

AGENCE FINANCIERE DE BASSIN RHIN-MEUSE

"Le Longeau" - Rozerieulles

57160 - MOULINS-LES-METZ

DOCUMENT



n° 5913

-----  
ETUDE DU BILAN HYDROLOGIQUE

ET DE L'ÉVOLUTION DE L'ÂGE CES EAUX

DE L'ÉTANG DU STOCK

-----  
S. BOULY

J.P. LABORDE

-----  
*Septembre 1978*

-----  
Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée

et de Prospection Minière

SERVICE HYDROGEOLOGIQUE REGIONAL

B.P. 452 - 54001 NANCY Cedex

# S O M M A I R E

	Pages
<u>RESUMÉ</u> . . . . .	1
<b>I</b> - <u>INTRODUCTION A L'ETUDE DE L'ETANG DU STOCK</u> . . . . .	2
1.1 : Rôle et fonctionnement du plan d'eau . . . . .	2
1.2 : Données géographiques. données physiques et environnement . . . . .	2
<b>1.2.1 : Géographie</b> . . . . .	2
<b>1.2.2 : Données physiques</b> . . . . .	3
<b>1.2.3 : Environnement</b> . . . . .	3
1.3 : Cadre géologique . . . . .	3
<b>II</b> - <u>BILAN EN EAU DE L'ETANG DU STOCK</u> . . . . .	7
11.1 : Eaux entrant dans l'étang . . . . .	7
<b>11.1.1 : Apports naturels</b> . . . . .	7
<b>11.1.2 : Apports artificiels</b> . . . . .	7
11.2 : Eaux sortant de l'étang . . . . .	7
<b>11.2.1 : Départs naturels</b> . . . . .	7
<b>11.2.2 : Départs artificiels</b> . . . . .	8
11.3 : Etablissement du bilan . . . . .	8
<b>III</b> - <u>DONNEES DISPONIBLES</u> . . . . .	10
111.1 : Pluviométrie . . . . .	10
111.2 : Evaporation . . . . .	11
111.3 : Volumes d'eau accumulés . . . . .	11
111.4 : Volumes pompés . . . . .	12
111.5 : Volumes siphonnés . . . . .	12
111.6 : Trop-plein du canal . . . . .	12
111.7 : Volume stocké dans l'étang . . . . .	13
111.8 : Apport du réseau hydrographique . . . . .	13

IV - <u>EVOLUTION THEORIQUE DE L'AGE MOYEN DE L'EAU CONTENUE DANS L'ETANG.</u> . . . . .	14
IV.1 : Défi ni ti on . . . . .	14
IV.2 : Mi se en équati on . . . . .	14
IV.3 : Résol uti on de l' équati on di fférenti elle . . . . .	15
IV.3.1 : Cas gé nérai : $\bar{i} \neq 0$ , V varie avec le temps, . . . . .	16
IV.3.2 : Cas particu lier : $I = \emptyset$ , $V = \text{Cte}$ . . . . .	18
IV.3.3 : Cas particu lier : $1 = 0$ . . . . .	18
IV.4 : Appli cati on à l' échel le mensuel le . . . . .	18
IV.4.1 : Cas où $V_j - i = V_j$ ; $\phi_j = I_j$ . . . . .	19
IV.4.2 : Cas où $V_j - 1 \neq V_j$ et $\phi_j \neq 2 I_j$ . . . . .	19
IV.4.3 : Cas où $V_j - 1 \neq V_j$ et $\phi_j = 2 I_j$ . . . . .	20
V - <u>PRESENTATI ON ET CRI TIQUE DES RESULTATS</u> . . . . .	21
V.1 : Démarche du calcul . . . . .	21
V.1.1 : Calcul du volume d'eau sortant de l'étang . . . . .	21
V.1.2 : Calcul de la variation du volume d'eau stockée . . . . .	21
V.1.3 : Calcul du volume d'eau entrant dans l'étang . . . . .	21
V.1.4 : Estimation du ruissellement . . . . .	22
V.1.5 : Incertitude sur l'estimation du ruissellement . . . . .	22
V.1.6 : Estimation de l'âge moyen des eaux . . . . .	22
V.2 : Résul tats gé néraux aux échel les annuel les et interannuel les. . . . .	23
V.3 : Cri ti que des données . . . . .	23
V.4 : Cri ti que des résul tats . . . . .	24
<u>CONCLUSI ON.</u> . . . . .	26
<u>ANNEXES</u> . . . . .	27-50

Par convention signée entre l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse et l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière de Nancy, il a été décidé de charger le Laboratoire d'Hydrogéologie et d'Hydraulique de l'E.N.S.G. de réaliser l'étude du bilan hydrologique de l'Etang du Stock. Pour ce faire, l'étude a été divisée en deux parties :

. 1ère partie

Elle concerne l'estimation pour la période 1946-1977, du bilan mensuel des flux entrant et sortant de l'Etang du Stock ainsi que l'évolution mensuelle de l'âge moyen des eaux contenues dans la réserve au cours de la même période.

. 2ème partie

Elle concerne l'évaluation des apports des différents bassins versants élémentaires traversés par l'Etang du Stock.

Seule la première partie de l'étude fait l'objet du présent rapport.

Il nous est agréable de pouvoir remercier ici Messieurs les Ingénieurs LÜTZ et RUBAN, ainsi que le personnel des Services de la Navigation de Strasbourg et Mittersheim pour la cordialité avec laquelle ils nous ont accueilli puis conseillé lors de la collecte des données.

## R É S U M É

Le but de cette étude était, d'une part, d'établir le bilan en eau à l'échelle mensuelle, de l'Etang du Stock, puis d'évaluer l'évolution de l'âge moyen des eaux.

La première phase a consisté en la collecte des données auprès du Service de la Navigation tant à Strasbourg qu'à Mittersheim, et auprès de l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse.

L'établissement des flux entrant et sortant de **l'Etang**, qui fait l'objet des annexes 2 et 3 pages 29 et 37, a montré que les données existantes ne permettaient qu'une précision toute relative sur l'estimation des apports du bassin versant, alors qu'ils sont une des composantes essentielles du **bilan** des échanges chimiques dans l'Etang.

