur de la zone non saturée (voir texte).

FLUCTUATIONS CHIMIQUES ET ALIMENTATION DE LA NAPPE
ALLUVIALE DU GAEU SOLEUROIS

par F. PASQUIER (1)

Résumé

On examine le caractère chimique des eaux souterraines dans la nappe alluviale du Gäu soleurois et bernois, de Niederbipp à Olten (Plateau suisse, au pied du Jura). On étudie principalement les fluctuations de l'état carbonaté pour l'année 1975, à l'aide de deux paramètres, la conductibilité électrique et le pH, dans quatre puits offrant des situations hydrogéologiques différentes. Ces fluctuations sont comparées aux recharges de la nappe, ainsi qu'aux fluctuations des ions caractéristiques (seulement en fin d'année), dont on connaît par ailleurs la répartition spatiale. Cette dernière est liée à des provinces alimentaires mises en lumière notamment par une corrélation entre les teneurs en sulfates et en oxygène 18. La comparaison de tous ces éléments permet d'éclaircir quelque peu les modes d'alimentation de la nappe, notamment de distinguer les alimentations provenant de la zone non saturée, caractérisées par un système carbonaté ouvert aux échanges de CO₂, des alimentations profondes ou latérales en zone saturée, caractérisées par un système carbonaté fermé aux échanges de CO₂. Il apparaît que l'alimentation de base de la nappe est de ce second type et provient essentiellement du Jura.

(1) Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel.

Abstract

The chemical characters of the underground waters of the Gäu alluvial aquifer (Cantons of Soleure and Berne) have been examined, from Niederbipp to Olten (Swiss Plateau, at the foot of the Jura). In four wells showing different hydrogeological situations, a study has been made chiefly on the fluctuations of the carbonate state for the year 1975, by means of two parameters : the electrical conductivity and the pH. These fluctuations have been compared with the recharge of the aquifer, and with the fluctuations (only at year's end) of characteristic ions whose spatial distribution is known by other means. This spatial distribution is linked to recharge provinces which are enlightened for example by a correlation between the concentrations of sulphates and O^{18} . By comparing all these elements, the different modes of recharge of the aquifer could be worked out. In particular, the refill originating from the un-saturated zone, having a carbonate system open to CO_2 exchanges, could be distinguished from the deep-seated or lateral refill through the saturated zone, having a carbonate system lacking CO_2 exchanges. The fundamental recharge of the aquifer seems to be of the second type and originates essentially from the Jura.

1. SITUATION

L'aquifère alluvial du Gäu soleurois s'étend au pied du Jura entre Niederbipp (BE) et Olten. Sa partie amont est située dans le canton de Berne.

C'est un corps de graviers sableux d'environ 20 km de long, 2 km de large et 30 m d'épaisseur noyée. L'épaisseur de la zone non saturée passe d'environ 30 m en amont à environ 5 m en aval. En surface, la plaine est occupée en grande partie par des champs cultivés.

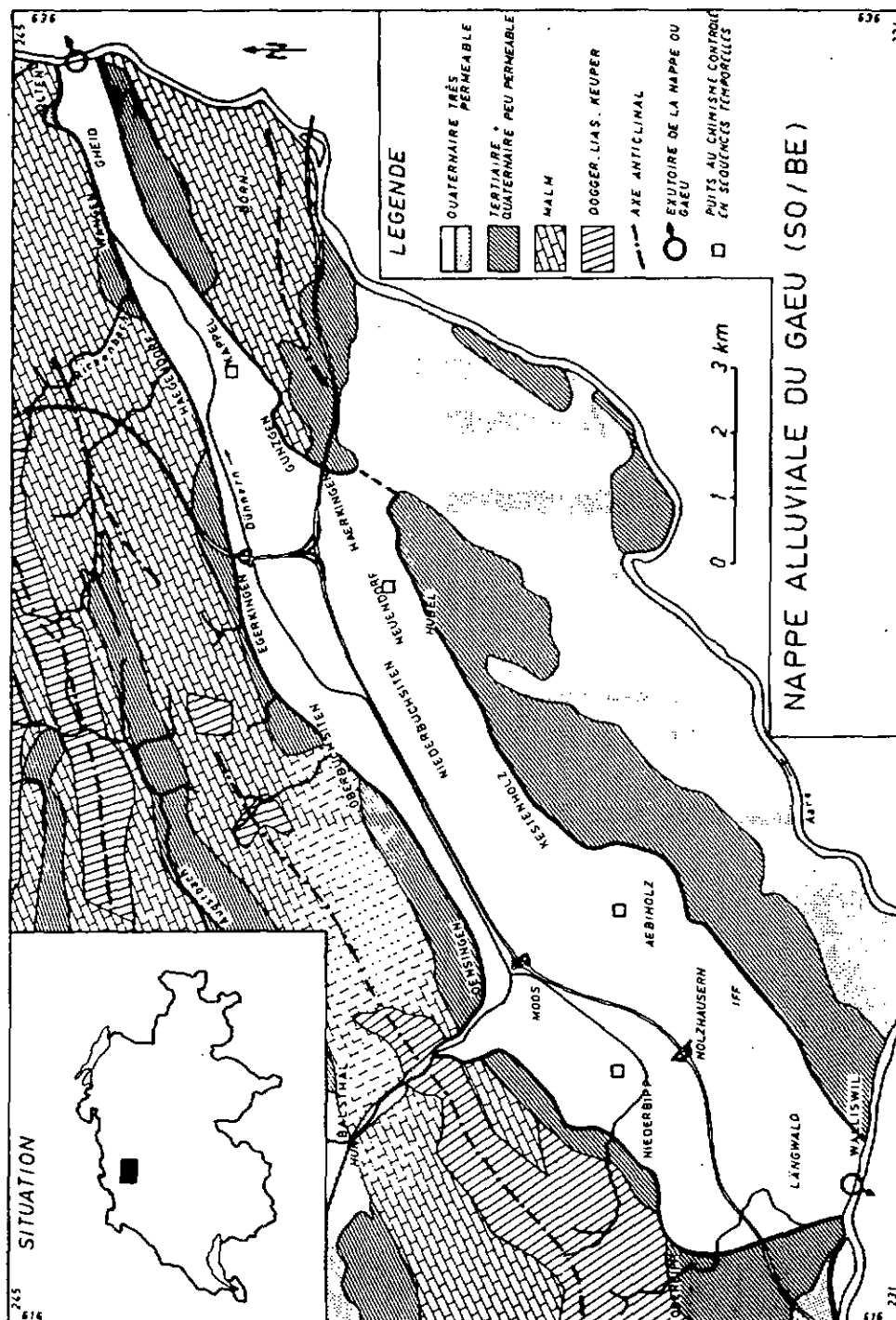
Au cours de l'année 1975, nous avons fait prélever, grâce à l'amabilité des responsables des puits de Niederbipp, Neuen-dorf, Kappel et de la gravière de Aebiholz (Oensingen), quelques séquences d'échantillons, à raison d'un par semaine, dans quatre puits représentatifs de différentes zones de la nappe.

[Fig. 1]

Ces prélèvements avaient pour but d'estimer les variations temporelles du chimisme de la nappe. Comparées aux variations spatiales établies à partir de plusieurs campagnes de prélèvements simultanés, les variations temporelles du chimisme devaient permettre de mieux comprendre les conditions d'alimentation de la nappe.

2. FIABILITÉ DES MESURES

En raison de l'analyse différée de la plupart des échantillons, quelques remarques préliminaires s'imposent. Les échantillons ont été conservés à température ambiante, à l'abri de la lumière.



[Fig. 1] : Situation de la nappe du Gäu.

re et dans les bouteilles de polyéthylène.

2.1. pH et conductibilité

Les échantillons ont été analysés en une fois après chaque séquence de prélèvements, c'est-à-dire après une durée de stockage de quelques jours à 80 jours, sans que les bouteilles aient été ouvertes. On constate une dérive des valeurs du pH, qui a pu être bien caractérisée par l'examen des séquences à conductibilité stable. En approximation linéaire, cette dérive vaut

- . pour Niederbipp : +0.010 unité pH/jour
- . pour Aebholz : +0.002 unité pH/jour
- . pour Neuendorf : +0.008 unité pH/jour
- . pour Kappel : +0.0075 unité pH/jour

Il est probable que cette dérive soit inversement proportionnelle à l'indice de saturation.

Un examen plus approfondi, effectué en 1981 à Niederbipp, montre qu'en général la dérive n'est pas linéaire : elle est presque nulle les cinq premiers jours, puis vaut 0.02 unités pH/jour du 5e au 20e jour environ, puis redevient négligeable. Les valeurs mesurées sur le terrain correspondent aux valeurs mesurées en laboratoire, sauf pendant certaines périodes d'alimentation où l'eau, sous-saturée, se dégaze après le prélèvement, ce qui occasionne une montée du pH. Les valeurs qui s'écartent fortement de la norme [Fig. 2 à 5] ne reflètent donc pas forcément des variations de pH in situ, mais bien plus, semble-t-il, la précarité de l'état carbonaté des eaux pendant certaines périodes. Même comprises ainsi, les fluctuations du

pH sont le reflet d'événements affectant la nappe.

La conductibilité électrique à 20°C (K_{20}) varie également avec le temps de conservation, à cause des changements d'équilibre dus à la dérive du pH. Ce phénomène est sensible si les bouteilles stockées ont été entamées (d'après différents tests de conservation : $-100 \leq \frac{K_{20}}{\text{pH}} \leq -350 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), mais il reste négligeable, au moins dans les deux premiers mois de conservation, si les bouteilles n'ont pas été ouvertes. Pour les séquences considérées ici, nous avons pu dans certains cas estimer la dérive de K_{20} à environ -0.2 unité/jour, soit environ $\frac{\Delta K_{20}}{\Delta \text{pH}} = -25 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Dans d'autres cas, la dérive semblait nulle ou même positive. Nous avons donc renoncé à corriger les valeurs de la conductibilité électrique.

2.2. Anions et cations

Nous avons complété en automne 1980 les analyses effectuées en 1975, et établi des corrélations pour les différents ions.

On constate qu'après un stockage de 5 à 6 ans, bouteilles entamées, les teneurs en sodium, potassium, magnésium et chlorures sont restées stables, moyennant de légères dérives positives ou négatives suivant les ions. Les teneurs en sulfates sont un peu moins stables.

Plus exactement, les facteurs de corrélations trouvés sont les suivants :

$$\text{K}^+ (1975) = 1.0 \times \text{K}^+ (1980) \quad (\pm 8 \%, n = 4)$$

$$\text{Na}^+ (1975) = 0.8 \times \text{Na}^+ (1980) \quad (\pm 8 \%, n = 7)$$

$$\begin{aligned} \text{Mg}^{++} (1975) &= 1.11 \times \text{Mg}^{++} (1980) && (\pm 5 \%, n = 6) \\ \text{Cl}^- (1975) &= 1.12 \times \text{Cl}^- (1980) && (\pm 5 \%, n = 4) \\ \text{SO}_4^{--} (1975) &= 0.9 \times \text{SO}_4^{--} (1980) && (\pm 15 \%, n = 18) \end{aligned}$$

Les teneurs en calcium ont fortement diminué pour se stabiliser aux environs de 30 mg/l, soit une diminution respective d'un facteur

- . 2.65 pour Aebiholz,
- . 3.65 pour Niederbipp et Kappel,
- . 4.05 pour Neuendorf.

Les teneurs en bicarbonates, non mesurées en 1980, ont probablement suivi une évolution analogue.

Les teneurs en *nitrites* analysées en 1980 n'ont pu être comparées que par leur ordre de grandeur avec celles de 1975, car nous ne disposons plus des échantillons analysés alors, sauf dans un cas. Les échantillons ont conservé, après cinq ans, leur teneur originelle, au moins en ce qui concerne l'ordre de grandeur. Les valeurs de Ca^{++} et NO_3^- des analyses de 1980 ont été représentées par un point (au lieu d'un cercle) sur les [Fig. 2 à 5].

2.3. Balance ionique

Les résultats des analyses que nous avons rassemblés à titre illustratif dans le tableau 1 montrent que la balance ionique est bien équilibrée [Tabl. 1]. La différence entre cations et anions, due notamment à l'imprécision des analyses, se situe entre 1.5 et 4 % du total des anions.

[Tabl. 1] : Balance ionique pour 5 puits de la nappe du Gäu

	Neuendorf 1.11.75 mg/l mmol/l	Niederbipp 18.7.75 mg/l mmol/l	Kappel 5.11.75 mg/l mmol/l	Aebiholz 25.11.75 mg/l mmol/l	Oensingen 1.11.75 mg/l mmol/l
HCO ₃ ⁻	200 5.80 5.800	291 5.82 5.820	307 6.14 6.140	(213) 4.26 4.260	230 4.60 4.600
SO ₄ ²⁻	18.2 0.19 0.370	21 0.22 0.437	13.8 0.14 0.288	14.3 0.15 0.298	24.4 0.25 0.508
NO ₃ ⁻	28 0.45 0.452	(30) 0.48 0.484	30.6 0.49 0.493	(13.2) 0.21 0.212	(9) 0.14 0.145
Cl ⁻	13.3 0.37 0.375	14.2 0.40 0.401	15.7 0.44 0.443	2.8 0.08 0.080	0.3 0.26 0.263
Total Anions	7.006	7.142	7.364	4.850	5.516
Ca ²⁺	122 3.05 6.100	129.5 3.24 6.475	123 3.07 6.150	(76.5) 1.91 3.824	95 2.37 4.750
Mg ²⁺	9.6 0.40 0.794	7.0 0.29 0.576	8.2 0.34 0.675	9.0 0.37 0.740	5.3 0.22 0.436
Na ⁺	3.6 0.17 0.174	5.6 0.24 0.243	4.0 0.17 0.174	2.0 0.09 0.087	3.2 0.14 0.130
K ⁺	1.6 0.04 0.041	2.7 0.07 0.070	(3.0) 0.08 0.077	0.0 0.02 0.023	2.2 0.06 0.056
Total Cations	7.109	7.364	7.076	4.674	5.381
Δ = Anions - Cations	-0.103	-0.222	+0.288	+0.176	+0.135
Δ/anions (%)	1.5	3.1	3.9	3.6	2.4

NB: les valeurs entre parenthèses sont approximatives (analyses tardives ou valeurs estimées par correction).

On voit également que la conductibilité de l'eau est conditionnée à plus de 80 % par les bicarbonates de calcium, et à environ 10 % par les sulfates et le magnésium. Les nitrates et les chlorures jouent un rôle sensiblement égal, sauf au droit de la cluse de Balsthal : peu de chlorures à Aebiholz et peu de nitrates à Oensingen. Le sodium est environ 3 fois plus important que le potassium.

3. FLUCTUATIONS DES PARAMÈTRES CHIMIQUES

On peut voir sur les [Fig. 2 à 5], l'évolution des paramètres chimiques au cours de l'année 1975, spécialement de K_{20} et du pH, pour les quatre puits mentionnés. Sur ces figures, les unités des échelles sont grosso modo proportionnelles à la valeur moyenne du paramètre représenté, ceci de manière à ne faire ressortir que les variations significatives.

L'examen de K_{20} montre que les valeurs sont en général très stables au cours de l'année, quel que soit le niveau piézométrique de la nappe, sauf pour quelques courtes périodes généralement consécutives à de fortes pluies.

Le pH réagit également pour ces périodes, parfois dans le même sens que K_{20} (par ex. Kappel en juillet et novembre, Niederbipp en mars-avril et décembre), mais en général en sens inverse de K_{20} , conformément aux lois d'équilibre des systèmes carbonatés ouverts à l'atmosphère, lois concrétisées par exemple par les courbes de TILLMANS (in BURGER, MISEREZ).

Les périodes de variations brusques et importantes du pH et de K_{20} se situent :

- . en mars (pas d'information pour Kappel),
- . au début juin (pas d'information pour Kappel),
- . à la fin juillet-début août (sauf pour Neuendorf),
- . à la fin novembre (sauf pour Neuendorf et Kappel).

