



13952-3 RM



AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE  
57160 MOULINS-LES-METZ



13952-3

ETUDE METHODOLOGIQUE DES BASSES EAUX

ESTIMATION DU RESEAU MINIMAL

DE POINTS DE MESURE

(3ème rapport d'avancement des travaux)

D. FRANCOIS  
M. SARY

CENTRE D'ETUDES GEOGRAPHIQUES DE L'UNIVERSITE DE METZ  
57045 METZ CEDEX 01

Juillet 1990

## ESTIMATION DU RESEAU MINIMAL DE POINTS DE MESURE

Les campagnes de jaugeages effectuées jusqu'à présent en période estivale sont basées sur un réseau de points de mesure déterminé lors de reconnaissances préalables sur le terrain. Ce réseau de points était élaboré en fonction d'un critère théorique sommaire (une mesure significative pour une surface de l'ordre de 5 à 10 Km<sup>2</sup>) et en fonction des contraintes des écoulements (affluents, prises et rejets...).

Il est possible aujourd'hui d'essayer d'élaborer une méthode d'estimation des points de mesure nécessaires et suffisants pour la réalisation des profils hydrologiques, tout en définissant des ordres de priorité de bassins à traiter pour la mise en oeuvre des campagnes de mesure. Cette méthode sera testée sur certains bassins où des mesures ont déjà été effectuées.

### I - HIERARCHISATION DES BASSINS ET ORDRE DE PRIORITE DES MESURES

L'estimation du réseau minimal des points de mesure peut être effectué en prenant en compte :

- l'organisation du chevelu hydrographique : La hiérarchisation du réseau hydrographique nécessite une classification ordonnée des rivières, la détermination du nombre de rivière par ordre et la mesure des longueurs correspondantes. Ces opérations longues ne peuvent être entreprises dans cette étude.

- La taille des bassins-versants que l'on peut hiérarchiser à partir des surfaces. Cette méthode est plus facile à mettre en oeuvre du fait de l'existence de données ou de leur détermination rapide.

C'est cette deuxième méthode que nous utiliserons.

## 1) Rôle déterminant de la surface

Dans le rapport d'avancement des travaux précédent (Cf. 2ème rapport), nous avons vu qu'il y a une relation entre le débit  $Q$  et la surface correspondante du bassin-versant, selon la loi générale  $Q = h A^g$ , où  $h$  et  $g$  sont des paramètres caractéristiques de chaque bassin ( $h$  est fonction de la pluviométrie et  $g$  dépend des modalités d'écoulement) - En coordonnées logarithmiques, la fonction se traduit par une droite ou des segments de droite :  $\log Q = g \log A + \log h$ .

En basses eaux non influencées (absence de précipitations, de prises et rejets, de pertes karstiques...), les rendements hydrologiques, dans un bassin-versant, fluctuent de manière homogène d'une campagne de mesure à l'autre :

- $g$  reste constant car il dépend des facteurs permanents qui conditionnent les écoulements en étiage (Structure hydrogéologique, entaille du réseau hydrographique...)
  
- $h$  varie en fonction de l'état des réserves en eaux souterraines qui varie de manière similaire, dans un milieu donné, d'une campagne de mesures à l'autre.

De ce fait, sur une rivière donnée, les débits mesurés sont étroitement liés aux surfaces des bassins-versants correspondants aux points de mesure.

La fonction  $\log Q = g \log A + \log h$  induit également, que le long d'un drain principal, il y a une progression géométrique corrélative des débits et des surfaces. Cette progression géométrique des surfaces peut être étudiée par les lois déjà appliquées aux réseaux hydrographiques (Lois d'Horton et de Schumm, reprises par Léopold et Miller). Ces lois qui permettent de hiérarchiser les réseaux hydrographiques, doivent permettre également de hiérarchiser les surfaces des bassins-versants correspondants.

## 2) Hiérarchisation des bassins-versants

Nous avons pris comme exemple l'ensemble du bassin de la Moselle à la confluence avec le Rhin.