L'évolution mensuelle de l'âge des eaux fait l'objet de l'annexe 4 page 45. Les résultats obtenus paraissent fiables, sous **réserve** de vérifications ultérieures par l'analyse chimique ou physique de l'hypothèse d'un bon brassage.

# I - INTRODUCTION À L'ÉTUDE DE L'ÉTANG DU STOCK

## 1.1 - RÔLE ET FONCTIONNEMENT DU PLAN D'EAU

.....

Niché entre les coteaux verdoyants du pays de Sarrebourg, l'Étang du Stock constitue une importante réserve d'eau permettant, comme ses voisins les étangs de Gondrexange au Sud et de Mittersheim au Nord, le maintien d'une tranche d'eau nécessaire et suffisante pour le bon fonctionnement du Canal des Houillères de la Sarre.

De par son rôle de "régulateur", le plan d'eau subit des fluctuations de niveau dues à des causes "humaines" mais Également, comme tout étang, à des causes naturelles, le tout entrant en ligne de compte pour l'établissement du bilan hydrologique développé dans les chapitres suivants.

## I.2 - DONNEES GEOGRAPHIQUES, DONNEES PHYSIQUES ET ENVIRONNEMENT

-----

### 1.2.1 : Géographie

L'Étang du Stock se situe à 8 km en ligne droite à l'Ouest de Sarrebourg, entre la route départementale n° 27 au Nord et la route nationale n° 55 de Metz à Strasbourg au Sud.

Le Canal des Houillères de la Sarre, voie d'eau de première importance, reliant le canal de la Marne au Rhin à la Sarre, le traverse dans sa partie Est. Des petits ruisseaux tels le ruisseau de la Goutte, du Camp, du Pré des Saules ou de la Sainte Croix, drainent la campagne environnante et se jettent dans les nombreuses cornées que compte l'étang.

Il n'existe qu'un seul exutoire naturel. Il s'agit du ruisseau du Stock qui s'écoule en direction Est-Ouest à partir du barrage de Langatte et dont le débit est soutenu par des déversements du type sirphonnage au niveau du barrage.



### 1.2.2 : Données physiques

Le bassin versant de l'Étang du Stock développe une surface de 37,4 km<sup>2</sup> environ, l'étang à lui seul représentant quelques 760 hectares, soit en gros le cinquième. A sa cote maximale, le plan d'eau fournit une réserve de 19 millions de m<sup>3</sup>. Nous joignons en annexe 1 la courbe des surfaces et des volumes correspondants.

### 1.2.3 : Environnement

Il se compose de forêts pour une part importante, le reste de la superficie du bassin versant étant occupé, en dehors de l'étang lui-même, par des terrains à vocation agricole avec une majorité de pâtures.

Quelques petits villages tels Rhodes, Diane-Capelle ou Kerprich-aux-Bois, ont contribué au développement touristique du site et ont fait du plan d'eau et de ses environs un pôle d'attraction régional.

## I.3 - CADRE GEOLOGIQUE

Les conditions géologiques locales étaient favorables à l'existence de plans d'eau dans cette contrée, compte tenu de l'importance des niveaux marneux imperméables formant le substratum de l'étang. Les conditions topographiques étaient également favorables puisque le seul ouvrage artificiel de retenue (barrage de Langattel est de dimensions réduites (500 m environ).

Nous faisons figurer en **page 5**, une carte géologique locale au 1/50 000 de la zone concernée dont le tracé simplifié a été emprunté à la carte géologique détaillée de la France au 1/50 000, feuille Sarre-Union.

Sur le plan stratigraphique et lithologique, les terrains rencontrés sont les suivants, de la formation la plus ancienne à la plus récente :

#### - le *Muschelkalk supérieur* (t<sub>5b</sub>)

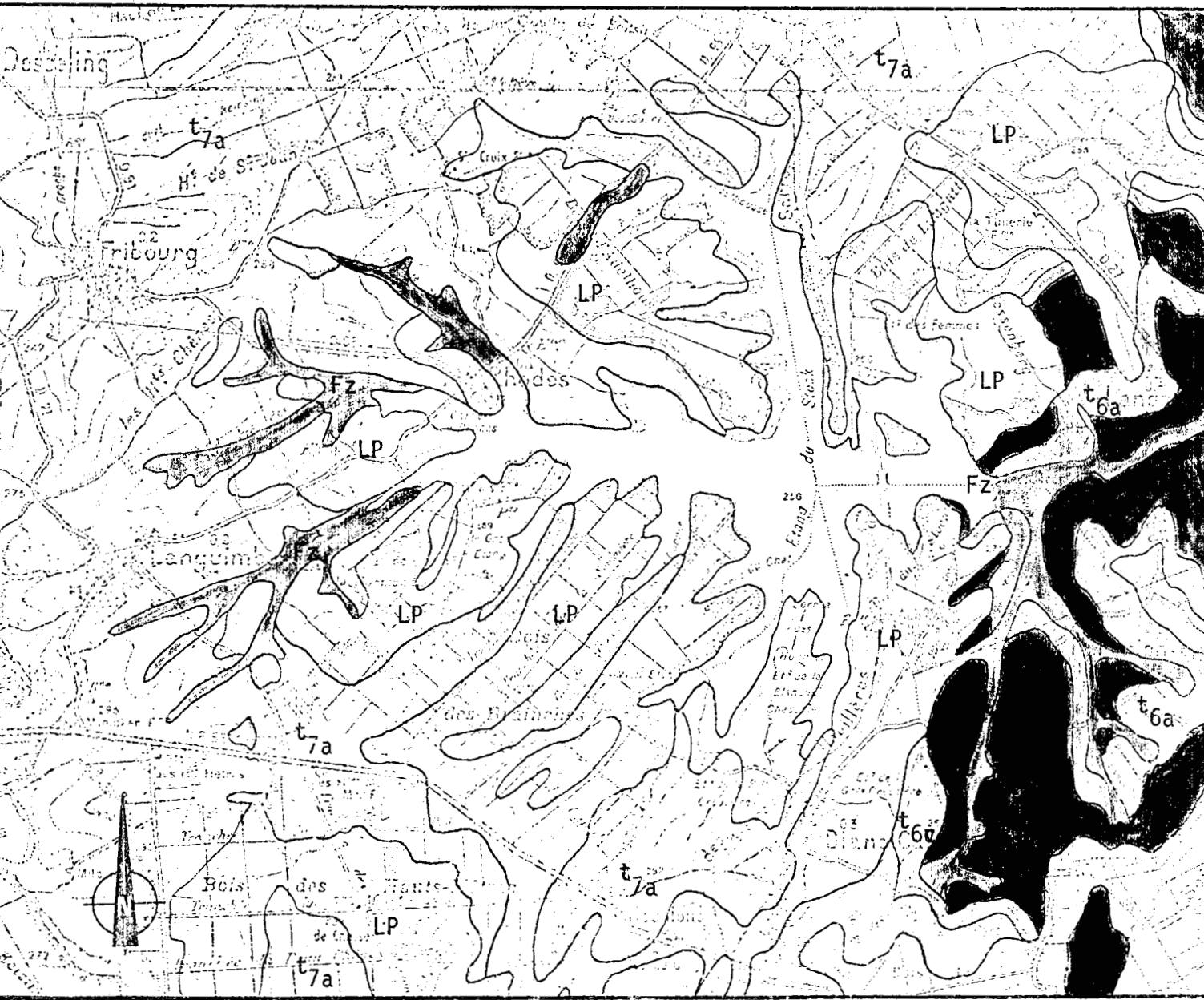
C'est une alternance de calcaires et de marnes ; les niveaux calcaires sont disposés en bancs plus ou moins épais et fournissent la **matière première** aux exploitations locales [carrières de Hemingl. Il se reconnaît par sa faune riche en Cératiteç. Il est peu représenté dans la zone d'étude, si ce n'est sur les flancs de la vallée du ruisseau du Stock.