Les ions caractéristiques (Na^+ , K^+ , Mg^{++} , SO_4^{--} , Cl^- , NO_3^-)⁽¹⁾ varient également, mais de manière difficilement compréhensible à première vue. Nous y reviendrons.

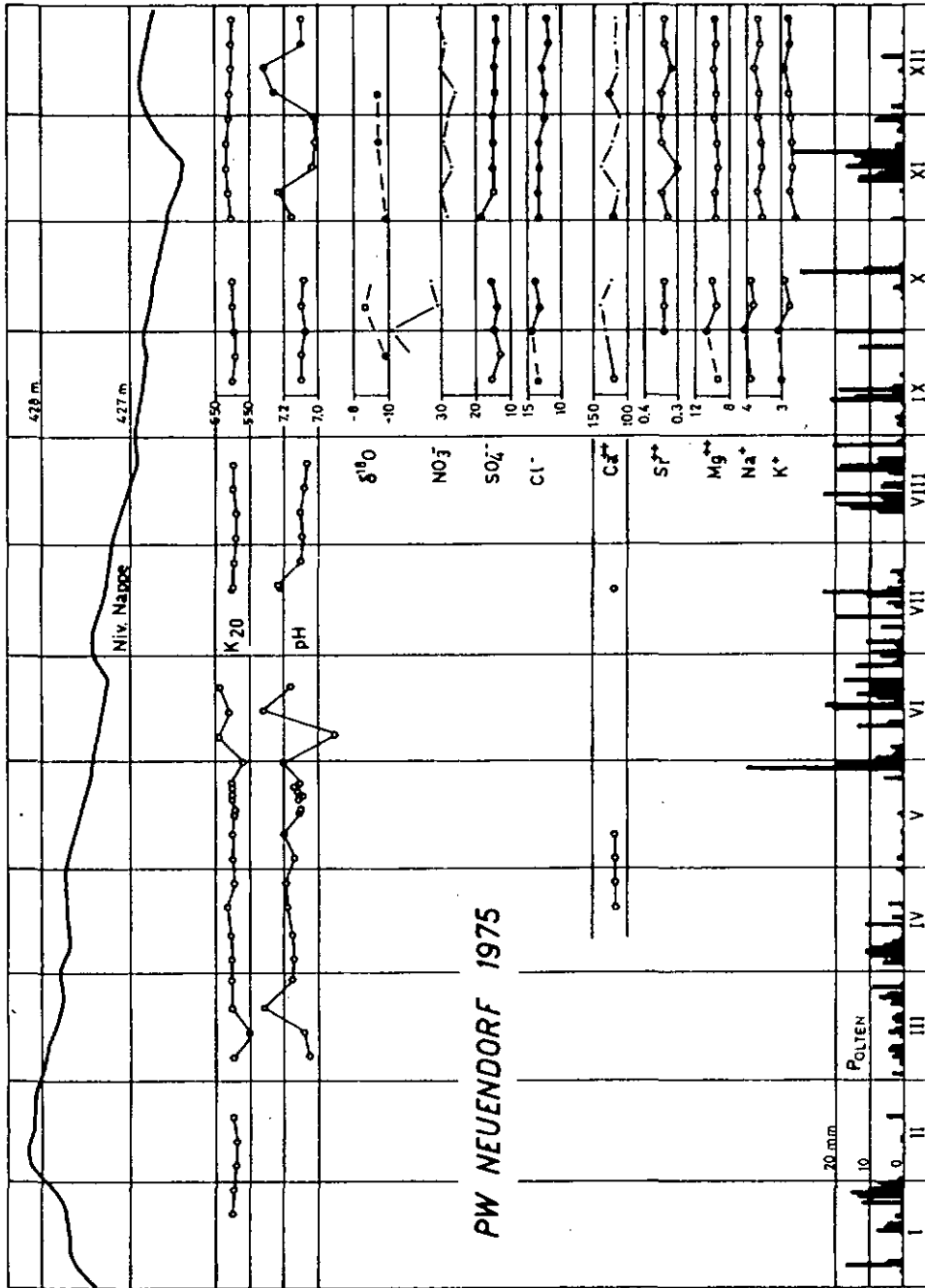
4. VARIATIONS TEMPORELLES DE L'ÉQUILIBRE CARBONATÉ

Nous avons tenté de comprendre les variations sommairement décrites au § 3. en termes d'équilibres carbonatés, en utilisant les variables pH et K_{20} (en lieu et place de $[\text{HCO}_3^-]$, la conductibilité électrique étant essentiellement déterminée par les bicarbonates/calcium). Les variations du système carbonaté sont ainsi représentées sur les [Fig. 6 et 7].

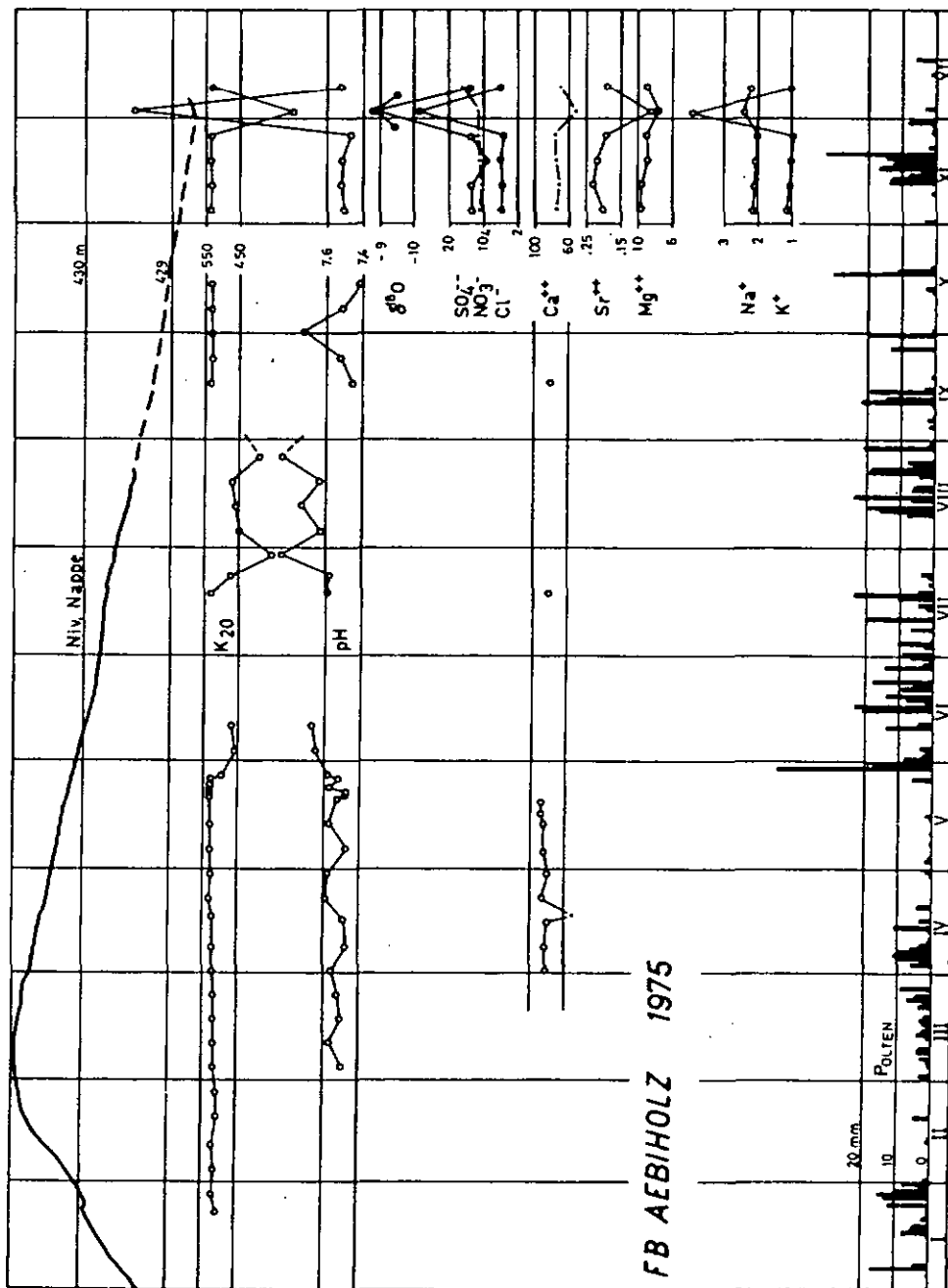
Concernant le système carbonaté, quelques remarques préliminaires s'imposent (inspirées de STUMM & MORGAN) :

. Une nappe d'eau souterraine étant un système à écoulement continu, on ne peut pas parler d'équilibres au sens strict du mot, car l'équilibre suppose un système fermé ou des conditions aux limites invariables. Toutefois, si les variations du flux physico-chimique sont faibles par rapport aux temps des réactions mises en jeu, ce qui est le cas pour les réactions du système carbone dissous, l'état d'écoulement permanent approche suffisamment bien les conditions d'équilibre. Les réactions

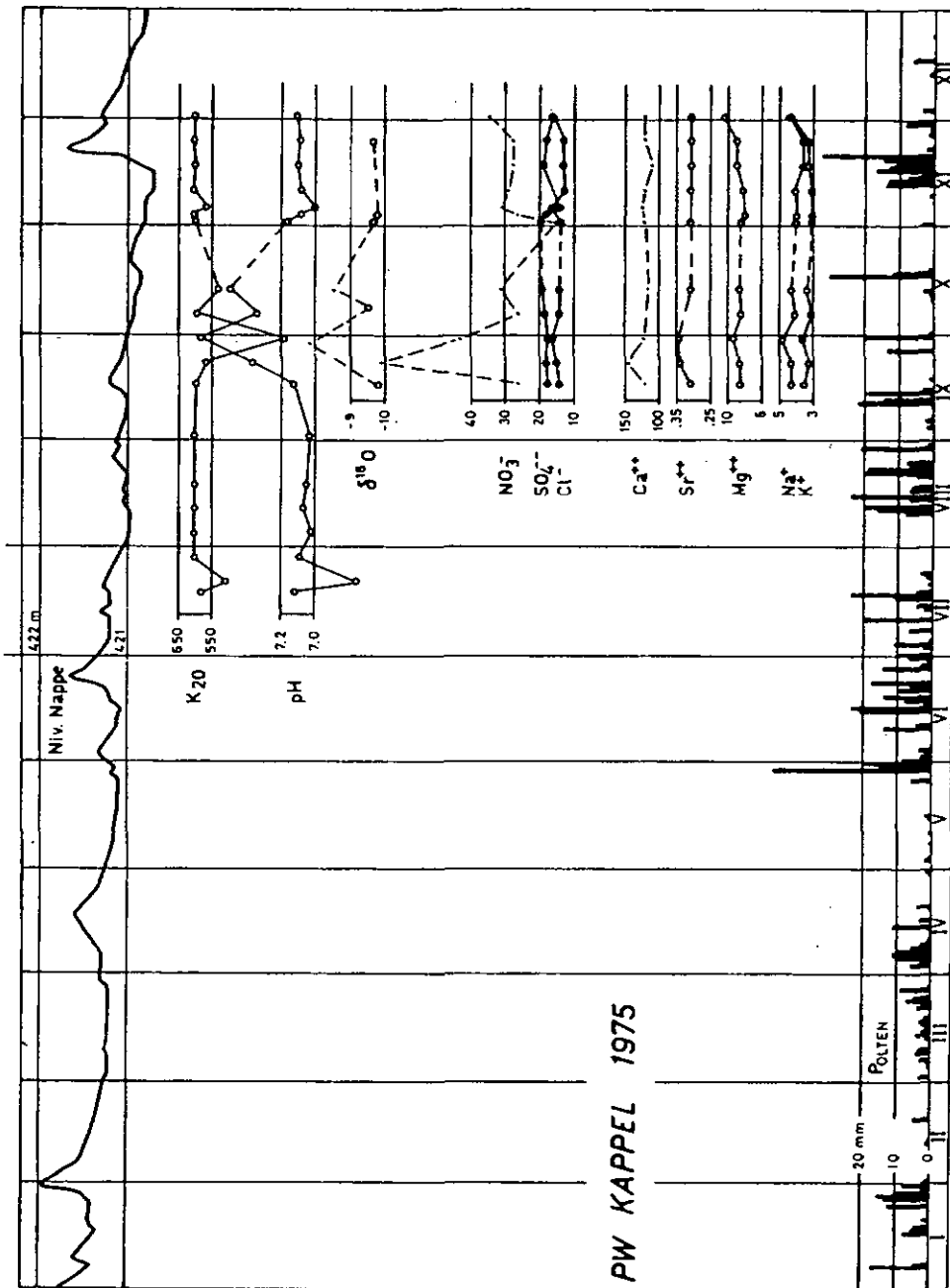
(1) Les ions fondamentaux étant Ca^{++} et HCO_3^- , d'après LEGRAND et POIRIER.



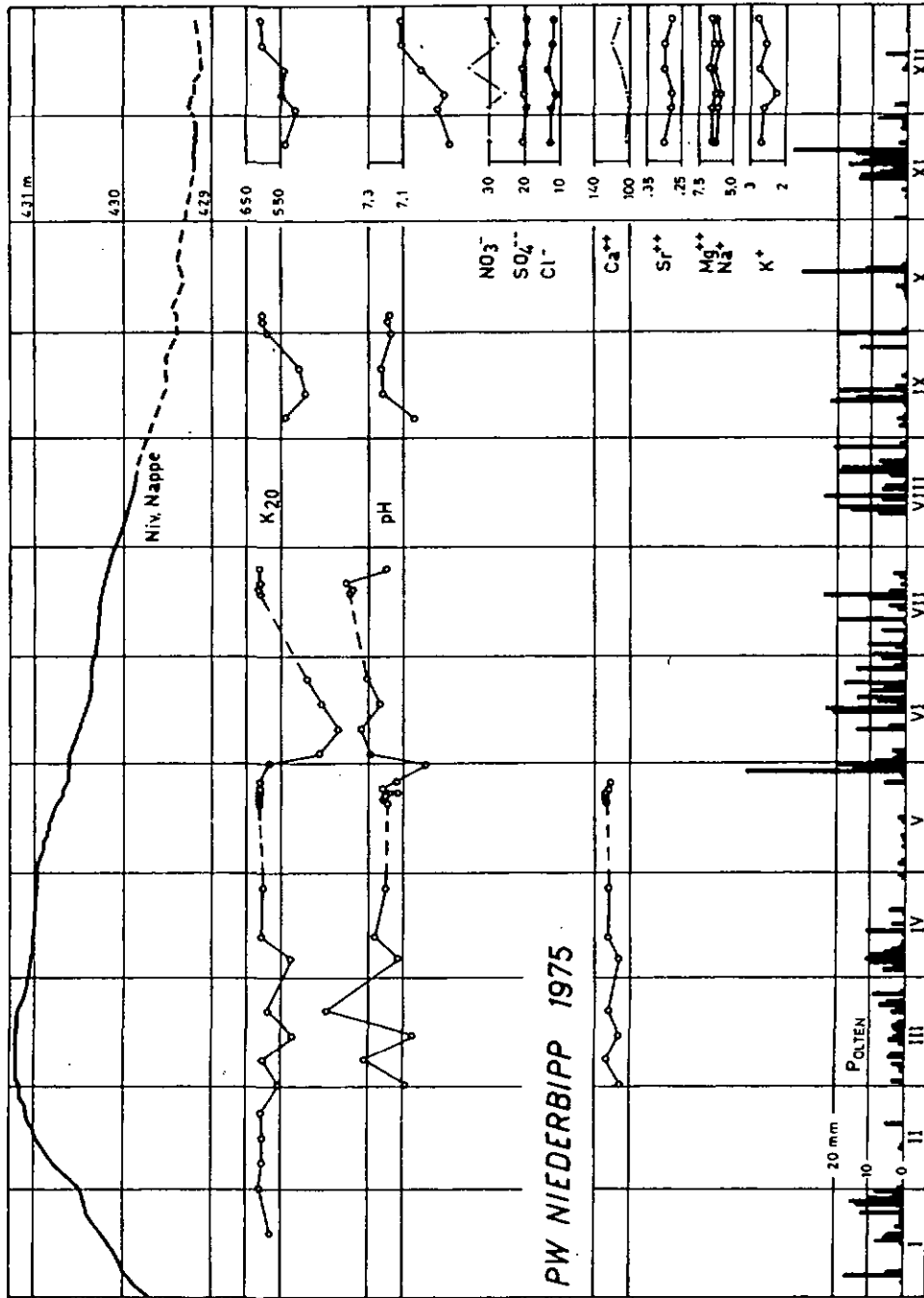
[Fig. 2] : PW Neuendorf 1975.