On peut considérer que ce bassin est suffisamment vaste pour qu'on puisse établir des classes de sous-bassins selon une progression géométrique des surfaces. Nous avons ainsi défini des classes (ordonnées de 1 à X) dont les bornes sont régulièrement espacées sur une échelle logarithmique :

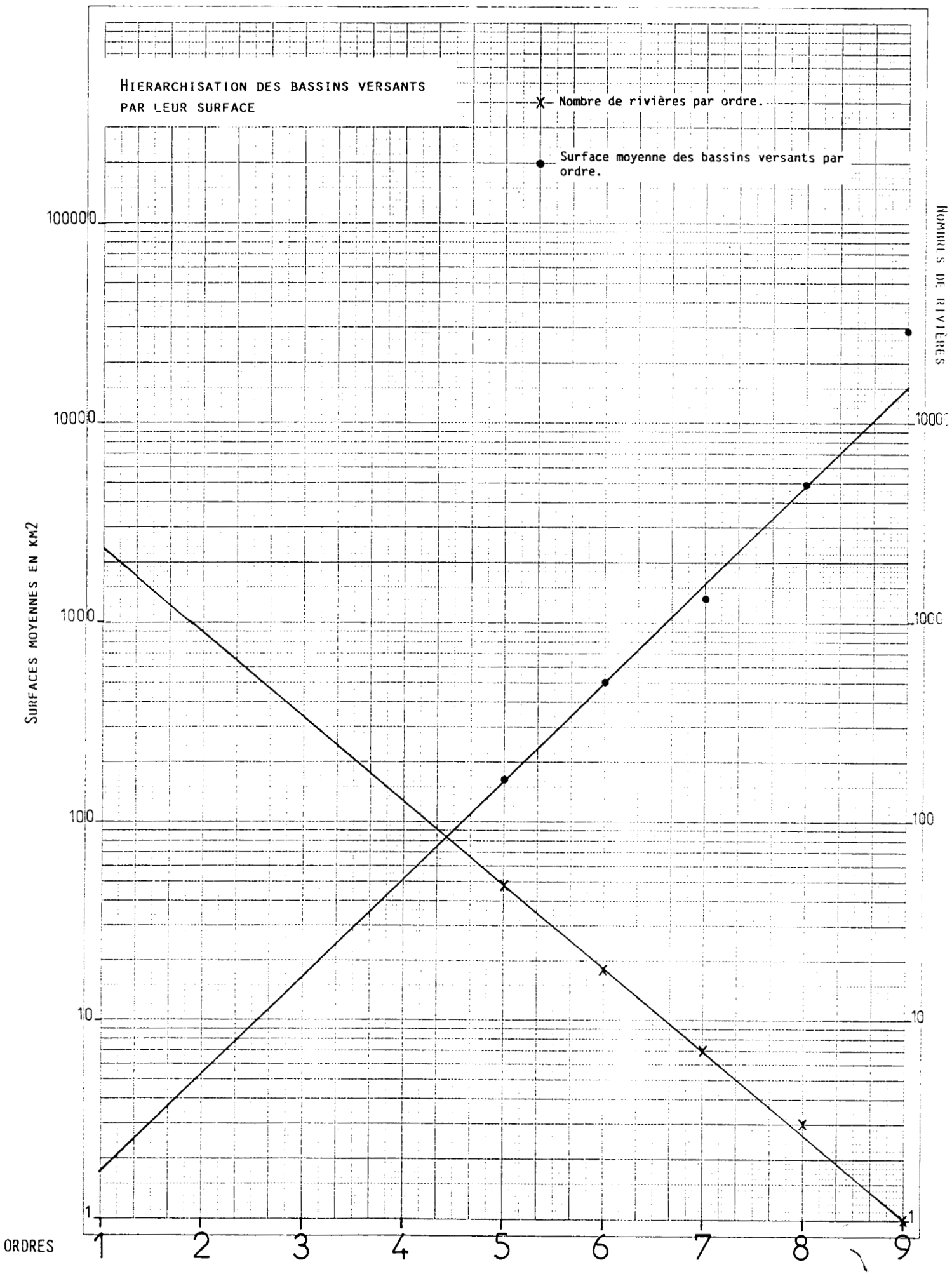
Classes	1	-	3,15	-	10	-	31,5	-	100	-	315	-	1000	-	3150	-	10000	-	31500
(Km <sup>2</sup> )																			
Ordre	1		2		3		4		5		6		7		8		9		

Pour l'ensemble du bassin de la Moselle, la surface étant de 28 230 km<sup>2</sup>, l'ordre final est le 9ème.

On peut éventuellement multiplier le nombre de classes, mais dans le cas présent le nombre de sous-bassins par classe serait insuffisant pour avoir une signification statistique.