## BI LAN HYDKOLOGIQUE DE L' ETANG DU STOCK

## Cadre geologique local

Echelle 1/50 000



## LEGENOE

- Fz : Alluvions récentes
- LP : Limons de plateaux
- t<sub>7a</sub> : Keuper inférieur (marnes irisées inférieures)
- t<sub>6c</sub> : Dolomie limita
- t<sub>0b</sub> : Marnes Sariolées
- t<sub>6a</sub> : Dolomie inférieure
- t<sub>5b</sub> : Couches à Lératites

• *la Lettenkohle*

Elle peut être considérée comme un "étage" de transition car elle annonce un changement de la sédimentation qui se développe au Keuper. Elle comprend trois termes qui sont tous représentés dans la partie Est du secteur :

- *la Dolomie inférieure* ( $t_{6a}$ ), puissante de 4 à 5 m
- *les Marnes bariolées* ( $t_{6b}$ ), puissantes d'une quinzaine de mètres
- *la Dolomie Limite* [ $t_{6c}$ ], puissante de 5 m environ

L'ensemble constitue donc une série argilo-dolomitique avec passées riches en débris végétaux et parfois même couches de lignite [horizon d'Amberménil].

• *le Keuper indihien*

Seul le niveau inférieur du Keuper est représenté. Ce sont les *Marnes irisées inférieures* [ $t_{7a}$ ] qui couvrent pratiquement l'ensemble du bassin versant et servent donc de substratum imperméable à l'Étang du Stock.

Cette série marneuse de gypse et sel gemme est puissante de 150 à 200 m lorsqu'elle n'est pas tronquée par l'érosion.

• *les Formations récentes* (LP et Fz)

Sur l'ensemble de la feuille, elles apparaissent relativement développées. Ce sont entre autre les limons des plateaux qui constituent essentiellement un remaniement sur place des formations sous-jacentes et les alluvions modernes du fond de vallée des ruisseaux.

**II - BILAN EN EAU DE L'ÉTANG DU STOCK**

Sur un intervalle de temps  $\Delta t$  quelconque, on peut établir la relation suivante :

$$\text{variation du volume de la réserve} = \text{eau entrante} - \text{eau sortante}$$

Quelles sont les origines de ces eaux ?

**11.1 - EAUX ENTRANT DANS L'ETANG**  
.....

**11.1.1 : Apports naturels**

L'alimentation en eau se fait naturellement à partir du réseau hydrographique qui draine le bassin versant. Ces apports sont sensiblement continus en hiver, mais intermittents en été, du fait de l'absence de nappe phréatique d'importance notable.

Par ailleurs, l'étang est alimenté en eau directement par la pluie tombant à sa surface.

**11.1.2 : Apports artificiels**

Le Service de la Navigation stocke volontairement de l'eau dans l'étang, par déversement à partir du canal qui se trouve à une cote supérieure à celle de l'étang.

Une autre source artificielle, mais involontaire, d'alimentation, est constituée par le trop-plein du canal en aval du bief de partage.

**II.2 - EAUX SORTANT DE L'ETANG**  
-----

**11.2.1 : Départs naturels**

L'eau peut sortir de l'étang au niveau de la digue de Langatte, par une batterie de siphons. L'amorçage de ces siphons se faisant naturellement en fonction de la cote du plan d'eau.

Par ailleurs, il existe un départ d'eau par évaporation à partir de la surface libre de l'étang.