[Fig. 3] : FB Aebiholz 1975.



[Fig. 4] : PW Kappel 1975.



[Fig. 5] : PW Niederbipp 1975.

aux interfaces liquide-gazeux et liquide-solide peuvent être par contre beaucoup plus lentes, et peuvent par conséquent maintenir l'eau dans un état de non-équilibre sensible. Il serait préférable par conséquent de parler de variations de l'état carbonaté plutôt que de variations de l'équilibre carbonaté.

. Il faut distinguer, même sans considérations cinétiques, deux cas conditionnant fort différemment les réactions :

1° Les systèmes fermés aux échanges de CO_2 avec l'atmosphère, où le carbone total (C_T) peut être considéré comme constant. Ils sont représentés en pratique par des parties de la nappe où le contact avec la zone non saturée est malaisé (par ex. nappe semi-captive, niveaux profonds). Dans de tels systèmes, le pH, entre 6.5 et 8.5 environ, est conditionné par le rapport entre $[\text{H}_2\text{CO}_3^*]$ ⁽¹⁾ et $[\text{CO}_3^{--}]$, puisque $[\text{HCO}_3^-] = C_T$ est invariable. $[\text{HCO}_3^-]$ représente l'alcalinité de l'eau (Alc).

Les variations de $[\text{H}_2\text{CO}_3^*]$ peuvent être dues à des variations thermodynamiques (P, T) et cinétiques (vitesses d'écoulement). On a alors $\Delta \log [\text{H}_2\text{CO}_3^*] = - \Delta \text{pH}$ [flèche ① de la [Fig. 6a]). De plus, les variations du flux chimique occasionnent des mélanges d'eau dont la résultante est caractérisée par les moyennes pondérées de C_T et Alc. Les phénomènes de dilution entrent dans cette catégorie. Le pH dépend du pouvoir tampon du mélange. Ce dernier diminue fortement entre les pH 7.0 et 7.5 (flèche ② de la [Fig. 6a]).

2° Les systèmes ouverts aux échanges de CO_2 avec l'atmosphère, où le carbone total C_T est variable. Ils sont représentés en pratique par les parties de la nappe où le contact avec la zone

(1) $[\text{H}_2\text{CO}_3^*] = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{CO}_2 \cdot \text{aq}] \approx [\text{CO}_2 \cdot \text{aq}]$

non saturée est aisé. Comme C_T varie, le pH est conditionné principalement par la teneur en bicarbonates :

$$[H^+] = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{--}] + [OH^-]$$

2°a Si pCO_2 est constant, les variations de pH sont dues à d'autres causes, par ex. à des apports de bases ou d'acides. On a alors $\Delta \log [HCO_3^-] = \Delta pH$ (flèche ③ de la [Fig. 6a]).

2°b Si pCO_2 varie, $H^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons CO_2 + H_2O$, et $\Delta \log [HCO_3^-] = - \Delta pH$ (flèche ④ de la [Fig. 6a]).

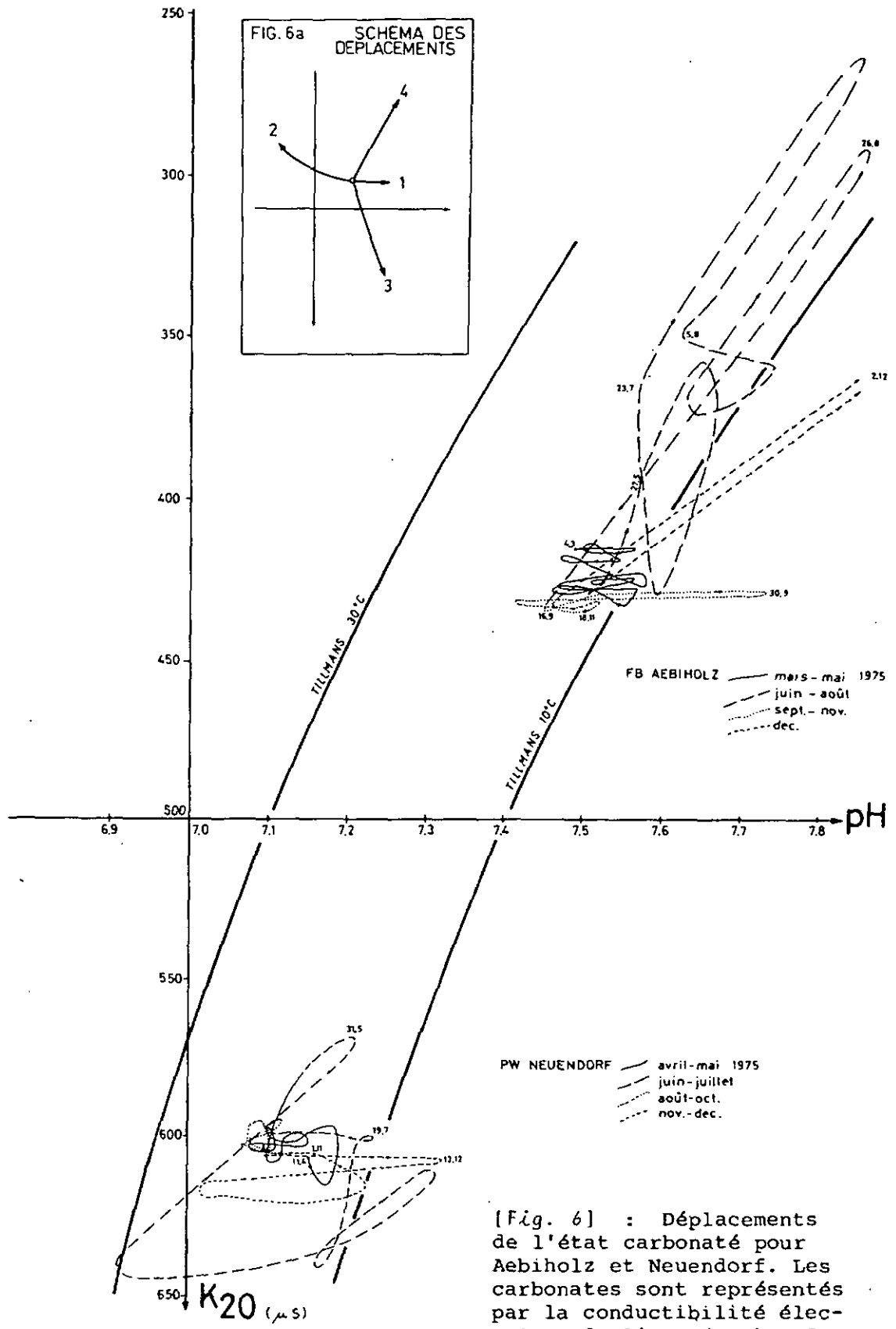
C'est le cas décrit par les courbes d'équilibre de TILLMANS. [Fig. 6 et 7]

* La caractérisation d'une eau devrait se faire au moyen de l'alcalinité, qui est une quantité conservative indépendante de la température et de la pression, tandis que le pH et $[H_2CO_3^*]$ en sont dépendants. Pour les eaux naturelles qui nous concernent, $[Alc] \cong [HCO_3^-] + 2[CO_3^{--}] + [OH^-] - [H^+] \cong [HCO_3^-]$. En système fermé, l'alcalinité n'est donc pas affectée par les variations de $[H_2CO_3^*]$.

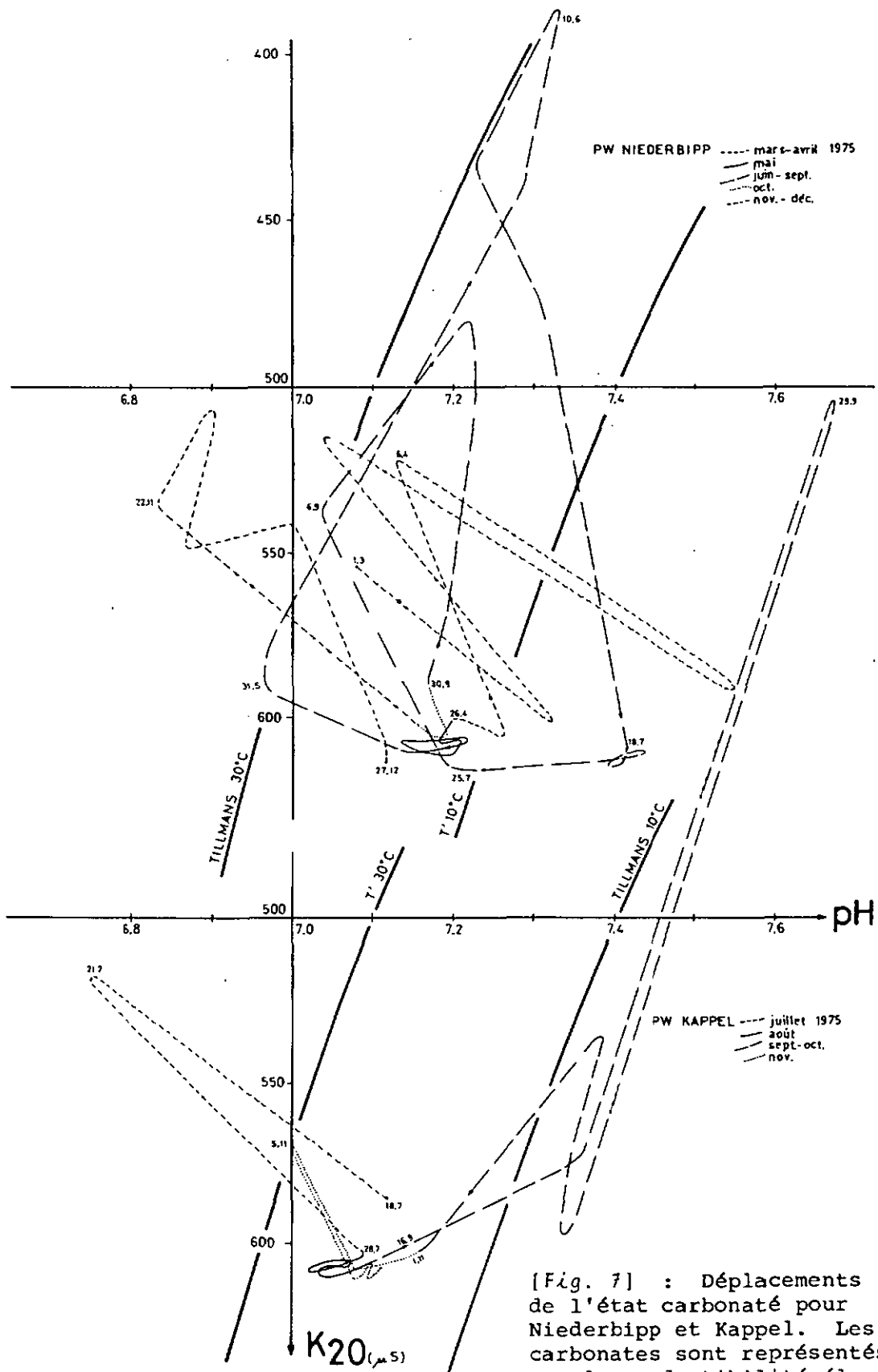
Considérons maintenant les variations de l'état carbonaté sur les [Fig. 6 et 7]. On constate que :

. Le point représentant l'état carbonaté se déplace dans l'espace défini par les courbes de TILLMANS pour 10°C et 30°C. Considérant qu'en pratique le point devrait se trouver approximativement sur la courbe pour 30°C (MISEREZ, p. 222), les eaux ont un caractère plutôt incrustant.

. Le point oscille autour d'un noyau d'attraction caractéristique de l'"équilibre" de l'eau en régime permanent, puis dévie



[Fig. 6] : Déplacements de l'état carbonaté pour Aebiholz et Neuendorf. Les carbonates sont représentés par la conductibilité électrique de l'eau (K₂₀). Commentaires dans le texte.



[Fig. 7] : Déplacements de l'état carbonaté pour Niederbipp et Kappel. Les carbonates sont représentés par la conductivité électrique de l'eau (K_{20}). Commentaires dans le texte.

brusquement pour revenir par oscillations successives au noyau d'attraction, décrivant ainsi un parcours qui rappelle les phénomènes oscillatoires, de convection ou même de turbulence faible.

. Les noyaux d'attraction sont caractérisés par les couples de valeurs suivants :

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 7.08/K_{20} = 608 \text{ pour Kappel} \\ \text{pH} &= 7.10/K_{20} = 600 \text{ pour Neuendorf} \\ \text{pH} &= 7.16/K_{20} = 610 \text{ pour Niederbipp} \\ \text{pH} &= 7.52/K_{20} = 425 \text{ pour Aebiholz} \end{aligned}$$

Ces noyaux peuvent être reliés par une droite représentant la relation pH/K_{20} pour la nappe en écoulement permanent. En effet, de nombreuses variations internes aux puits respectifs sont sensiblement parallèles à cette droite, qui se définit ainsi :

$$\text{pH} = 8.43 - 0.0022 K_{20}$$

. On peut grouper les variations en trois types :

- a) Petites variations autour du noyau d'attraction, de nature oscillatoire (Aebiholz, Niederbipp, Kappel) ou convective-turbulente (Neuendorf), plutôt liées à des systèmes fermés.
- b) Grandes variations de nature oscillatoire conformes aux courbes d'équilibre de TILLMANS, généralement en été 1975. Elles sont caractéristiques de systèmes ouverts où interviennent des échanges de CO_2 avec l'atmosphère.
- c) Grandes variations de nature oscillatoire plus ou moins perpendiculaires aux courbes d'équilibre de TILLMANS, généralement au printemps et en automne 1975. Elles sont caractéristiques de systèmes fermés où interviennent des variations du flux

physico-chimique et/ou des variations des conditions thermodynamiques et/ou de cinétique des écoulements. Nous ne sommes pas en mesure, dans le cadre de cette étude, de déterminer quels sont ici les facteurs prépondérants.

Les quatre puits s'individualisent par rapport aux descriptions ci-dessus :

. *Aebiholz* et *Neuendorf* [Fig. 6] pour leur fort noyau d'attraction et leur prédilection pour les variations de type b), ces dernières étant nettement plus fortes à *Aebiholz*. Il est temps de remarquer ici que ces deux puits sont éloignés de la bordure jurassienne de la nappe, ce qui pourrait expliquer d'une part leur assez grande inertie chimique, d'autre part la prépondérance, lors des variations de l'état carbonaté, des alimentations de plaine à travers la zone non saturée.

. *Niederbipp* et *Kappel* [Fig. 7] pour leur faible noyau d'attraction et l'ampleur ainsi que la fréquence de leurs variations de type b) et surtout c), ces dernières étant plus marquées à *Niederbipp*. Inversément aux deux premiers, ces deux puits sont placés près de la bordure jurassienne de la nappe, ce qui favorise une alimentation plus particulièrement liée aux écoulements souterrains en zone saturée à partir des versants (systèmes fermés), avec de fréquents mélanges d'eaux. Ils se distinguent en outre par des températures moyennes plus élevées (10.4 et 10.6°C, contre 9.5 et 9.9°C pour *Aebiholz* et *Neuendorf*).