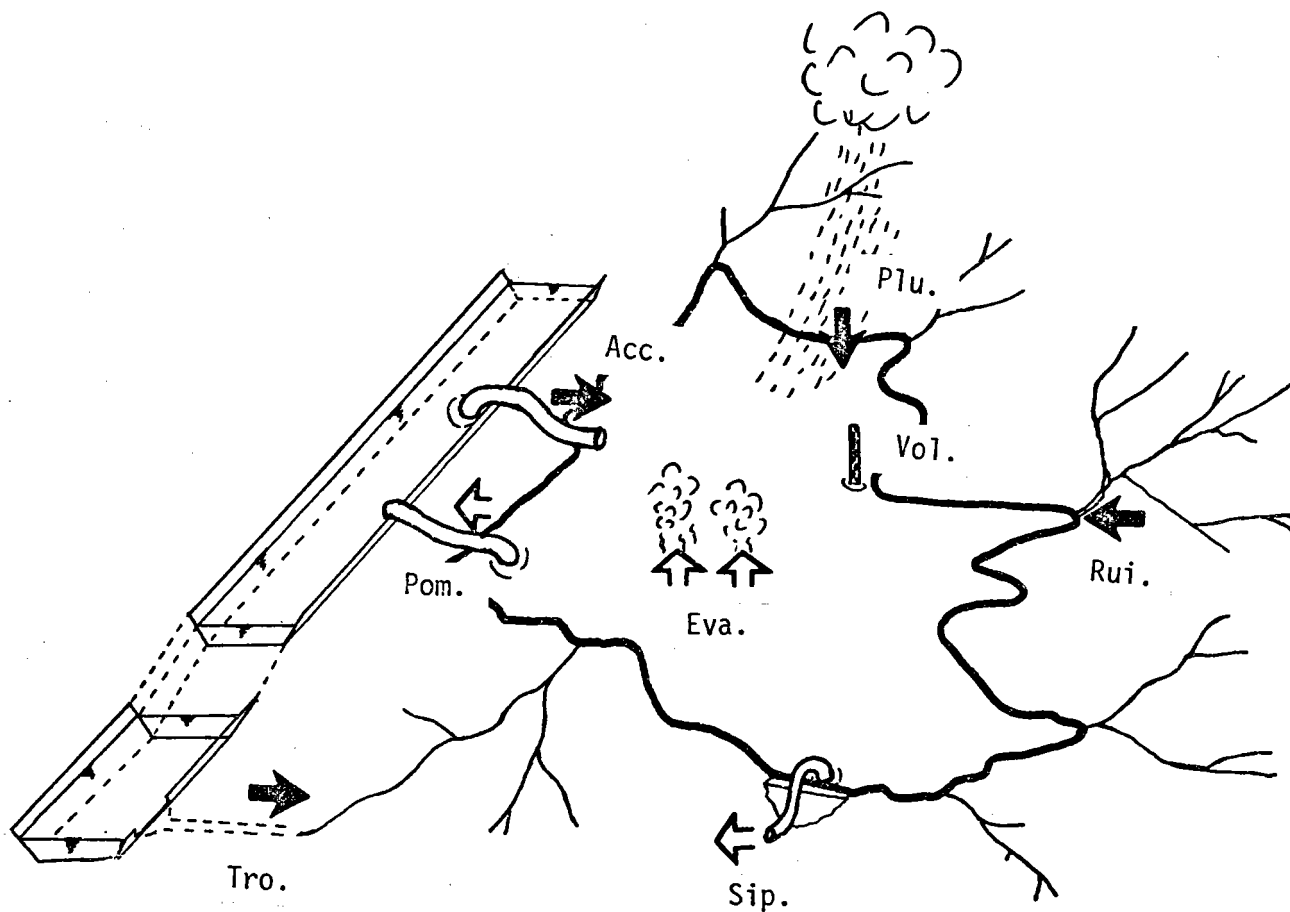
Les fuites à travers la digue ou par infiltration profonde peuvent être considérées comme nulles compte tenu de la nature des terrains.

### 11.2.2 : Départs artificiels

C'est là la raison d'être de l'Etang du Stock. L'eau peut être reprise par une station de pompage pour alimenter le bief de partage.

### 11.3 - ETABLISSEMENT DU BILAN

Sur le schéma ci-dessous, nous avons reporté les différents mouvements d'eau :



Les notations adoptées sont :

	<b>Vol.</b>	Stock d'eau dans l'étang
Entrée d'eau	{	<b>Rui.</b> Ruissellement et apport du réseau hydrographique
		<b>Plu.</b> Pluie sur l'étang
		<b>Acc.</b> Accumulation d'eau à partir du canal
		<b>Tro.</b> Trop-plein du canal
Sortie d'eau	{	<b>Sip.</b> Départ par les siphons
		<b>ha.</b> Evaporation
		<b>Pom.</b> Pompage vers le bief de partage

En détaillant l'écriture du bilan en volume d'eau sur un intervalle de temps  $\Delta t$ , on a :

$$\Delta (Vol) = (Rui + Plu + Acc + Tro) - (Sip + Eva + Pom)$$

### III - DONNÉES DISPONIBLES

Nous avons une équation entre huit variables ; ■■ suffit d'en connaître sept pour pouvoir établir le bilan.

Afin de suivre l'évolution de l'âge de l'eau, ■■ a été décidé de travailler à un pas de temps d'un mois, et cela depuis novembre 1945, date à laquelle l'étang était vide.

#### III.1 - PLUVIOMETRIE

---

Le Service de la Navigation nous a fourni les hauteurs pluviométriques mensuelles de la station de Mittersheim Ecluse 12, de 1945 à 1977, sans lacune.

■■ en était de même pour les données de Gondrexange, mais ce poste étant plus éloigné de l'étang, nous n'avons retenu que **les** données de Mittersheim.

A la demande de l'Agence Financière de Bassin, nous avons également utilisé les résultats d'une étude financée par l'Agence\*.

Cette étude fournissait entre autre, une estimation des pluies moyennes mensuelles sur des carreaux élémentaires de surface. L'Etang du Stock se trouve sur le "carreau 16" et nous avons utilisé également ces données. Cependant, celles-ci n'étaient disponibles que de 1949 à 1970 : pour les années manquantes, nous avons utilisé les pluies de Mittersheim.

Nous avons donc utilisé successivement ces deux séries de données. Les résultats sont relativement peu différents ; nous donnerons, a priori, la préférence à ceux obtenus à la station de Mittersheim, car l'étang se trouve au milieu d'une zone boisée, ce qui correspond au site de Mittersheim, alors que sur l'ensemble du "carreau 16", une bonne partie de la surface, est occupée par des cultures.

---

\* "Etude de la variabilité spatiale des pluies mensuelles sur le bassin de la Pïoselle en amont de Frouard". Laboratoire d'Hydrologie S.M.E.R.S. Montpellier.

## 111.2 : EVAPORATION

Le Service de la Navigation nous a communiqué les résultats enregistrés à deux bacs d'évaporation à surface libre, situés à l'Étang de Mittersheim et à celui de Gondrexange. Ces données sont disponibles de 1945 à 1966 à l'échelle mensuelle. A partir de 1967, elles le sont à l'échelle de la semaine (quatre ou cinq semaines par mois). Les lacunes d'observation sont relativement nombreuses, principalement en hiver, et surtout à Gondrexange. Nous n'avons donc retenu que la série enregistrée à Mittersheim. Nous avons comblé les lacunes de la façon suivante :

- pour les mois d'hiver, en général, les lacunes d'observation sont en fait des évaporations nulles, l'étang étant gelé. Nous avons donc comblé les "trous" par des zéros pour les mois de novembre, décembre, janvier et février, après avoir vérifié que les températures étaient bien voisines de zéro.

- pour les mois d'été, nous avons uniformément remplacé les absences d'observation par l'évaporation moyenne interannuelle du mois correspondant.

Enfin, nous avons, à partir de 1967, rétabli les hauteurs d'évaporation mensuelle en faisant un règle de trois entre le nombre de jours du mois, le nombre de semaines d'observation multiplié par 7, et l'évaporation mesurée durant ces semaines.

Il ne nous a pas paru nécessaire d'affecter ces données d'évaporation d'un coefficient correcteur pour passer de l'évaporation sur un bac à l'évaporation sur l'étang. En effet, il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude sur ce "coefficient de passage" dans notre région. Ce dernier doit d'ailleurs beaucoup varier selon le site étudié.

L'incertitude sur ce terme est de toute façon certainement bien inférieure à celle qui existe sur l'estimation du volume de la pluie.

## 111.3 - VOLUMES D'EAU ACCUMULES

Chaque jour, les volumes d'eau accumulés dans l'étang sont notés. Cette injection d'eau à partir du canal se fait gravitairement et le débit est évalué à partir du nombre de tours d'ouverture de la vanne. Il est difficile d'évaluer la précision de cette mesure, d'autant plus que la vanne n'a jamais été étalonnée depuis sa pose.

Cette précision ne semble pas devoir excéder 10 %. Les bulletins récapitulatifs mensuels nous ont donné les volumes d'eau accumulés mois par mois de 1945 à nos jours, sans lacunes.

#### 111.4 - VOLUMES POMPES

.....

En période de sécheresse, le maintien en eau du canal est assuré par pompage vers le canal, de l'eau de l'étang. La mesure des débits pompés est faite d'après le nombre de pompes mises en oeuvre et leur durée de marche. Cette estimation se base sur les caractéristiques des pompes et la hauteur moyenne d'élévation. Du fait de l'usure des pompes, les caractéristiques ont pu changer. Les pertes de charge varient avec le nombre de pompes en service. Enfin, la hauteur géométrique entre les deux plans d'eau est variable. Tout ceci conduit à considérer également les volumes mensuels pompés avec prudence. Ces résultats nous ont été également fournis par les tableaux récapitulatifs mensuels de 1945 à nos jours.

#### 111.5 - VOLUMES SIPHONNES

.....

La digue de Langatte est équipée d'une batterie de siphons de débit variable, et dont les cotes d'amorçage et de désamorçage sont différentes. L'estimation du volume d'eau siphonné se fait à partir du nombre de siphons amorcés et de leur durée d'écoulement. Or, il n'existe aucun matériel d'enregistrement. C'est un employé du Service de la Navigation qui constate "de visu" l'amorçage des siphons et la durée de leur service. Il est vraisemblable que les volumes mensuels siphonnés qui sont indiqués dans les tableaux récapitulatifs sont également entachés d'erreurs qui peuvent dépasser 10 %.

#### 111.6 - TROP-PLEIN DU CANAL

.....

Lorsqu'un convoi quitte le bief de partage, une partie de l'eau s'écoule vers le bief aval à travers l'écluse. Si le bief aval est plein à ras-bord, un

---

\* Estimation de **1. LÜTZ**, Ingénieur Subdivisionnaire au Service de la Navigation de Mittersheim.



déversoir de décharge ramène l'eau gravitairement à l'Etang du Stock. Chaque bassinnet représente 600 m<sup>3</sup>. Or, en période d'activité, il y a de l'ordre de deux cents bassinées par mois. Il y aurait donc un apport d'environ 120 000 m<sup>3</sup> par mois si le bief aval était continuellement plein à ras-bord, ce qui n'est pas le cas. Par ailleurs, le chiffre de deux cents bassinées par mois est important et tend à diminuer ces dernières années.

En l'absence de données précises, nous nous sommes vu paraître, en accord avec Monsieur LÜTZ, que ces apports par le trop-plein sont vraisemblablement négligeables, vu les incertitudes sur les autres éléments du bilan.

**111.7 - VOLUME STOCKE DANS L'ETANG**  
 .....

Il est estimé tous les jours par lecture d'une échelle. La relation hauteur-volume a été établie après la surélévation de la digue, en 1933 semble-t-il. Nous avons relevé les volumes stockés le dernier jour de chaque mois, de 1945 à nos jours.

**111.8 - APPORT DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE**  
 .....

Il n'existait aucun contrôle des apports du bassin versant. Eventuellement une estimation des volumes d'eau aurait été possible par comparaison aux lames d'eau ruisselées sur des bassins versants comparables et équipés de stations de jaugeage. Mais il n'aurait pas été possible d'obtenir ces volumes sur la période considérée, sans passer par l'intermédiaire de régressions multiples débit-pluies mensuelles. Les résultats auraient alors été peu précis. Aussi avons-nous préféré estimer les apports du bassin versant par déduction à partir de tous les autres éléments connus.

IV - ÉVOLUTION THÉORIQUE DE L'ÂGE MOYEN DE L'EAU  
CONTENUE DANS L'ÉTANG

IV.1 - DEFINITION

**. Notion d'âge moyen**

Nous définirons l'âge moyen des eaux comme étant la moyenne pondérée par les volumes du temps de séjour dans le lac d'une unité de volume d'eau.

Soit T l'âge moyen des eaux du lac et  $t'$  le temps de séjour du volume d'eau  $dV$  ; on a la relation :

$$T = \frac{\int T' dV}{\int dV}$$

**. Age de l'eau transitant dans l'étang**

- L'eau qui arrive dans l'étang (avec un débit  $I_1$ , a un âge  $T' = 0$  (puisque, à son arrivée, elle n'a pas encore séjourné dans l'étang].

- L'eau qui sort de l'étang doit avoir pour âge, l'âge moyen des eaux du lac si on suppose que le brassage est suffisant.

IV.2 - MISE EN EQUATION

Si on suppose que le débit entrant  $I_1$  et le débit sortant  $O$  sont constants dans le temps  $t$ , comment évaluer l'âge moyen T en fonction de  $t$  ?