5. VARIATIONS SPATIALES DES IONS CARACTÉRISTIQUES

Comme nous l'avons mentionné au § 3., les variations temporelles des ions caractéristiques sont difficiles à interpréter. C'est pourquoi nous aborderons d'abord l'étude des variations spatiales de ces ions, ce qui nous amènera à diviser la nappe en provinces chimiques, et aussi à spécifier l'origine des ions respectifs.

L'étude des variations spatiales est basée sur des campagnes de mesures simultanées effectuées en juillet 1974, janvier 1975 et juillet 1975, la plus complète étant celle de juillet 1974. C'est cette dernière qui sera donc représentée sur les [Fig. 8 à 10], sauf spécification contraire.

. Les teneurs en sulfates [Fig. 8a] décroissent assez régulièrement en fonction de la distance à la bordure jurassienne de la nappe. Par rapport à cette répartition, on remarquera :

- a) des anomalies positives à Egerkingen et à Aebiholz,
- b) des anomalies négatives entre Kappel et Wangen, et dans une certaine mesure à Niederbipp.

On notera également que la partie aval de la nappe, où aboutissent des rivières chargées en sulfates (principalement le Rickenbach, dont le bassin versant touche le Trias), n'est pas plus chargée en sulfates que la partie amont.

La répartition des sulfates indique assez clairement qu'ils proviennent en grande partie (teneurs supérieures à 10 mg/l) des formations du Jura comprises entre le Dogger et le Muschelkalk.

. Les teneurs en nitrates (campagne partielle d'avril 1980, [Fig. 8b]) augmentent avec la distance à la bordure jurassienne.

ne de la nappe, à l'inverse des teneurs en sulfates. Elles sont spécialement faibles à la sortie de la Cluse de Balsthal. Par rapport à cette répartition, on remarquera :

- a) une anomalie négative à Aebiholz,
- b) une anomalie positive à Niederbipp, et dans une plus faible mesure à Egerkingen et à Kappel.

Les fortes teneurs en nitrates (plus de 10 mg/l) apparaissent donc comme essentiellement liées aux infiltrations à partir de la plaine cultivée du Gäu.

. Les teneurs en *chlorures* (moyenne 1974, 1975 et 1980, [Fig. 8c]) sont les plus fortes dans les zones de Niederbipp-Sud (autoroute) et dans la partie centrale de la nappe entre Niederbuchsiten, Härkingen et Kappel (autoroute ?). Elles sont relativement faibles à Oensingen et Längwald-Walliswil, et très faibles à la sortie de la Cluse de Balsthal et à Aebiholz. Cette répartition semble indiquer que les fortes teneurs en chlorures (plus de 5 mg/l) sont liées essentiellement aux zones urbaines et à l'autoroute.

. Les teneurs en *magnésium* [Fig. 9a] sont réparties grosso modo de manière inverse à celles en sulfates. Elles apparaissent spécialement fortes entre Niederbipp-Sud et le Längwald, dans la zone des moraines terminales wurmiennes, et entre Neuendorf et Gunzgen, où subaffleure la molasse. Les fortes teneurs en magnésium (plus de 10 mg/l) sont peut-être liées à ces deux types de formations géologiques.

. Les teneurs en *sodium* [Fig. 9b] sont réparties de manière assez semblables à celles en chlorures. Elles sont toutefois faibles à Niederbuchsiten, alors que celles en chlorures y sont fortes. Comme pour les chlorures, les fortes teneurs en sodium (plus de 5 mg/l) semblent généralement liées aux zones ur-

baines, mais peut-être aussi aux terrains morainiques (Niederbipp).

. Les teneurs en *potassium* [Fig. 9c] sont réparties de manière assez semblable à celles en sulfates. Toutefois, entre Niederbuchsiten et Härkingen, on note une augmentation nettement plus forte des teneurs en potassium que de celles en sulfates. Le potassium est certainement partiellement lié aux engrais, mais les concentrations les plus fortes (plus de 2 mg/l) semblent plutôt liées aux formations du Jura. On ne peut comparer la répartition du potassium ni à celle des nitrates, ni à celle des chlorures.

Pour résumer très schématiquement, on peut grouper les ions caractéristiques par couples de répartition spatiale affine comme suit :

- 1° *potassium et sulfates* (en provenance du Jura),
- 2° *magnésium et nitrates* (en provenance de la plaine et des bas versants),
- 3° *sodium et chlorures* (en provenance des zones urbaines).

Températures et oxygène 18

La comparaison des températures moyennes [Fig. 10a] et de l'écart Temp. (juillet 74) - Temp. (moyenne) [Fig. 10b] fait ressortir quelques zones fortement individualisées, à savoir :

- . Apports froids et rapides (synchronicité saisonnière Temp. (eau)/Temp. (air) : Niederbuchsiten - Neuendorf;
- . Apports chauds et rapides : Niederbipp, Kappel-Wangen;
- . Apports froids et lents (déphasage saisonnier Temp. (eau)/

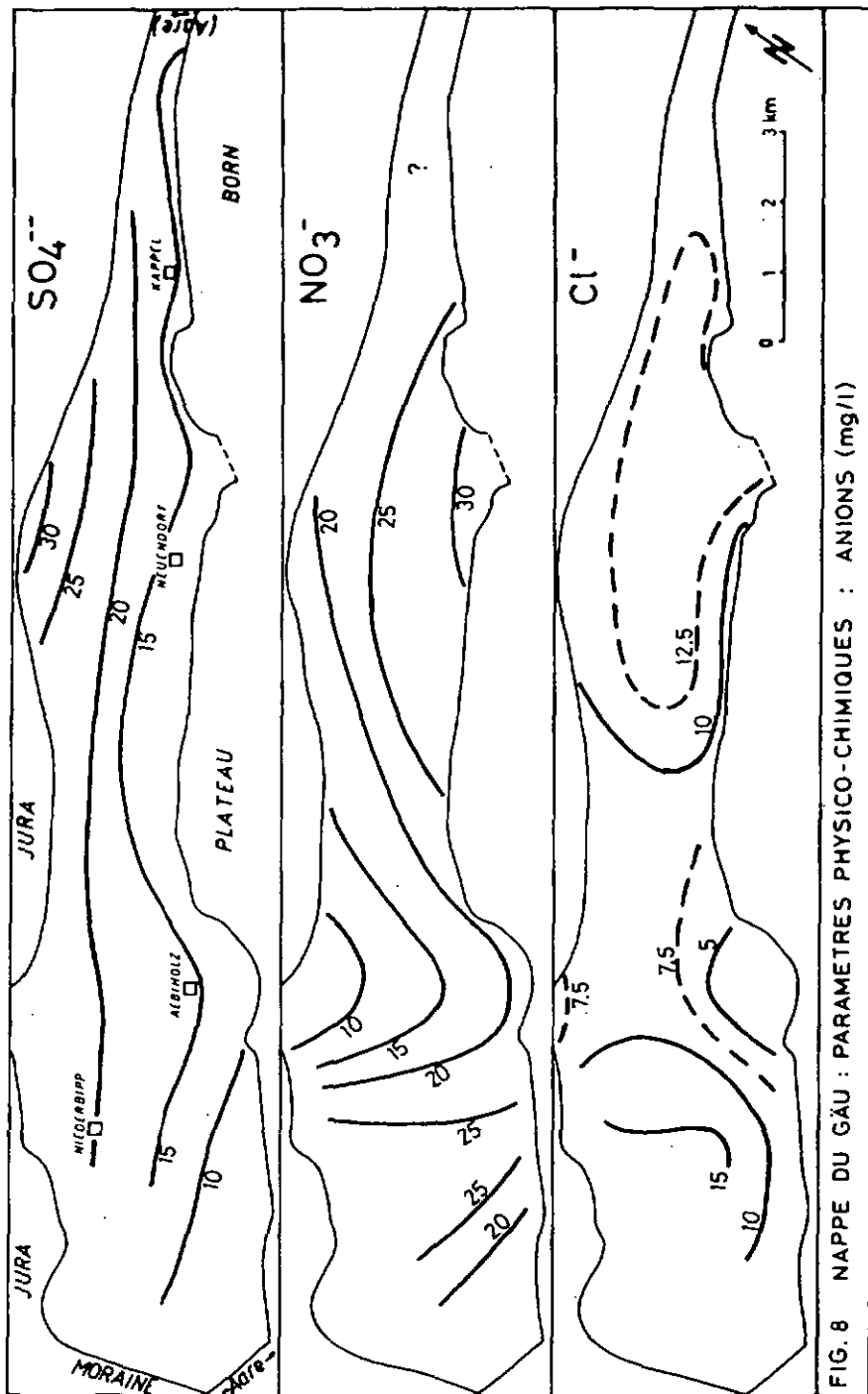


FIG. 8 NAPPE DU GÄU : PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES : ANIONS (mg/l)

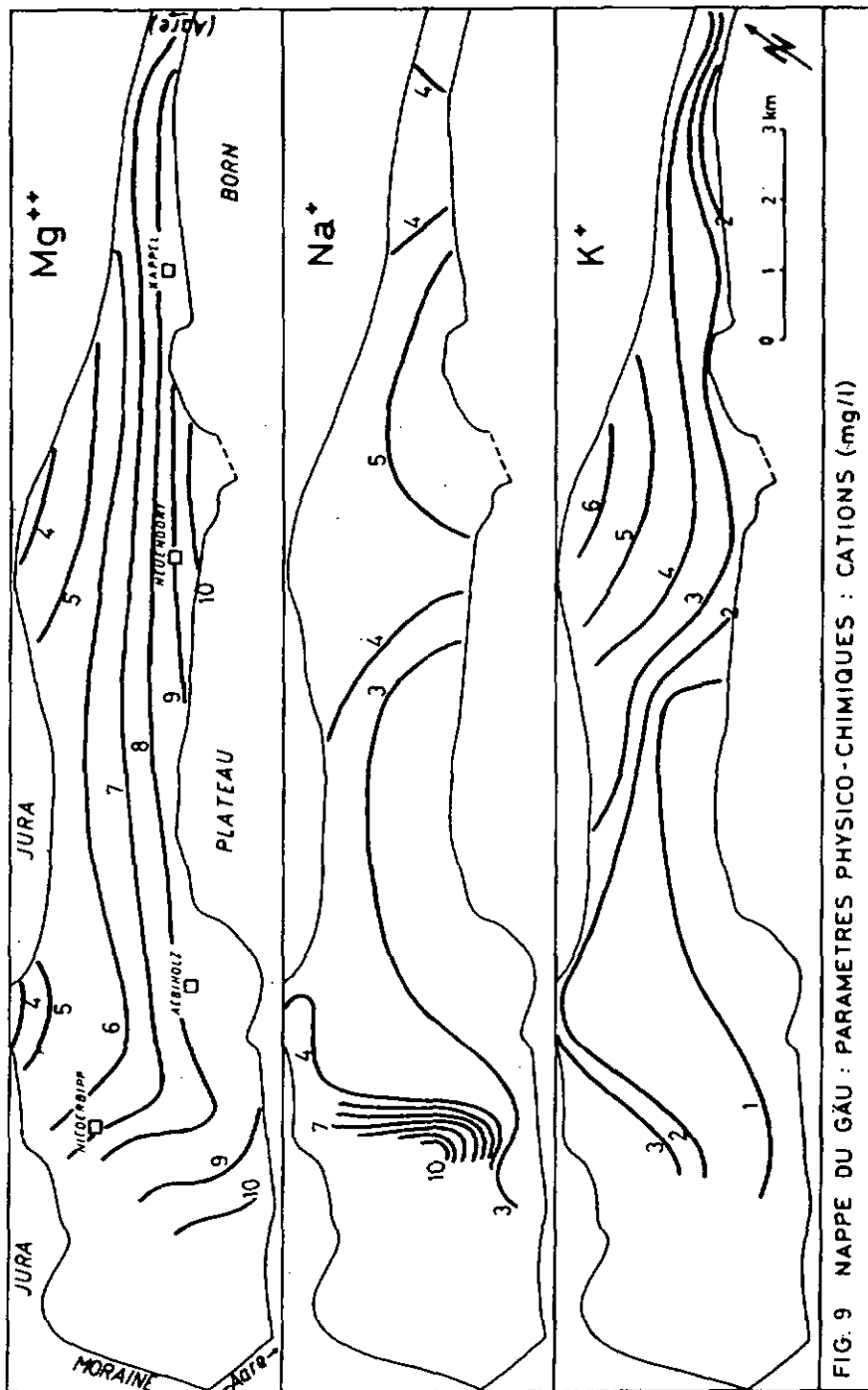


FIG. 9 NAPPE DU GÁÚ : PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES : CATIONS (mg/l)

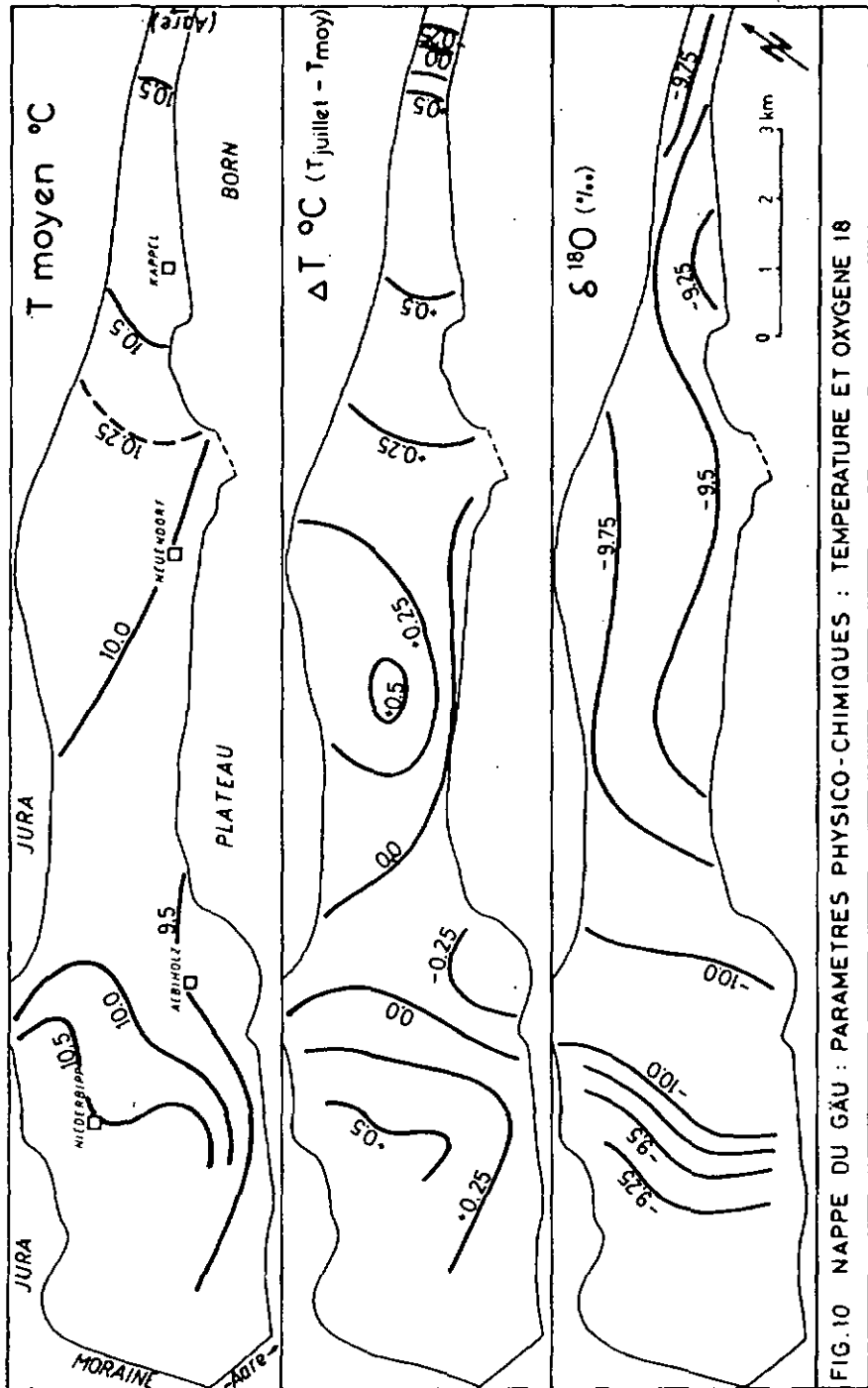


FIG.10 NAPPE DU GAÜ : PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES : TEMPERATURE ET OXYGENE 18

Temp. (air)) : Aebiholz, Oensingen-Cluse, Längwald;

. Apports chauds et lents : Gheid-Olten.

Les apports froids témoignent d'un bassin versant élevé et/ou de circulations peu profondes, les apports rapides de bassins versants peu étendus et proches.

Les teneurs en oxygène 18 (janvier 75, [Fig. 10c]) font ressortir les zones suivantes :

. Apports froids (bassin versant élevé) : l'axe Cluse de Balsthal-Oensingen-Aebiholz;

. Apports chauds (bassin versant bas) : l'axe Niederbipp-Längwald, et la région de Kappel.

Dans le centre de la nappe, malgré de faibles différences des teneurs en oxygène 18, on dénote une tendance aux valeurs plus faibles (bassin versant plus élevé) en s'approchant du Jura, qui rappelle la répartition des sulfates.

Sur la base des températures, des teneurs en ions caractéristiques et en oxygène 18, on peut diviser la nappe en provinces qui s'individualisent :

. par leur alimentation à partir du Jura (Cluse de Balsthal, Oensingen, Aebiholz, et dans une certaine mesure la bordure jurassienne de la nappe à partir et en aval d'Egerkingen). Ces provinces "jurassiennes" se caractérisent par leur faible teneur en oxygène 18, nitrates, chlorures, magnésium et sodium, par leur forte teneur en sulfates et en potassium, ainsi que par une température de l'eau relativement basse (9 à 10°C);

. par leur alimentation à partir de la plaine du Gäu par infiltration verticale (zone centrale de Niederbuchsiten à Gunzgen), ou à partir des contreforts du Jura formés d'éboulis, de molasse, de moraine (régions de Niederbipp et de Kappel-Wangen). Ces provinces "de plaine" se caractérisent par leur forte teneur en oxygène 18, nitrates, chlorures, magnésium et sodium, par leur teneur relativement faible en sulfates et en potassium, ainsi que par une température moyenne de l'eau relativement élevée (plus de 10.3°C).

Il existe naturellement des intermédiaires entre ces deux extrêmes, notamment au centre de la nappe entre Oberbuchsiten, Neuendorf, Härkingen et Egerkingen. Il existe également des zones temporairement sous l'influence de l'une ou l'autre des provinces, suivant l'état hydraulique de la nappe. C'est particulièrement le cas dans la zone d'exutoire Sud-Ouest de la nappe, entre Holzhäusern-Längwald et Walliswil.

L'alimentation par infiltration à partir de la Dünneren n'a pas été considérée isolément, car elle joue probablement un rôle négligeable dans les exemples étudiés. Du point de vue des ions caractéristiques, elle s'apparente aux alimentations en provenance du Jura.

6. RELATIONS SULFATES/OXYGÈNE 18

Nous avons cherché à étayer la relation inverse, en soi logique, existant entre les teneurs en sulfates et celles en oxygène 18, puisque les sulfates sont supposés provenir des formations du Jura, soit d'une altitude supérieure à celle de la plaine. Rappelons pour mémoire que la teneur en oxygène 18 di-

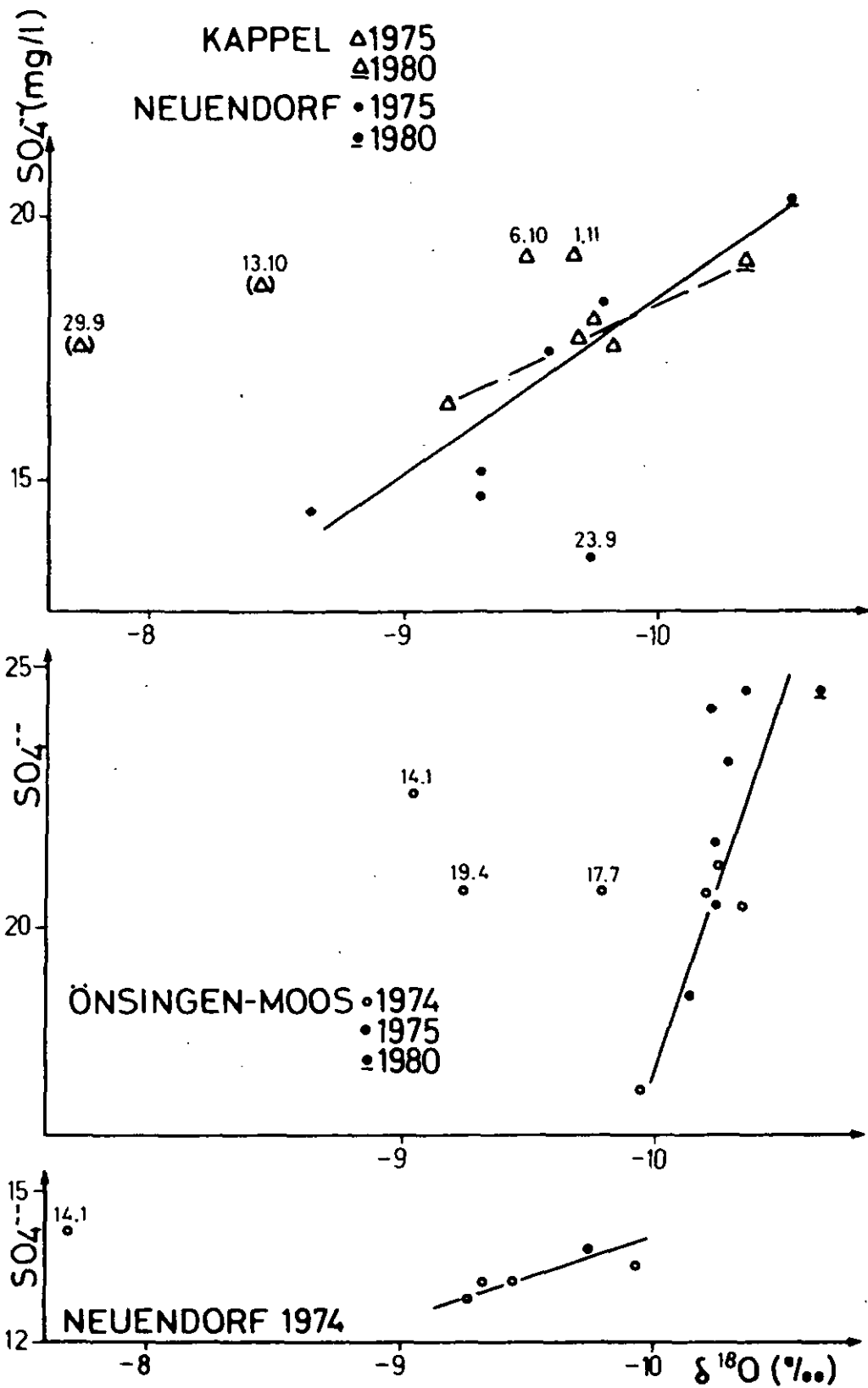
minue avec la température, donc, pour une eau souterraine, avec l'altitude de son bassin versant.

La figure 11 illustre la relation entre les teneurs en sulfates et en oxygène 18 pour les eaux prélevées à Neuendorf, Kappel et Oensingen-Moos en 1974, 1975 et 1980 [Fig. 11]. On constate qu'il existe une corrélation, relativement floue, entre sulfates et oxygène 18. La dispersion des points dépend de l'importance variable des alimentations de plaine par rapport à celles du Jura (1). La pente et l'origine de la droite de corrélation dépendent de l'état hydraulique de la nappe (comparer Neuendorf 1974 et Neuendorf 1975) et de la situation géologique. A Oensingen-Moos par exemple, la pente de la corrélation est plus forte qu'ailleurs, ce qui veut dire qu'une faible variation de l'altitude du bassin versant se traduit par une forte variation des teneurs en sulfates. Ce fait exprime probablement la concurrence entre les alimentations du Dogger, au coeur de la Cluse, et celles du Malm, aux extrémités de la Cluse. Les bassins alimentaires du Malm et du Dogger sont approximativement à la même altitude. Les valeurs de l'oxygène 18 en 1974 suggèrent qu'en période d'étiage prédominent les alimentations à partir du Malm.

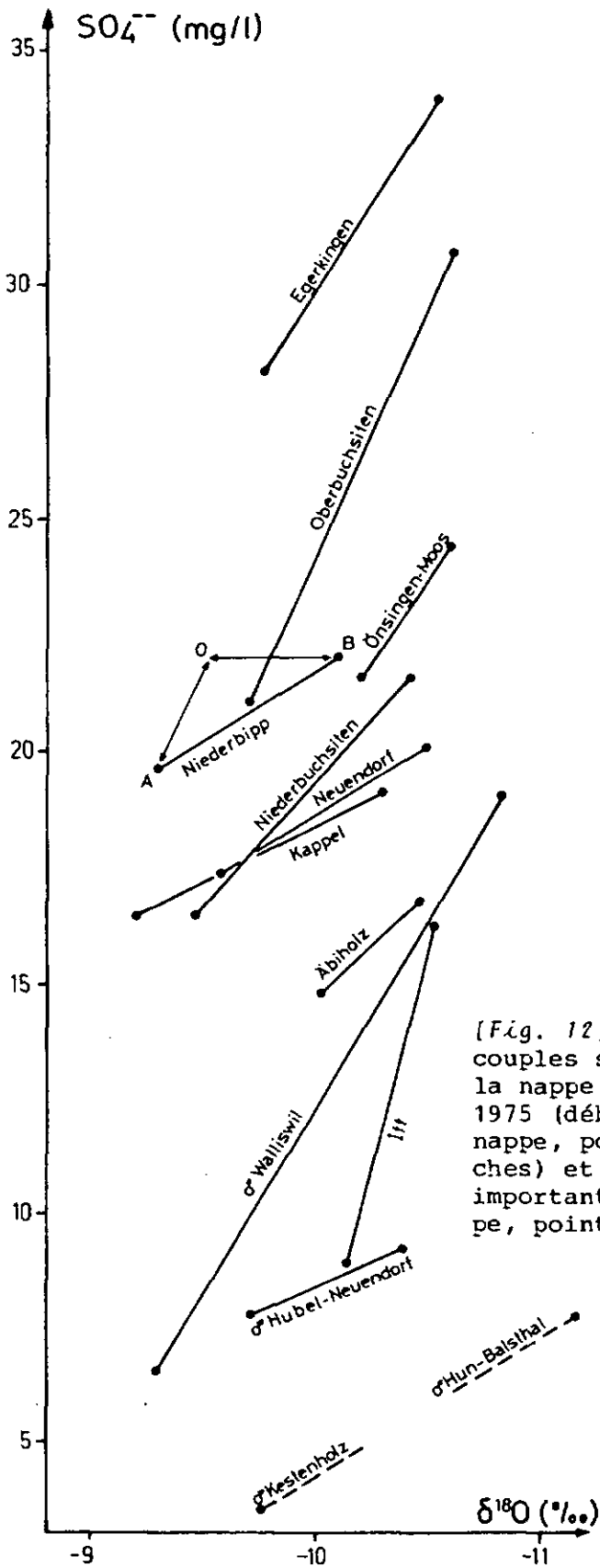
La figure 12 relie deux à deux des valeurs mesurées d'une part en janvier 1975, au début de la recharge principale de la nappe, d'autre part en avril 1980, juste après une très importante recharge printanière, pour neuf puits et une source de la nappe, ainsi que pour deux sources voisines (Hubel-Neuendorf et Hun-Balsthal) [Fig. 12]. Entre ces deux états hydrauliques de la nappe, on a en moyenne les différences suivantes :

niveau de la nappe	: + 2 m
teneurs en sulfates	: + 10 mg/l
teneurs en oxygène 18	: - 0.9 ‰

(1) Voir la séquence d'automne à Kappel, § 7.2.



[Fig. 11] : Corrélations entre sulfates et oxygène 18 pour des puits de la nappe du Gäu. Les valeurs entre () sont incertaines. Les valeurs affectées d'une date correspondent à des événements hydrologiques particuliers (comparer avec [Fig. 2 et 4]).



[Fig. 12] : Relation entre les couples sulfates/oxygène 18 pour la nappe du Gäu, entre janvier 1975 (début de recharge de la nappe, points inférieurs gauches) et avril 1980 (fin d'une importante recharge de la nappe, points supérieurs droits).

Les teneurs moyennes en sulfates dépendent de la situation géologique [Fig. 8a]. La pente et surtout la longueur des droites de la figure 12 dépendent de la stabilité des modes d'alimentation [Fig. 12]. Ainsi les zones pouvant être influencées alternativement par l'une ou l'autre des provinces décrites précédemment se caractérisent par une forte pente et une grande longueur (zone de l'exutoire Sud-Ouest entre Iff et Walliswil, zone de transition centrale entre Niederbuchsiten et Oberbuchsiten). Les faibles pentes dénotent une stable alimentation de plaine (Niederbipp, Neuendorf, Kappel). La diminution en oxygène 18 est alors partiellement due aux variations thermiques saisonnières (schématiquement le segment OB de la [Fig. 12]), et partiellement due à une élévation du bassin alimentaire (schématiquement le segment OA de la [Fig. 12]).

Les résultats obtenus par l'étude de la relation sulfates/oxygène 18 tendent donc à confirmer la typologie d'alimentation déduite des teneurs en ions caractéristiques.

7. ESSAI D'INTERPRÉTATION DE QUELQUES VARIATIONS TEMPORELLES DU CHIMISME DE LA NAPPE

Sur la base de ce qui a été vu jusqu'ici, nous pouvons tenter une interprétation des fluctuations parfois brusques qui affectent l'état chimique moyen de la nappe.

7.1. Aebiholz

Nous avons vu que dans des conditions normales, reflétant l'état permanent de la nappe, l'alimentation de type jurassien

est prépondérante à Aebiholz. L'événement le plus marquant, par rapport à ces conditions, est la chute de minéralisation constatée le 2 décembre 1975.

Cette chute s'accompagne d'un apport important de sulfates et de potassium, et d'une baisse des teneurs en magnésium, ce qui témoigne en faveur d'un apport d'eau en profondeur, à partir du Jura.

D'autre part, l'augmentation des teneurs en oxygène 18, en chlorures et en sodium témoignent en faveur d'un apport d'eau par infiltration à partir de la plaine.

Le déplacement de l'état carbonaté [Fig. 6] suggère quant à lui une brusque ouverture du système permettant une évacuation du CO_2 au contact d'eaux qui en sont pauvres, donc issues d'infiltrations verticales après lessivage du sol. L'ouverture du système pourrait être limitée à la durée des infiltrations verticales (environ une semaine). Il est difficile de savoir si des variations thermiques contribuent au déplacement de l'état carbonaté.

Nous aurions donc affaire, autour du 2 décembre, au mélange soudain d'apports de type jurassien avec des eaux d'infiltration de plaine. Ces mélanges peuvent se produire après des précipitations très importantes comme celles de mi-novembre.

L'évacuation du CO_2 pourrait être facilitée par un dégazage dû à de plus grandes vitesses de circulation. Ces phénomènes sont "fossilisés" par le dépôt d'un glacis de calcite autour de nombreux galets de la gravière de Aebiholz.

Des événements similaires à celui que nous venons de décrire

ont dû avoir lieu vers la fin mai-début juin, et de la fin-juillet à la fin-août, consécutivement à d'importantes précipitations. [Fig. 3]

Les conditions géologiques qui pourraient le mieux expliquer une alimentation préférentielle en profondeur à partir du Jura seraient fournies par des chenaux alluvionnaires très perméables en contact avec des calcaires karstifiés, dans l'axe de la Cluse de Balsthal. Il s'agit là seulement d'une hypothèse.