Le volume V contenu dans la réserve a pour expression :

$$V = V_0 + (I_1 - O) t \quad (V = V_0 \text{ pour } t = 0)$$

Par analogie, avec la notion de quantité de mouvement, appelons "volume de temps", la quantité  $\int T' dV$ . L'âge moyen des eaux est le rapport du volume de temps au volume d'eau :

$$V = \int dV \quad , \quad T = \frac{\int T' dV}{\int dV}$$

$$VT = I T' dV$$

La variation du "volume de temps" durant un intervalle de temps dt infiniment petit, ekit :

$$d(VT) = V dt - \emptyset T dt$$

V dt = augmentation de dt de l'âge du stock d'eau

$\emptyset T dt$  = départ d'eau d'âge moyen T

Mais V et T sont des fonctions du temps t et on peut écrire également la différentielle totale de VT sous la forme :

$$d(VT) = V dT + T dV$$

$$dV = (I - \emptyset) dt \implies d(VT) = T (I - \emptyset) dt + V dT = V dt - \emptyset T dt$$

$$\boxed{dT = \frac{V - I T}{V} dt}$$

ou

$$\boxed{dT = \frac{V - I T}{V} \frac{dV}{I - \emptyset}}$$

Nous obtenons ainsi une équation différentielle linéaire du 1er ordre.

#### IV. 3 - RESOLUTION DE L' EQUATION DIFFERENTI ELLE

.....

Nous avons donc affaire à une équation différentielle linéaire de résolution classique :

### IV.3.1 : Cas général : $I \neq 0$ ; $V$ varie avec le temps

La différentielle se présente sous la forme :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{I}{V} T = 1 \quad (11)$$

On résoud d'abord l'équation sans second membre :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{I}{V} T = 0 \quad (21)$$

$$\frac{dT}{T} = - \frac{1}{V_0 + (I - 0) t} dt$$

$$V = V_0 + (I - 0) t, \quad dV = (I - 0) dt \quad (3)$$

$$\frac{dT}{T} = - \frac{I}{I - 0} \frac{dV}{V}$$

$$T = C V^{-\frac{I}{I - 0}} \quad (4)$$

$C$  est la constante d'intégration ; **or**, nous n'avons résolu que l'équation sans second membre. L'équation générale se résoud en faisant l'hypothèse que  $C$  n'est, non plus une constante, mais une fonction de  $V$  uniquement. Dérivons l'expression (4) :

$$\frac{dT}{dV} = C \left[ \frac{dV}{dV} \left( -\frac{1}{I - 0} \right) + V^{-\frac{I}{I - 0}} \left( -\frac{I}{I - 0} \right) \right] \frac{dC}{dV}$$

L'équation différentielle globale se met également sous la forme (11 et (3) :

$$dT = \left[ 1 - \frac{I}{V} T \right] \frac{dV}{I - 0}$$

$$\frac{1}{1 - 0} \left[ 1 - \frac{I}{V} T \right] = \frac{I}{I - 0} C V^{-\frac{I}{I - 0}} + V^{-\frac{1}{I - 0}} \frac{dC}{dV}$$

$$\frac{1}{1 - 0} \frac{1 - C V^{-\frac{I}{I - 0}}}{(I - 0) V} = - \frac{I}{1 - 0} C V^{-\frac{I}{I - 0}} + V^{-\frac{1}{I - 0}} \frac{dC}{dV}$$

$$\frac{1}{1-0} - \frac{I}{1-0} C V^{-\frac{2I-0}{I-0}} = -\frac{1}{1-0} C V^{-\frac{2I-0}{I-0}} + V^{-\frac{I}{I-0}} \frac{dC}{dV}$$

$$\frac{dC}{dV} = \frac{1}{1-0} V^{\frac{1}{I-0}}$$

Pour intégrer ceci, il convient de distinguer deux cas :

$$+ \frac{I}{1-0} + - 1 \quad 0 \neq 2I$$

$$C = \frac{1}{2I-0} V^{\frac{2I-0}{I-0}} + C'$$

C' étant une constante pure d'intégration :

$$I \neq 0, 2I \neq 0 : T = \left| \frac{1}{2I-0} V^{\frac{2I-0}{I-0}} + C' \right| \left| V^{-\frac{I}{I-0}} \right|$$

$$+ \frac{1}{1-0} = -1 \quad dC = \frac{1}{1-0} \frac{dV}{V}$$

$$C = C' V^{\frac{1}{1-0}}$$

C' étant une constante pure d'intégration :

$$T = C' V^{\frac{1}{I-0}} V^{-\frac{1}{I-0}}$$

$$2I = 0 : T = C' V^{\frac{1-I}{I-0}}$$

IV.3.2 : Cas particulier :  $I = 0$  ,  $V = \text{Cte}$

$$dT = \left[ 1 - \frac{I}{V} T \right] dt$$

$$\frac{dT}{1 - \frac{I}{V} T} = dt$$

$$-\frac{V}{I} \text{Ln} \left[ 1 - \frac{I}{V} T \right] = t + C$$

$$1 - \frac{I}{V} T = e^{-\frac{I}{V} t + CI}$$

$$I = 0 : T = \frac{V}{I} \left[ 1 - e^{-\frac{I}{V} t + CI} \right]$$

IV.3.3 : Cas particulier :  $\ddot{i} = .D$

$$dT = dt$$

$$T = T_0 + t$$

#### IV.4 - APPLICATION A L'ECHELLE MENSUELLE

---

Nous ferons l'hypothèse que le débit entrant  $1_j$  et le débit sortant  $0_j$  (en  $\text{m}^3/\text{mois}$ ), sont constants durant le mois  $j$ .

- Soit  $T_{j-1}$  l'âge moyen des eaux à la fin du mois  $j-1$  et  $T_j$  l'âge moyen à la fin du mois  $j$  (exprimé en mois).

- Soit  $V_{j-1}$  et  $V_j$  les volumes d'eau (en  $\text{m}^3$ ) contenus dans la réserve à la fin des mois  $j-1$  et  $j$ .

On a alors les relations suivantes :

IV.4.1 : Cas où :  $V_{j-1} = V_j$  ;  $\emptyset_j = I_j$

$$1 - \frac{I_j}{V_j} T_j = e^{-\frac{I_j}{V_j} (t_j + C)}$$

$$1 - \frac{I_j}{V_j} T_{j-1} = e^{-\frac{I_j}{V_j} (t_{j-1} + C)}$$

$$\frac{1 - \frac{I_j}{V_j} T_j}{1 - \frac{I_j}{V_j} T_{j-1}} = e^{-\frac{I_j}{V_j} (t_j - t_{j-1})}$$

$$T_j = \frac{V_j}{I_j} \left[ 1 - e^{-\frac{I_j}{V_j} \left( 1 - \frac{I_j}{V_j} T_{j-1} \right)} \right]$$

IV.4.2 : Cas où :  $V_{j-1} \neq V_j$  et  $\emptyset_j \neq 2 I_j$

$$T_j = \frac{1}{2 I_j - \emptyset_j} V_j + C \cdot V_j^{-\frac{I_j}{I_j - \emptyset_j}}$$

$$T_{j-1} = \frac{1}{2 I_{j-1} - \emptyset_{j-1}} V_{j-1} + C \cdot V_{j-1}^{-\frac{I_{j-1}}{I_{j-1} - \emptyset_{j-1}}}$$

$\frac{1}{2 I_j - \emptyset_j} V_j + T_j$	$\frac{1}{2 I_{j-1} - \emptyset_{j-1}} V_{j-1}$	$I_{j-1} - \emptyset_{j-1}$
-------------------------------------------	-------------------------------------------------	-----------------------------

IV.4.3 : Cas où :  $V_{j-1} \neq V_j$  et  $\theta_j = 2 I_j$

$$T_j = C \cdot V_j \frac{1 - I_j}{1_j - 0_j}$$

$$T_{j-1} = C \cdot V_{j-1} \frac{1 - I_j}{1_j - 0_j}$$

$$T_j = T_{j-1} \left( \frac{V_j}{V_{j-1}} \right) \frac{1 - I_j}{1_j - 0_j}$$



## V - PRÉSENTATION ET CRITIQUE DES RÉSULTATS

### V.1 - DEMARCHE DU CALCUL

.....

Nous allons détailler ici la façon dont nous avons mené nos calculs. Pour en faciliter la compréhension, nous suivrons le cas particulier de la ligne correspondant au bilan pour le mois d'octobre 1951 (annexe 2 , la pluie utilisée est celle de Mittersheim.

AGE MOYEN	RESERVE	ACCUMULE	RUISSELE	PLUIE	EVAPORE	SIPHONNE	POMPAGE	DATE	INCERTITUDE
9.187	15463000.	0.	388321.	539.	679.	0.	0.	510.	431155.
10.059	17580000.	0.	211832.	40.	570.	0.	617024.	5110.	483415.

#### V.1.1 : Calcul du volume d'eau sortant de l'étang

On utilise directement le volume pompé (617 024 m<sup>3</sup>) et le volume siphonné (0 m<sup>3</sup>). Le volume d'eau évaporé est estimé en multipliant la hauteur d'évaporation (0.057 ml par la surface de l'étang correspondant à un cube moyen de 18 463 000 m<sup>3</sup> (volume au 30 septembre) + 17 680 000 m<sup>3</sup> (volume au 31 octobre), le tout divisé par 2, soit 18 071 500 m<sup>3</sup>.

La relation surface-volume peut être approchée par la formule suivante, tirée des barèmes donnés en annexe 1.

$$S = 3440 \quad V^{0.457}$$

$$S = 7\,128\,609 \text{ m}^2$$

Le volume évaporé est donc de : 406 331 m<sup>3</sup>.

#### V.1.2 : Calcul de la variation du volume d'eau stocké

Comme explicité plus haut, la variation du volume est :

$$AV = 17\,680\,000 - 18\,463\,000 = -783\,000 \text{ m}^3$$

#### V.1.3 : Calcul du volume d'eau entrant dans l'étang

On utilise directement le volume accumulé par le Service de la Navigation (0 m<sup>3</sup>). Le volume d'eau apporté par la pluie est obtenu en multipliant la hauteur de pluie (0.004 ml par la surface de l'étang, calculée comme précédemment (7 128 609 m<sup>2</sup>), soit 26 514 m<sup>3</sup>.

#### V.1.4 : Estimation du ruissellement

Par différence entre termes du bilan, on obtient l'équation :

$$R_{ui} = AV + [Sip + Eva + Pom) - [Plu + Accl$$

$$R_{ui} = - 783\ 000 + [0 + 406\ 331 + 617\ 0241 - [28\ 514 + 01$$

$$R_{ui} \approx 211\ 800\ m^3$$

#### V.1.5 : Incertitude **sur** l'estimation du ruissellement

L'erreur sur l'estimation du ruissellement est égale à la somme des erreurs sur les différents termes du bilan.

Nous avons retenu les erreurs probables suivantes :

- l'échelle donnant la hauteur du plan d'eau est lue à 2 m près ;
- tous les débits donnés par le Service de la Navigation sont connus à 10 % près.

L'incertitude sur l'estimation du ruissellement est donc de l'ordre de :

$$0.06 \times 7\ 128\ 609 + 0.1 \times (0 + 0 + 617\ 0241 = 489\ 418\ m^3$$

Dans le cas où le ruissellement estimé est négatif et supérieur en valeur absolue de l'incertitude. le bilan mensuel est "douteux" puisque le ruissellement **réel** ne saurait être négatif. On indique alors par un \* ce mois "douteux".

#### V.1.6 : Estimation de l'âge moyen des eaux

Les volumes entrant I et sortant Ø sont estimés à partir des résultats précédents :

$$1 = 28\ 514 + 0 + 211\ 800 = 240\ 314$$

$$0 = 0 + 406\ 331 + 617\ 024 = 1\ 023\ 355$$

Connaissant les valeurs relatives de 1 et 0 et la valeur de AV [- 783 000 m<sup>3</sup>], on établit l'âge moyen des eaux par une des formules citées dans le paragraphe IV.4.

L'âge moyen des eaux était à la fin septembre 1951 : 9,187 mois.

$$T_j = \frac{1}{2 I_j - \emptyset_j} V_j + \left[ T_{j-1} - \frac{1}{2 I_j - \emptyset_j} V_j - 1 \right] \left[ \frac{V_j}{V_j - 1} \right] \frac{I_j}{I_j - \emptyset_j}$$

Tous calculs faits, on trouve un âge moyen des eaux de 10.06 mois à la fin octobre 1951.