7.2. Kappel

Hydrauliquement, la nappe réagit très rapidement aux précipitations, en moyenne après un jour [Fig. 4]. Une transmission de pression aussi rapide suppose un transit très court en zone non saturée, probablement grâce au réseau karstique des versants tout proches du Born.

Du point de vue chimique, l'événement le plus marquant se situe à la fin-septembre 1975 [Fig. 4]. Il se décompose en plusieurs phases que nous pouvons interpréter comme suit : Les fortes pluies des 10, 11 et 14 septembre provoquent une crue de la nappe par l'intermédiaire du réseau karstique, particulièrement forte entre le 14 et le 16 septembre, sans que le chimisme en soit sensiblement affecté.

Une semaine plus tard environ, alors que la nappe est en décroissance, les premières eaux d'infiltration de la plaine ont traversé les quelque 5 m de la zone non saturée et s'annoncent par une importante vague de nitrates. Une semaine plus tard encore, l'apport des eaux de plaine s'accroît, peut-être grâce aux précipitations du 25 septembre, et, le sol étant lessivé de son

CO₂, déclenche une ouverture du système carbonaté de la nappe qui se traduit par une chute de minéralisation [Fig. 7]. Le caractère "de plaine" de cette alimentation est attesté par une forte augmentation des teneurs en oxygène 18 (1), ainsi que par une légère augmentation des chlorures, magnésium, sodium et potassium (2).

Une deuxième vague des apports de plaine se manifeste de manière semblable mais plus atténuée entre le 10 et le 15 octobre, liée probablement aux précipitations du 30 septembre. Sitôt ces vagues passées, l'alimentation par le karst redevient prédominante, ce qu'atteste le retour à des faibles teneurs en oxygène 18 et à des plus fortes teneurs en sulfates.

Si l'on en juge par l'évolution des teneurs en sulfates et en nitrates, les précipitations des 16 et 17 octobre provoquent, du 1er au 5 novembre, un apport du karst suivi immédiatement par un apport de plaine. Le déplacement de l'état carbonaté évoque alors le mélange de deux systèmes fermés (flèche ② de la [Fig. 6a]), c'est-à-dire liés à des circulations en zone saturée. Il faut cependant être prudent quant à cette interprétation, l'analyse du 5 novembre provenant d'un autre laboratoire. Toutefois, un cas analogue se présente le 21 juillet, à la fin d'une longue période de précipitations.

(1) Les échantillons du 29.9 et 13.10, mesurés tardivement à partir de bouteilles fortement entamées, ont fourni des valeurs de -4.73 et -7.43 ‰. Bien que ces résultats soient faussés par une évaporation des échantillons, les valeurs originelles doivent être très probablement supérieures à -9 ‰. Nous avons appliqué sur les valeurs mesurées une correction empirique selon une progression géométrique, comme suit :

$$\begin{array}{l} \text{le 29.9} \quad : \quad -4.73 - 3.0 = -7.73 \text{ ‰} \\ \text{le 13.10} \quad : \quad -7.43 - 1.0 = -8.43 \text{ ‰} \end{array}$$

(2) Ici l'augmentation des teneurs en potassium pourrait être liée aux engrais.

Les fortes pluies de mi-novembre ne provoquent pas non plus d'ouverture du système carbonaté, mais tout au plus une amorce de réaction des ions caractéristiques, le 1er décembre. La série d'observations s'arrête malheureusement à ce moment-là.

En résumé, on peut dire que l'alimentation de base de la nappe à Kappel est fournie par le système karstique du Born (ou éventuellement de l'autre versant du Jura), et que cette alimentation de base est fréquemment supplantée par des infiltrations à partir de la plaine, assez violentes et de courte durée.

Après avoir donné deux exemples d'interprétation détaillée du rapport entre le chimisme et l'alimentation de la nappe, nous nous contenterons d'une interprétation plus générale pour les cas de Niederbipp et de Neuendorf.

7.3. Niederbipp

L'évolution des états carbonatés [Fig. 7] suggère qu'au printemps et en automne l'alimentation s'effectue par de fréquents mélanges d'eau en système plus ou moins fermé, probablement par écoulement en zone saturée à partir des versants. Les fortes teneurs en oxygène 18 et en nitrates témoignent d'un bassin alimentaire bas et soumis aux épendages d'engrais. Les apports de versant seraient donc limités dans ce cas aux apports des contreforts du Jura, formés des masses écroulées du complexe Trias-Dogger, recouvertes de vergers et de pâturages.

De juin à septembre, ainsi qu'au début décembre, le déplacement de l'état carbonaté traduit une plus grande ouverture du système, liée probablement à des infiltrations à partir de la plaine, à travers la zone non saturée. Ces infiltrations semblent

moins riches en nitrates (basé sur les observations de début décembre seulement) et limitées à de courtes périodes subséquentes aux très fortes pluies.

A Niederbipp, l'alimentation est donc essentiellement assurée par des apports en système fermé, provenant des versants. La stabilité des équilibres carbonatés est ici plus faible qu'ailleurs, traduisant des variations plus importantes du taux de saturation des carbonates.

7.4. Neuendorf

En contraste avec Niederbipp, la stabilité des équilibres carbonatés est très grande à Neuendorf, probablement en raison de l'éloignement du puits par rapport aux versants du Jura.

Le déplacement de l'état carbonaté [Fig. 6] traduit un système fermé, sauf en juin à la suite des fortes précipitations de fin-mai et du 15 au 20 juin. L'ouverture du système suit immédiatement les précipitations, ce qui dénote une infiltration rapide à partir de la plaine. Cette ouverture se distingue des cas précédents par une augmentation de la minéralisation (sols riches en CO_2). On ne possède malheureusement pas d'analyse des ions caractéristiques pour cette période. La recharge principale s'effectue ensuite, avec un retard d'une semaine environ, sans que l'équilibre carbonaté retrouvé en soit affecté.

Dans les grandes lignes, les fortes précipitations de mi-novembre provoquent des événements similaires, bien que l'ouverture du système ne soit pas aussi manifeste : le début de la recharge est caractérisé par un apport d'eau plus minéralisée et riche en CO_2 , la recharge principale ramenant l'équilibre car-

bonaté "normal". Les variations des ions caractéristiques sont insuffisantes pour être interprétées.

Il semble donc qu'à Neuendorf également le rôle des infiltrations verticales soit secondaire du point de vue quantitatif, la recharge s'effectuant par un apport des zones avoisinantes de la nappe.

8. CONCLUSIONS

L'analyse des paramètres chimiques de la nappe du Gäu a permis de clarifier quelque peu les conditions d'alimentation auxquelles elle est soumise.

Il s'agissait notamment de définir l'influence respective des circulations souterraines provenant du Jura et des infiltrations directes à partir de la plaine. A ce titre, l'étude de la répartition spatiale des ions caractéristiques (sulfates, nitrates, chlorures, magnésium, sodium, potassium) s'est avérée fructueuse. Nous avons pu voir que ces ions se divisent en deux groupes :

- . abondance d'une part en sulfates et potassium pour les eaux qui proviennent du Jura,
- . abondance d'autre part en nitrates, chlorures et sodium pour les eaux d'infiltration de plaine.

Les teneurs en oxygène 18 confirment une subdivision de la nappe selon ces critères. Le magnésium semble plus particulièrement lié aux formations molasso-morainiques.

Cette classification de base permet une subdivision de la nappe en zones d'influences alimentaires moyennes, et fournit en outre un outil conceptuel pour l'interprétation des fluctuations temporelles du chimisme. Cet "outil" a été complété par l'étude de l'évolution temporelle des états carbonatés. Cette dernière s'est avérée particulièrement sensible et significative. Elle permet notamment une bonne distinction entre les influences alimentaires des systèmes fermés aux échanges de CO_2 , assimilables à la zone saturée, occasionnant des fluctuations plus ou moins perpendiculaires aux courbes d'équilibre carbonaté de TILLMANS, et les influences alimentaires des systèmes ouverts aux échanges de CO_2 , assimilables à la zone non saturée, occasionnant des fluctuations plus ou moins parallèles aux courbes de TILLMANS.

Nous avons ainsi obtenu, avec les analyses de l'eau de quatre puits situés dans des contextes hydrogéologiques différents, une idée des phénomènes d'alimentation de la nappe. Comme trait dominant, l'étude fait ressortir que l'alimentation de base de la nappe est fournie par ses bordures jurassiennes, l'infiltration verticale ayant une importance plutôt épisodique. Comme trait accessoire, et plutôt inattendu, mentionnons le caractère "jurassien" de l'alimentation à Aebiholz (loin du Jura), et le caractère local de l'alimentation à Niederbipp (près du Jura).

Certes, la description est encore assez grossière, mais il apparaît comme certain qu'une étude plus complète et plus approfondie, basée sur les mêmes méthodes, permettrait une compréhension beaucoup plus précise des phénomènes d'alimentation de la nappe.

BIBLIOGRAPHIE

BURGER, A. (1972) : *Chimie de la dissolution des roches carbonatées*. Cours d'hydrogéologie karstique, Université de Neuchâtel.

MISEREZ, J.-J. (1973) : *Géochimie des eaux du karst jurassien*. Thèse universitaire, Neuchâtel.

STUMM, W.; MORGAN, J.-J. (1970) : *Aquatic Chemistry. An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters*. Wiley-Interscience, New York.

LEGRAND, L.; POIRIER, G. (1976) : *Chimie des eaux naturelles. Agressivité, corrosivité, traitements, applications numériques*. Eyrolles, Paris.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

- [Fig. 1] Situation de la nappe du Gäu.
- [Fig. 2] Variations chimiques des échantillons au puits de Neuendorf.
- [Fig. 3] Variations chimiques des échantillons au puits de la gravière Aebiholz (Oensingen).
- [Fig. 4] Variations chimiques des échantillons au puits de Kappel.
- [Fig. 5] Variations chimiques des échantillons au puits de Niederbipp-Neu.
- [Fig. 6] Déplacements de l'état carbonaté pour les échantillons des puits de Aebiholz et Neuendorf.
- [Fig. 7] Déplacements de l'état carbonaté pour les échantillons des puits de Niederbipp et Kappel.
- [Fig. 8] Nappe du Gäu : paramètres physico-chimiques : Anions (mg/l).
- [Fig. 9] Nappe du Gäu : paramètres physico-chimiques : Cations (mg/l).
- [Fig. 10] Nappe du Gäu : paramètres physico-chimiques : température et oxygène 18.
- [Fig. 11] Corrélations entre sulfates et oxygène 18 pour des puits de la nappe du Gäu.
- [Fig. 12] Relation sulfates/oxygène 18 pour la nappe du Gäu, pour les couples de valeur de janvier 1975 et d'avril 1980.

[Tabl. 1]

Balance ionique pour 5 puits de la nappe du
Gäu.

INVENTAIRE DES SOURCES LES PLUS IMPORTANTES
DU JURA NORD-OUEST (ENTRE GRANGES, OLTEN,
LIESTAL ET DELÉMONT)

par F. PASQUIER ⁽¹⁾

Résumé

On présente une liste des sources dont le débit moyen est estimé à plus de 100 l/min. Les sources sont caractérisées par leurs coordonnées, altitude, bassin versant, situation géologique d'une part, débit moyen et si disponibles température et chimisme simplifié d'autre part.

Abstract

A list of springs in NW Jura (Switzerland) whose average flow is estimated at more than 100 l/min is given. The springs are characterized on one hand by their coordinates, altitude, watershed and geological situation, and on the other hand, by their average flow, and if available, temperature and simplified chemistry.

(1) Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel,
Rue E. Argand 11, 2000 NEUCHÂTEL.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'un travail de thèse sur la nappe alluviale du Gäu soleurois et bernois (entre Niederbipp et Olten), nous avons établi un inventaire des sources dont le débit moyen a été estimé à plus de 100 l/min, pour une région du Jura délimitée par l'Aare, la Birse et l'Ergolz, entre Granges, Olten, Lies-tal et Delémont. Cet inventaire a été établi sur la base de documents consultés dans les services et laboratoires des eaux des cantons de Soleure, Berne et Bâle-Campagne, et nous le publions avec leur autorisation. Nous remercions vivement ces services cantonaux de leur précieuse collaboration.

Les limites du système étudié ont été fixées dans la mesure du possible sur les niveaux de base que représentent pour l'écoulement les cours d'eau mentionnés, afin de faciliter l'estimation du bilan des eaux souterraines à l'échelle régionale. Ce bilan fait l'objet d'une étude en cours. Nous nous bornerons ici à présenter l'inventaire sous forme de fichier, en signalant quelques-unes de ses possibilités d'explicitation.

2. LES PARAMÈTRES DU FICHER

Le fichier est destiné à caractériser le plus simplement possible les exutoires des écoulements souterrains, du point de vue quantitatif surtout. Il ne contient donc pas toutes les données brutes disponibles sur ces exutoires, mais seulement les données nécessaires à leur localisation topographique, hydrographique et géologique, et à une description sommaire de leur nature.

La description des paramètres figure en tête de liste. Le nombre des paramètres est volontairement limité et le nombre des valeurs fixé à une seule par source. Il s'agit donc, pour les paramètres variables, de valeurs moyennes. Pour la variable principale, le débit, nous avons introduit un facteur de qualité d'estimation de la moyenne (E), dépendant du nombre de valeurs disponibles et de leur répartition temporelle. Nous avons renoncé à le faire pour les paramètres physico-chimiques, pour ne pas charger le tableau et en raison de données souvent trop lacunaires. La qualité bactériologique (B) est représentée très sommairement par un indice et n'est pas forcément représentative, puisque basée la plupart du temps, comme les paramètres chimiques, sur une ou deux analyses isolées.

Les sources sont classées par débit décroissant, à partir du no 51. Les nos 1 à 6 concernent les exutoires des nappes du Gäu et de l'Aaregäu, les nos 7 à 45 sont réservés aux exutoires artificiels (puits), et les nos 46 à 50 se rapportent aux exutoires provoqués par les tunnels jurassiens, où le débit a été sommé par tunnel et le chimisme exprimé en moyennes pondérées. Les Nos 295 à 337 concernent des sources de débit inférieur à 100 l/min, intéressantes pour notre étude à cause de leur proximité de la nappe de Gäu.

3. POSSIBILITÉS D'EXPLICITATION DU FICHER

Le fichier se prête à un traitement d'analyse statistique mettant en rapport les unes avec les autres n'importe lesquelles des variables, pour l'ensemble des sources ou une sélection d'entre elles. Ces traitements peuvent servir de soutien à l'interprétation hydrogéologique. Sans entrer dans le détail,

mentionnons par exemple :

- . le tri selon l'une ou l'autre des variables, ou par le nom de code indiquant dans quel canton et sur quelle commune se trouve la source;
- . la représentation cartographique permettant la détection des zones riches ou pauvres en sources, l'ajustement ou non des sources à l'orographie ou à des accidents tectoniques;
- . les corrélations débit-altitude et température-altitude permettant la détection de bassins versants "anormaux" (liés à la tectonique);
- . l'approche des provenances chimiques : par exemple, les sulfates sont liés à la géologie, mais pas les chlorures, qui semblent plutôt corrélables aux nitrates;
- . l'approche des bilans régionaux; l'ensemble des exutoires de plus de 100 l/min mentionnés à l'intérieur du système défini par l'Aare, la Birse et l'Ergolz, représente un débit global de près de 200'000 l/min pour une surface d'environ 908 km², soit 220 l/min par km² ou une lame de 0.12 m/an.