V.2 - RESULTATS GENERAUX AUX ECHELLES ANNUELLES ET INTERANNUELLES

---

A la fin de chaque année, nous avons établi une ligne supplémentaire donnant les totaux relatifs à une année légale. A cette occasion, nous avons ramené le volume ruisselé en lame d'eau équivalente, en considérant une surface moyenne de bassin versant de 32,4 km<sup>2</sup>. En fin de calcul, nous donnons, de la même façon, les différentes moyennes interannuelles dans les mêmes unités que précédemment (m<sup>3</sup> et 1/10 de mml. En dernier lieu, nous avons établi les coefficients de corrélation entre les différentes valeurs mensuelles des volumes accumulé, ruisselé, plu, évaporé, siphoné et pompé.

V.3 - CRITIQUE DES DONNEES

---

Le calcul de l'âge moyen des eaux ne présente pas de difficultés majeures, si on peut supposer qu'à l'échelle du mois, le brassage est suffisant, et surtout si les différents termes du bilan sont bien connus. La comparaison du volume ruisselé à l'incertitude sur son estimation, a permis de mettre en évidence, lors des premiers passages, une dizaine de bilans mensuels douteux. Cinq de ces derniers étaient dus à des erreurs de transcription. Le fait que cinq autres demeurent "douteux" montre que ce test est relativement puissant compte tenu de la précision des données.

L'année 1946 regroupe la majorité des bilans non équilibrés : environ 3 million de m<sup>3</sup> "dans la nature" en août 1946 et environ 1,5 million en octobre 1946 !

Ces erreurs très importantes n'ont pu être expliquées, mais elles sont certainement liées à la phase de remplissage de l'étang. Les autres bilans non équilibrés le sont d'une façon beaucoup moins spectaculaire. Dans l'état actuel, et après avis du Service de la Navigation, rien ne nous permet de détecter la source de ces erreurs.

Celles-ci ne doivent vraisemblablement pas avoir d'influence à l'échelle annuelle (sauf celles de 1946).

Les calculs ont été menés, soit avec la pluvie de Mittersheim, soit avec celui du "Carreau 16". Pour déterminer la meilleure origine des données, on est tenté de maximiser le coefficient de corrélation entre la pluie et le débit. A l'échelle mensuelle, on constate que c'est la pluie de Mittersheim qui donne la meilleure corrélation avec le débit (0,51 contre 0,461. Cette corrélation est très lâche, mais c'est normal au niveau mensuel. Pour confirmer ce résultat, nous avons effectué les corrélations entre les valeurs annuelles de 1949 à 1970. On constate avec surprise que celles-ci ne sont qu'à peine moins lâches, et c'est la pluie du "Carreau 16" qui donne la meilleure corrélation avec le débit (0,57 contre 0,471.

Des valeurs relativement si faibles, laissent songeur quant à la qualité d'ensemble des données. On en aura une idée plus précise en faisant remarquer qu'en moyenne, l'incertitude est de l'ordre de 400 000 m<sup>3</sup> par mois, alors que le débit moyen mensuel estimé est de l'ordre de 550 000 m<sup>3</sup>.

#### V. 4 - CRITIQUE DES RESULTATS

.....

Les résultats sur les bilans n'amènent pas de commentaire particulier, puisqu'il s'agissait là de faire uniquement des additions et des soustractions à partir des données.

■ n'a pas été besoin de lire entre les lignes pour connaître notre sentiment sur ces dernières.

Qu'en est-il par contre des résultats sur l'âge moyen des eaux ? Dans ce cas, les données utilisées sont les volumes contenus dans la réserve, et non plus les différences de volume.

**Les** âges se cumulent pour partie, et on peut raisonnablement penser que les incertitudes de  $400\ 000\ \text{m}^3 \times T$  mois, sont négligeables devant  $20\ 000\ 000\ \text{m}^3 \times T$  mois. Ainsi, les âges moyens donnés dans l'annexe 3 sont certainement relativement exacts, sauf peut-être dans les phases de remplissage.

Enfin, il faut noter que le choix de la pluie de Mittersheim ou du "Carreau 16" n'a aucune influence sur l'âge des eaux.

## CONCLUSION

Cette étude a montré que les données disponibles et pourtant abondantes, ne permettent d'établir un bilan mensuel que d'une façon très approchée. L'estimation indirecte des débits issus du bassin versant ne saura jamais remplacer des mesures "sur le terrain". Cette claire évidence justifie, s'il le fallait encore, l'existence de stations de jaugeage, d'autant plus que ces doutes étaient apparus de fort longue date. L'Ingénieur Subdivisionnaire constatait, dès les années 30, d'assez curieuses variations du coefficient de ruissellement estimé. Il oscillait entre 0.15 et 0.86 selon une note manuscrite de 1932 (\*). Nous avons retrouvé en particulier les chiffres de 1921 : 0.15, de 1924 : 0.30 et de 1930 : 0.5

L'estimation de l'âge moyen des eaux et de leur évolution a été néanmoins possible avec une bonne précision. A l'échelle interannuelle, on constate que cet âge moyen est de 17 mois (apports annuels de 14 Mm<sup>3</sup> dans une réserve de 20 Mm<sup>3</sup>). Ce calcul ne correspond à rien dans la réalité puisque tous les paramètres sont variables dans le temps. Cependant, il permet de mettre en évidence l'influence de la gestion de l'étang par le Service de la Navigation ; en l'absence d'accumulation artificielle d'eau, l'âge moyen interannuel s'élèverait à 19 mois.

Un dernier point mérite d'être noté : les apports directs de la pluie sur l'étang représentent environ 40 % du total des apports. L'hypothèse d'un bon brassage des eaux est vraisemblable, compte tenu de la faible épaisseur de la tranche d'eau [de l'ordre de 4 mètres en moyenne]. Si cela n'était pas le cas, tout se déroulerait sensiblement comme si le volume utile de la réserve était plus faible ; il s'en suivrait une homothétie du graphique des temps dans l'annexe 4. Cela ne gênerait guère compte tenu du but poursuivi qui est de mettre en évidence d'éventuelles dégradations de la qualité des eaux en fonction de leur âge.

---

(\*) communiqué par Monsieur LUTZ.