FICHIER DE DONNEES SUR LES EXUTOIRES DES FAUX SOUTERRAINES DU JURA NW
(SO, BE, BL: REGION ENTRE L'AARE, LA BIRS ET L'ERGOLZ; LIMITES LATERALES
TUNNELS DE GRANGES ET DU HAUNSTEIN-BASISTUNNEL.) Y C. SOURCES LIMITOPHES

IDENTIFICATEURS (VARIABLES):

ROW LABEL = DESIGNATION SIMPLIFIEE DE L'EXUTOIRE, INDICANT D'ABORD
LE CANTON, PUIS LA COMMUNE, PUIS UN NUMERO/SPECIFICATION.

BV = BASSIN VERSANT ET SOUS-BASSIN :

- 1.1 = AARE RIVE GAUCHE EN AVAL D'OLTEN (EXTERNE AU SYSTEME)
- 1.2 = AARE RIVE GAUCHE ENTRE WALLISUL B. BIPP ET OLTEN
- 1.3 = AARE RIVE GAUCHE EN AMONT DE WALLISUL B. BIPP
- 1.4 = AARE RIVE DROITE (EXTERNE AU SYSTEME)
- 2.1 = DUENNERN EN AVAL DE KAPPEL
- 2.2 = DUENNERN ENTRE BALSTHAL-SUD ET KAPPEL
- 2.3 = DUENNERN EN AMONT DE BALSTHAL-SUD
- 2.4 = DUENNERN-AUGSTBACH EN AMONT DE BALSTHAL-SUD (EXKL. 2.5)
- 2.5 = DUENNERN-MUEMLISUTIERBACH EN AMONT DE ST. WOLFGANG
- 3.0 = BIRS INTERNE: RIVE DROITE DE MOUTIER A GRELLINGEN
- 3.1 = BIRS EXTERNE: R. GAUCHE + R. D. SAUF 3.0 + RHIN + ERG DES LIESTAL
- 4.0 = ERGOLZ INTERNE: R. GAUCHE DE GELTERKINDEN A LIESTAL
- 4.1 = ERGOLZ EXTERNE: R. DROITE + R. GAUCHE JO GELTERKINDEN

GEOI = CODE GEOLOGIQUE (No DE L'AQUIFERE+AQUICLUDE LIES A L'EXUTOIRE)

- 1 = QUATERNAIRE "IMPERMEABLE" (MORAINES, LIMONS, ARGILES) AQUICLUDE
- 2 = QUATERNAIRE "PERMEABLE" (GRAVIERS, SABLES) AQUIFERE
- 3 = MOLASSE AQUICLUDE
- 4 = MALM AQUIFERE
- 5 = ARGOVIEU AU SENS LARGE (OXF. INF. - CALLOVIEU) AQUICLUDE
- 6 = HAUPTROGENSTEIN (DOGGER) AQUIFERE
- 7 = AALENIEU AU SENS LARGE (DOG. INF. - GIPSKEUPER) AQUICLUDE
- 8 = HAUPTMUSCHELKALK AQUIFERE
- 9 = MUSCHELKALK INF. (GIPS) AQUICLUDE
- 0 = INCONNU OU NON SPECIFIABLE (FAMILLE, RIVIERE, POMPAGE)

COORDX, COORDY = COORDONNEES

ALT = ALTITUDE DE L'EXUTOIRE, EN METRES SUR MER

DEBIT = DEBIT MOYEN EN L/MIN

ESTIM (F) = QUALITE D'ESTIMATION DU DEBIT MOYEN:

- 1 = BONNE (+- 15%)
- 2 = MOYENNE (+- 30%)
- 3 = MAUVAISE (+- 50%)
- 4 = TRES MAUVAISE (+100% -50%)
- 0 = AUCUNE APPRECIATION DE QUALITE D'ESTIMATION; INDIQUE QU'IL
S'AGIT D'UN DEBIT ARTIFICIEL (PUTS OU FORAGE)

les variables suivantes indiquent la qualite de l'eau; il s'agit souvent
de valeurs isolees peu representatives d'une moyenne. Des commentaires ou
LES DATES DE PRELEVEMENT NE FIGURENT PAS DANS CE TABLEAU.

TEMP = TEMPERATURE EN DEGRES CENTIGRADES

CARR = CARBONATES (DURETE TEMPORAIRE) EN mg CaCO3/litre

SULF = SULFATES EN MG/L

NITR = NITRATES EN MG/L

CHLO = CHLORURES EN MG/L

BACT = QUALITE BACTERIOLOGIQUE, D'APRES LES TENEURS EN COLIFORMES ET/OU

ENTEROCOQUES: 1 = BONNE (PAS DE COLI NI ENTERO)

2 = MOYENNE (PARFOIS QUELQUES COLI OU ENTERO)

3 = MAUVAISE (PRESENCE REGULIERE/ABONDANCE DE C.OU ENT.)

EXUTOIRES (SOURCES) CLASSES PAR DEBIT DECROISSANT

NO	ROW.LABEL.	PV	GE	COORDX	COORDY	ALT	DEBIT	E	TEMP	CARB	SULF	NITR	CHLD	R
1	SO.DILTEN.1	12	20	635200	244200	386	30000	3	10.3	280.	20.0		12.0	
2	SO.DILTEN.2	21	20	634500	244270	400	16800	1		280.	17.0	19.0	11.0	
3	BE.WALISW1	12	21	618550	231830	420	16200	1	9.5	255.	16.0	25.0	10.0	
4	SO.BONING1	12	20	631470	238500	397	5300	2	9.5	230.	20.0	24.6	10.0	2
5	SO.BONING2	12	20	631800	239450	396	1900	2	9.7	265.	37.0	21.0	34.0	
6	BE.WALISW2	12	21	618775	231875	430	200	2		262.	18.7	24.3	11.0	1
7-45 : Numeros reserves pour exutoires artificiels (puits)														
46	SO.WEISTUN	13	60	603000	233500	700	16000	1	9.0	210.	80.0		5.0	3
47	SO.GRENTUN	13	40	596000	230000	520	10000	1	9.5	180.	7.5	2.0	5.0	3
48	SO.HAUATUN	11	80	632000	248000	530	3500	2	11.2	293.	149.	18.3	5.0	2
49	SO.HAUBTUN	11	80	635500	249000	425	3500	2	19.0	570.	335.		14.0	3
50	SO.REICTUN	21	80	629300	246000	610	1200	2	13.0	350.	950.	1.7	7.5	
51	BE.MOUTIE1	31	43	593530	235335	620	14000	2	10.0	198.	4.1	9.9	1.4	3
52	BE.COURT.1	31	43	591830	231250	720	10000	2	6.9	144.	8.5	4.0	3.0	3
53	SO.BALSTA1	23	41	618800	239550	485	9800	1	8.5	171.	7.8	2.9	6.5	3
54	JU.SOYHIE1	31	65	594700	249300	425	5000	4						
55	BE.BRISLA1	31	40	610330	252010	430	4000	4						
56	BE.ROGW11	14	21	628930	233100	435	4000	3	9.5	295.	15.0	25.0	11.2	2
57	SO.GRENCH1	14	43	594125	227255	630	3500	2	7.5	232.	3.0	5.0	5.0	1
58	BL.REIGOL1	40	45	619590	247810	630	3000	2	9.8	180.	16.0	3.4	4.5	
59	SO.AEDERM1	23	43	612080	240130	650	3000	3	10.6	185.	6.0	7.0	2.9	2
60	BE.DUGGTN1	31	65	613500	256700	440	3000	4						
61	BE.CREMIN1	30	43	601060	235810	700	2500	2	8.5	187.	10.0	3.0	2.6	3
62	SO.BALSTA2	22	61	619700	238760	478	2500	2	10.1	174.	21.3			
63	BE.CREMIN2	30	43	600420	236290	640	2100	2	8.0	187.	11.0	4.1	1.2	1
64	SO.MATZEN1	23	43	613800	238550	510	2000	4						2
65	BE.WTEDL1	13	60	615810	233825	475	2000	4	9.0	204.	70.0	14.0	6.3	2
66	SO.OBERDO1	13	43	604065	232400	795	2000	4						
67	JU.VICQUE1	30	43	598675	244450	480	2000	4						
68	BE.COURT.2	30	43	596100	232300	800	2000	4						
69	SO.SELSAC1	13	21	600170	228570	480	1800	2						
70	SO.HERBER1	23	43	608940	236930	630	1700	2						2
71	SO.RUTTEN1	13	03	607220	231410	522	1600	2						
72	BL.REIGOL2	40	89	619050	249120	545	1600	2						
73	JU.DELEM01	31	43	592770	246370	440	1600	1	10.5	250.		16.6	7.0	
74	BL.LUPSIN1	40	60	619700	255600	400	1500	4						
75	BE.LAUFEN1	31	45	603960	251025	360	1500	4						
76	BL.NOELST1	40	61	625020	253950	410	1500	2	9.3	290.	77.0	17.0	9.5	
77	BE.MOUTIE2	30	43	595750	237080	520	1200	2						
78	SO.GAENSB1	30	43	601850	233690	860	1200	2	6.3	140.				2
79	SO.HAEGEN1	21	40	628975	243790	620	1100	1	8.0					
80	SO.GAENSR2	30	03	602300	234500	760	1000	4						3

NO	ROW LABEL.	BV	GE	COORDX	COORDY	ALT	DEBIT	E	TEMP	CARB	SULF	NITR	CHLO	B
81	SO.BEINWI1	30	67	613300	244750	700	1000	2						
82	BL.OBERDO1	40	81	622800	249370	535	1000	2	10.0	280.	160.	25.0	7.0	
83	SO.HERBER2	23	60	608050	238600	925	1000	2						
84	SO.AEDERM2	23	43	612640	240150	660	1000	3						1
85	BE.COURT.3	31	43	591920	231200	740	1000	3						
86	SO.SELZAC2	13	01	600640	228570	470	1000	3						
87	BE.IAUFEN2	31	40	604470	252370	360	1000	4						
88	JL.DELEM02	31	60	594070	247900	415	1000	2	10.2	250.		8.8	3.4	
89	JL.MERVEL1	30	60	606000	242550	640	1000	4						
90	BE.ROESCH1	31	41	602325	252650	390	1000	3						
91	BE.DUGGIN2	31	60	612900	256500	300	1000	4						
92	BL.OBERDO2	40	81	623430	249750	490	950	2	10.5	270.	380.	3.0	4.5	
93	SO.TRIMB.1	11	67	632500	246730	510	900	2	8.8	210.	40.0	1.8	3.0	3
94	SO.BALSTA3	24	43	619340	241235	580	900	2	10.5	183.				3
95	BE.LIESRE1	31	60	599200	249625	385	900	4						
96	BE.DUGGIN3	31	65	613250	254000	450	900	4						
97	BL.OBERDO3	40	81	623030	249430	510	870	2						
98	BL.EPTING1	40	87	629190	248060	590	850	1	10.0	260.	142.	7.2	2.5	
99	SO.HERBER3	21	43	611480	238475	528	800	2						3
100	BE.CORCEL1	30	43	601410	237820	730	800	2	10.0	217.	4.0	2.0	1.6	2
101	BL.BRETZW1	30	87	616150	249315	660	800	2	8.7	240.	180.	4.0	4.0	
102	BL.ZIEFEN1	40	61	619350	252380	450	800	2	10.7	260.	216.	5.0	4.0	
103	SO.OBERDO2	13	40	603360	231025	580	800	3						2
104	SO.ERSCHW1	30	67	608040	246140	470	800	3						
105	SO.SELZAC3	13	01	601260	229415	530	800	3						
106	SO.OBERDO3	13	20	603925	230680	540	800	2	10.0					
107	SO.TRIMB.2	11	67	632820	246860	530	700	3	9.5	235.	28.0	4.0	11.0	3
108	SO.OBERBU1	22	45	624330	240350	535	700	3	8.0	140.				3
109	SO.OBERDO4	13	01	604510	230260	510	700	2	8.9					
110	SO.LOSTOR1	14	60	637425	249775	580	700	2						
111	SO.HOLDER1	24	40	622445	240920	785	700	3	7.5					
112	BL.SISSAC1	40	67	628850	256570	430	650	3						
113	BE.ROESCH2	31	60	601525	252910	400	650	3						
114	BL.LANGBR1	40	67	624270	245100	700	600	2	10.2	200.	19.0	4.0	7.0	
115	SO.MATZEN2	23	43	614250	240675	650	600	2						2
116	SO.MUMLIS1	25	67	620470	241730	515	600	2						
117	SO.TRIMB.3	11	61	633900	246280	440	600	2						
118	SO.SELZAC4	13	01	599650	228850	520	600	3						
119	SO.TRIMB.4	11	05	634240	246380	450	550	2						
120	BE.OBERBI1	13	60	616310	234880	530	550	1	9.3	240.	40.0	12.0	6.0	3
121	BL.BUBEND1	40	65	622100	254450	390	550	2						
122	SO.MUMLIS2	25	01	620100	244360	630	540	3						
123	SO.GUENSB1	13	67	610890	234890	700	520	2						
124	BE.RUMISB1	13	67	616085	235310	630	500	2	9.0	250.	58.0	8.0	4.5	3

NO	ROW	J.AREL.	BV	GE	COORDX	COORDY	ALT	DEBIT	E	TEMP	CARB	SULF	NITR	CHLO	B
125	SO.	MJMI1S3	25	03	620950	244020	645	500	2						
126	SO.	MAT7EN3	25	45	613900	242550	1050	500	3						2
127	BE.	ROGWIL2	14	21	629080	233220	425	500	2						
128	BL.	WALDRU1	40	45	622700	246400	860	500	2						
129	BL.	REIGOL3	40	45	619650	247550	640	500	2						
130	BL.	REIGOL4	40	07	618200	249870	570	500	4	9.0	265.	128.	8.2	3.5	
131	SO.	ERSCHW2	30	65	607760	245987	560	500	1						
132	SO.	HOFSTE1	31	45	604480	259290	400	500	4						
133	SO.	WITTER1	31	43	606230	259290	350	500	4						
134	SO.	HOFSTF2	31	65	604990	258680	420	500	4						
135	SO.	HOFSTE3	31	45	604120	258500	460	500	4						
136	BE.	WALJ.W1	14	21	618800	231080	450	500	4	290.	14.0	38.0	11.0		
137	BE.	ATTISW1	13	03	613000	233450	540	500	4						
138	JU.	COUROU1	30	41	595860	246800	470	500	4						
139	BE.	GRELL1	30	61	611600	254020	400	500	4						
140	SO.	LANGD01	13	01	606250	230170	508	450	2						
141	SO.	LANGD02	13	01	605530	230130	495	450	2						
142	BE.	WAHLEN1	30	63	604750	249450	500	450	3						
143	BE.	CREKIN3	30	03	600450	236190	660	400	2						
144	SO.	BALSTA4	24	03	621162	240966	550	400	2						
145	BL.	BIBEND2	40	61	623250	256220	365	400	2						
146	SO.	BAERON1	30	63	602190	248415	480	400	2						
147	BL.	WALDBI2	40	40	623700	247000	730	400	2						
148	BE.	COVRT.3	31	43	591560	231275	740	400	2						
149	SO.	OENSI1	22	67	619650	238050	580	400	1	7.6	135.	16.0	7.0	1.6	2
150	BE.	NIEOB11	22	01	618350	236200	560	400	4						
151	BL.	HAEFEL1	40	65	632480	250950	680	400	3	5.1	165.	44.0	3.0	2.7	
152	SO.	SEFWEN1	30	40	615040	253555	540	400	3						
153	SO.	LDMN1S1	13	20	603010	230415	560	400	3						
154	SO.	HERRERA	23	41	609400	236850	580	400	4						
155	SO.	EGERKI1	22	05	626370	241820	575	400	3	8.0	245.	17.0		2.0	3
156	BL.	OLTING1	41	83	637570	253340	620	400	4	9.3	260.	69.0	4.5	1.5	
157	BL.	GELTER1	41	67	630600	258400	520	400	3	9.2	220.	45.0	4.9	2.5	
158	BE.	DTTING1	31	40	605400	253230	345	400	3						
159	SO.	HAEGEN2	21	03	627330	243560	720	350	1	7.5					
160	SO.	GUENSB2	13	87	609960	234880	765	350	2						
161	BL.	BUBEND3	40	61	621650	253980	400	350	2						
162	BE.	SCHWAR1	12	21	624780	235080	425	350	2						
163	BL.	LIESTA1	31	60	621125	259820	340	350	4						
164	BL.	WALDBI3	40	81	623490	248600	512	340	2						
165	BL.	ORNAL11	41	67	634400	256000	540	330	2	8.4	270.	17.4	1.6	2.5	
166	BL.	BENWIL1	40	61	625600	249550	570	300	3	10.2	280.	1360.	1.4	3.0	
167	BL.	ZEGLIN1	41	89	635900	251400	585	300	3						
168	BL.	PFEFIN1	31	45	610000	256350	535	300	2	9.8			2.0		

NO	ROW LABEL	BV	GE	COORDX	COORDY	ALT	DEBIT	E	TEMP	CARB	SULF	NITR	CHLO	8
169	SO.BAERCH2	30	40	602750	249510	440	300	3						
170	JU.COUREN1	31	45	595650	240650	470	300	3	9.5	200.	8.0	3.0	6.7	2
171	SO.OBERBU2	22	65	624025	240820	650	300	3	7.7	200.	11.5	4.0	2.0	3
172	SO.MELTIN1	30	70	611570	249320	600	300	2						
173	SO.BETTLA1	13	01	599565	228425	475	300	4						
174	SO.SELZAC5	13	01	601230	229870	580	300	4	8.2					
175	SO.GRENCH2	14	01	594455	227235	610	300	3	7.2					
176	SO.GUENSB3	13	43	611510	234950	720	300	2						
177	BE.LIESBE2	31	65	599150	250225	480	300	4						
178	BE.LIESBE3	31	65	598500	250400	500	300	4						
179	JU.COUROU2	30	40	597550	246300	500	300	4						
180	SO.WELCHN1	23	43	606100	236970	720	300	4						
181	SO.KESTEN1	12	23	624675	235165	435	300	4	9.8	160.	5.0		4.0	2
182	SO.HAEGEN3	21	43	627440	243635	710	270	2						
183	BL.FPTING2	40	87	628640	248045	585	260	1	11.5	242.	308.	2.6	2.3	
184	SO.ERSCHW3	30	67	608080	246143	465	250	3						
185	BE.GRANVA1	30	43	598130	237200	625	250	2	10.0	236.				2
186	BL.WALDBU4	40	05	623210	247210	560	250	2	8.6	205.	10.0	2.7	1.8	
187	BL.BFNWIL2	40	67	625490	249100	600	250	2	8.4	180.	31.0	3.2	3.2	
188	BL.LIEDER1	40	80	622000	249200	570	250	2	9.6	245.	186.	27.0	5.5	
189	SO.NUMISA4	25	43	612570	243260	800	250	3						
190	BE.OBERB12	22	01	617700	235440	540	250	4						
191	SO.RUITEN2	13	43	607870	232690	640	250	2	7.5					
192	SO.TRIMB.5	11	60	631750	247050	590	250	3						2
193	BL.LAEUFL1	40	80	632350	249800	710	250	3	7.6	175.	192.	5.0	3.2	1
194	BL.SISSAC2	41	60	629090	257100	390	250	3						
195	BE.BRISLA2	30	31	606500	251200	390	250	4						
196	BE.ZWINGN1	31	60	606000	253990	340	250	3						
197	BE.OBERB13	13	60	616840	234970	555	250	1	9.8	236.	12.0	5.5	3.0	
198	BE.RUINSB2	13	71	615350	235800	800	240	3	8.6	220.	500.	3.0	5.0	
199	BL.KAENER1	40	60	629580	250770	635	240	3	9.0	280.	23.0	19.9	3.5	
200	SO.SELZAC6	13	01	601560	229100	475	240	4	9.8					
201	SO.BALSTAS	23	45	617900	241380	730	240	2	9.8					3
202	SO.HAEGEN4	21	65	628480	245550	820	230	2	7.7					
203	SO.HAEGEN5	21	40	629160	243800	600	220	2	8.0					
204	SO.EGERKI2	22	43	628380	242400	530	220	2	7.9	234.	24.8		2.1	
205	BL.ZEGLIN2	41	89	636300	251700	600	220	3	8.4	210.	200.	3.6	7.0	
206	SO.HERBERS	23	03	610440	239480	840	220	2						
207	SO.LANGDO3	13	01	606415	230640	508	220	2						
208	SO.BALNBG1	13	70	607470	2346351075		220	2						
209	SO.BALNBG2	13	70	607715	2346901015		210	2						
210	BL.EPTING3	40	61	628450	249400	528	200	2						
211	BL.LAEUFL2	40	89	632270	248950	620	200	3						
212	BL.OBERDO4	40	81	623500	249300	495	200	2						

NO	ROW LABEL	BV	GE	COORDX	COORDY	ALT	DEBIT	E	TEMP	CARR	SULF	NITR	CHLO	B
213	BL.ZIEFEN2	40	60	619600	253200	448	200	2						
214	BL.RAMLIS1	40	60	625560	254885	550	200	2						
215	BE.BELPRA1	30	03	597810	236600	580	200	3		261.	8.0	21.0	5.8	2
216	SO.RIITEN3	13	43	606580	232190	660	200	2	7.5					
217	BE.ATTISW3	13	61	612100	233580	600	200	2						
218	SO.OBERD05	13	01	604920	231610	645	200	2						2
219	BL.REIGOL5	40	45	619850	247350	860	200	2	6.4	170.	9.6	3.9	3.0	
220	SO.AEDERM3	23	03	611485	239920	715	200	3						
221	SO.TRIMB.6	11	65	634500	246950	570	200	2						
222	BL.IIFSTA2	41	60	622380	260325	350	200	4						
223	BL.BOECKT1	41	60	629950	257380	420	200	4	10.0	230.	23.0	12.5	5.2	
224	RE.DITING2	31	60	604250	254750	450	200	3						
225	SO.BETTLA2	13	13	599080	229310	610	180	3						
226	BL.LANGBR2	24	43	626265	243550	840	180	2						
227	BL.RUMLTN1	40	67	631440	252400	480	180	3						
228	SO.HOFSTE4	31	61	604480	259480	390	180	3						
229	JU.COUREN2	31	43	594750	242240	500	180	4						
230	BL.HAEFEL2	40	03	632570	251550	590	170	2	6.4	160.	21.8	5.8	4.0	
231	BE.ATTISW2	13	70	611760	235550	820	150	2						
232	SO.OBERBU3	22	45	624350	240500	560	150	2	8.0					2.
233	BL.BENWIL3	40	71	625460	249320	570	150	2	9.3	230.	50.5	4.3	2.5	
234	SO.WTSEN.1	40	89	634100	250200	730	150	3	8.0	205.	101.	1.4	3.0	
235	BL.HAEFEL3	40	03	633400	251560	675	150	3						
236	BL.IAUW11.1	30	45	616020	246720	780	150	3						
237	BL.IAUW11.2	40	45	618490	247760	810	150	3	7.6	230.		3.7	2.0	
238	BL.IAUW11.3	40	80	617860	249310	600	150	3						
239	BE.WIEDLI2	13	61	614990	233840	525	150	3						
240	BL.OBERD05	40	81	623540	249450	490	150	2						
241	SO.WEICHN2	23	43	606300	237070	735	150	4						
242	RE.WAHLEN2	30	63	605210	248900	490	150	3						
243	BL.LIEDER2	40	45	621010	247740	890	150	3	4.7	200.	11.2	4.0	2.5	
244	RE.GRELLI2	30	65	611600	253725	500	150	4						
245	BL.LIESTA3	41	60	621960	260185	310	150	3						
246	RE.IAUFEN3	30	31	605950	251775	370	150	4						
247	BL.OBERD06	40	81	623030	249200	530	140	2						
248	BL.ZEGLIN3	40	83	634230	250930	695	140	2						
249	SO.GRENCH3	13	43	596880	229000	760	130	1						
250	SO.HAEGEN6	21	43	627300	243800	716	130	2	7.5					
251	BL.ZEGLIN4	41	80	636700	252020	660	130	3	9.0	250.	80.0	3.0	2.5	
252	SO.HOLDER2	24	03	622795	242135	640	120	3	8.5					
253	BE.WIEDLI3	13	01	614500	233500	500	120	2		212.	21.0	12.5	6.0	3
254	SO.MATZEN4	23	45	613200	241270	805	120	4						
255	SO.WANGEN1	21	40	632050	243630	420	120	2	8.1	200.	24.0	2.0	2.3	2
256	SO.BAERCH3	30	70	603925	247720	500	120	2						

NO	ROW LABEL	BV	GE	COORDX	COORDY	ALT	DEBTT	E	TEMP	CARB	SULF	NITR	CHLO	B
257	SO.BALMBG3	13	43	609360	233420	620	120	2	7.0	180.				3
258	BL.REIGOL6	40	87	618650	250700	590	120	2						
259	SO.NEUEND1	22	01	626900	238100	445	120	2	9.6	190.	8.5	26.0	7.0	1
260	BL.WALDBUS	40	45	622170	247040	820	120	2						
261	BL.OBERD07	40	81	623425	248750	508	120	2						
262	SO.BALSTA6	24	43	619400	241160	528	120	2	10.3					3
263	BE.NIEDBT2	22	41	619375	236770	505	120	4						
264	SO.NBUCHS1	22	23	624800	237300	460	120	3	8.5	150.				2
265	SO.RICKEN1	21	40	630935	243625	465	120	3	9.8	265.	12.0			2
266	SO.RICKEN2	21	41	631350	243680	470	120	3						3
267	SO.RICKEN3	21	40	630850	243945	500	120	3	9.0	250.	12.0			3
268	BE.WOLFIS1	13	60	616350	235520	630	120	2	9.4	244.	82.0	1.0	3.1	1
269	BE.ZWINGN2	31	60	605990	254140	380	120	3						
270	SO.LAUPER1	23	43	614910	241550	700	120	4						
271	SO.LAUPER2	23	43	615810	241290	560	120	4						
272	JU.MERVEL2	30	43	603950	243210	580	120	4						
273	JU.COURCH1	30	31	601000	244870	560	120	4						
274	JU.CORBAN1	30	43	603575	243225	560	120	4						
275	JU.CORBAN2	30	31	603550	244625	530	120	4						
276	BL.TENNIK1	40	67	628400	254340	530	120	3	8.2			5.0	3.5	
277	BL.LIESTA4	41	67	623040	259425	340	120	3						
278	BL.STISSAC3	41	60	629250	257400	460	120	3						
279	BE.WIEDLJ4	13	67	614250	234125	595	110	2		203.	12.0	10.0	4.5	3
280	BL.OBERD08	40	03	623900	250000	540	100	2	8.2	222.	270.	1.6	3.0	
281	BL.WALDRU6	40	81	623420	248570	512	100	2						
282	BL.ZEGLIN5	41	89	635870	251290	600	100	2						
283	BL.ROECKT2	41	60	629930	257260	555	100	4						
284	BE.LAUFEN4	30	63	603375	249400	460	100	4						
285	BL.TECKNA1	41	67	633950	255450	490	100	4						
286	BL.REIGOL7	40	43	618780	247450	950	100	2						
287	SO.OBERD06	13	65	605710	232880	990	100	2						
288	BE.BANNWI1	12	21	621655	230820	420	100	3		267.	5.0	47.0	9.7	
289	BL.WALDRU7	40	05	623275	247260	560	100	2						
290	BL.LAEUFL3	40	63	630580	249170	718	100	3						
291	BL.NAEFEL4	40	89	632925	250400	800	100	2	5.4	200.	130.	7.6	3.0	
292	SO.AEDERMA	23	45	611400	240650	910	100	2						3
293	SO.KESTEN2	22	23	624300	236900	480	100	3	8.6	228.	11.9		2.7	
294	SO.KESTEN3	22	21	623700	236350	470	100	3	9.6	184.	7.3		4.6	3
295	SO.WANGEN2	21	40	632200	244100	485	90	3						
296	BL.OBERD09	40	87	625420	247920	720	80	3						
297	BL.RUBENDA	40	65	623210	254300	510	80	2						
298	SO.OBERBU4	22	05	623365	240660	775	80	3						
299	SO.OBERBU5	22	40	624550	240425	540	80	3						3
300	BE.RUMISB3	13	60	615300	235100	710	80	3						

NO	ROW LABEL	BV	GF	COORDX	COORDY	ALT	DEBIT	E	TEMP	CARB	SULF	NITR	CHLOR	P
301	BE.RUMIS84	13	01	615020	235620	800	70	3						
302	SO.OBERBU6	22	45	624875	241425	685	60	4						
303	SO.HERBER6	23	65	608030	238320	900	60	3						
304	SO.DAI STA7	23	41	617810	240160	485	60	4	10.5	215.			10.0	1
305	SO.EGERKI3	22	45	627760	242240	595	60	3	8.1	181.	11.0		2.8	
306	SO.HAEGEN7	21	07	629860	245625	750	60	3	11.5	270.				
307	SO.HOLDER3	24	45	622320	242510	775	60	4	10.0					
308	SO.OBERDO7	13	40	604680	231620	650	60	2						2
309	SO.OENSIN2	22	61	619775	238725	470	60	4						3
310	SO.OENSIN3	22	45	621440	238620	650	60	3	8.1					2
311	SO.OENSIN4	22	40	621875	238200	520	60	3						3
312	SO.OLTEN.3	21	45	633875	242150	600	60	3						
313	SO.RICKEN4	21	40	630750	244050	525	60	3	9.0	185.	15.0			3
314	SO.RICKEN5	21	43	632600	242350	450	60	3						3
315	BE.WOLFIS2	13	60	616630	236400	830	60	2	10.0	261.	21.0	1.0	2.0	2
316	SO.OLTEN.4	21	40	634090	245120	460	50	4						
317	SO.HAEGEN8	21	67	628900	245355	708	50	3						
318	SO.OLTEN.5	12	05	634580	242200	410	50	4						
319	SO.KESTEN4	22	23	624580	237100	470	40	3	8.1	190.	9.7		1.8	3
320	SO.TRIMB.7	11	67	633350	247310	615	40	3						
321	SO.MUMI IS5	25	03	621888	244275	710	35	3	7.3	293.				3
322	SO.HAEGEN9	21	65	628440	245715	920	35	3						
323	BE.RUMIS85	13	71	615100	235925	845	30	3						
324	SO.HOLDER4	24	45	624585	242185	750	30	4						
325	SO.TRIMB.8	11	07	633550	246900	530	30	3						
326	BE.NIEDRI3	22	21	621410	233450	475	30	2	8.5	170.	9.0	15.0	1.8	3
327	SO.OLTEN.6	12	05	634300	241250	480	30	3	8.5					
328	SO.OLTEN.7	21	40	634220	244350	405	30	4						
329	SO.TRIMB.9	11	67	632100	245775	690	30	3						
330	SO.TRIMB10	11	05	634100	246050	430	30	4						
331	SO.WANGEN3	21	45	632830	245380	615	30	3						
332	SO.OLTEN.8	21	40	633780	244700	462	30	3	8.3					3
333	BE.WOLFIS3	13	60	616780	236490	820	30	2	9.0	270.	36.0	0.5	2.0	2
334	SO.HAEGN10	21	67	628240	244975	830	25	3	6.0					
335	SO.OENSIN5	22	43	622000	238900	700	25	3						
336	SO.OENSIN6	22	01	621500	238100	500	20	3						
337	SO.RICKEN6	21	41	631300	243700	475	20	3						3
338	SO.RICKEN7	21	41	631210	243540	450	15	3	9.0	293.	24.0			3
339	SO.KESTEN5	22	01	623900	236625	460	10	3	10.2	280.	22.2		16.1	3
340	SO.LDSTOR2	14	70	637729	249324	487	10	2	13.6	303.	183.	0.1	850.	
341	SO.OENSIN7	22	65	619700	237750	710	7	3	10.1	216.	22.2			