Pour cette première analyse et compte-tenu des données disponibles, nous n'avons répertorié que les sous-bassins supérieurs à 100 km<sup>2</sup> (ceux pour lesquels est prévu l'élaboration d'un profil hydrologique en étiage). En effet, s'il est possible sur le territoire français de prendre en compte des sous-bassins d'ordre inférieur à l'ordre 5 (existence de documents détaillés), par contre cela n'est pas possible pour les territoires allemand et luxembourgeois, (absence de documents). Pour ces territoires, nous avons utilisé les renseignements mentionnés par R. Frécaut dans sa thèse (La Moselle et son bassin - 1972) que nous avons complétés à l'aide de données déterminées sur des cartes au 1/500 000ème (tracé des sous-bassins supérieurs à 100 km<sup>2</sup> et calcul des surfaces correspondantes par planimétrie).

Figure 1



Les sous-bassins (supérieurs à 100 km<sup>2</sup>) de l'ensemble du bassin de la Moselle ont été dessinés sur une carte au 1/500 000ème (Cf. annexe 1) et répertoriés sur un tableau (Cf. annexe 2)

Le tableau suivant récapitule les résultats :

Bassin de la Moselle (confluence avec le Rhin)

Bornes des classes	100	315	1 000	3 150	10 000	31 500
N° d'ordre des classes	5	6	7	8	9	
Nb de bassins	48	18	7	3	1	
Surf. moyenne des bassins	166	506	1309	4947	28.230	

Compte-tenu d'une précision de l'ordre de 5% pour les limites des classes, nous avons préféré classer la Meurthe (3 085 km<sup>2</sup>) dans la classe d'ordre 8, avec la Sarre et la Sûre-Sauer.

### 3) Applications des lois d'Horton

Comme pour les rivières, on peut appliquer les lois d'Horton au nombre de bassins de chaque ordre et à leur surface moyenne :

#### - Lois du nombre de bassins

Dans un bassin déterminé, le nombre de bassins de chaque ordre forme une série géométrique inverse, dont le premier terme est l'unité et la raison le rapport du nombre total de bassins d'un certain ordre (x) à celui des bassins de l'ordre immédiatement supérieur (x+1).

#### - Loi des surfaces moyennes des bassins

Dans un bassin déterminé, les surfaces moyennes des bassins de chaque ordre forment une série géométrique directe dont le premier terme est la surface moyenne des bassins élémentaires et la raison le rapport de la surface moyenne des bassins d'un ordre donné (x) à celle des bassins de l'ordre immédiatement inférieur (x-1).

Pour appliquer ces lois, on porte sur un papier semi-logarithmique (Fig.1) les données du tableau précédent, en prenant l'échelle arithmétique pour l'ordre x et l'échelle logarithmique pour le nombre de bassins (NX) et la surface moyenne de ces bassins (AX) de l'ordre correspondant. Pour chaque série de données, les points s'alignent assez correctement suivant un segment de droite.

On peut donc admettre que le classement des bassins de la Moselle, ainsi défini, est satisfaisant. Ce classement peut alors servir à la détermination des priorités dans la réalisation des campagnes de mesures (en fonction des objectifs des études et des moyens disponibles).

On peut ainsi traiter les rivières selon la classification des surfaces de bassins (en partant de la classe dont l'ordre est le plus élevé par exemple).

## II - DETERMINATION DES POINTS DE MESURE SUR LES RIVIERES

Après avoir choisi les bassins à traiter, selon un ordre de priorité, il faut déterminer le nombre de points de mesure à réaliser d'une part sur le drain principal et d'autre part sur les affluents.

### 1) Rivière principale

Dans le cadre de la revalorisation des catalogues des débits d'étiage du Bassin Rhin-Meuse, il a été décidé que l'élaboration d'un profil hydrologique devait être effectuée pour toute rivière dont le bassin-versant était supérieur à 100 km<sup>2</sup>.

L'élaboration du profil hydrologique impose l'estimation à priori d'un nombre de points de jaugeage nécessaires et la détermination des emplacements théoriques des points de mesure.

#### a) Nombre de points de jaugeages

En tenant compte des lois précédemment énoncées (croissance géométrique corrélative des débits et des surfaces), il est possible de définir sur une rivière, un nombre de points de jaugeage minimum (pour l'élaboration du profil hydrologique) qui réponde à une croissance géométrique des surfaces aux points mesurés. Ce nombre de points de jaugeage est calculé selon la formule suivante :

$$N_j = \left[ \text{Log} \left( \frac{A}{A_i} \right) \times (N_{jm} - 1) \right] + 1$$

$N_j$  = nombre de points de jaugeage

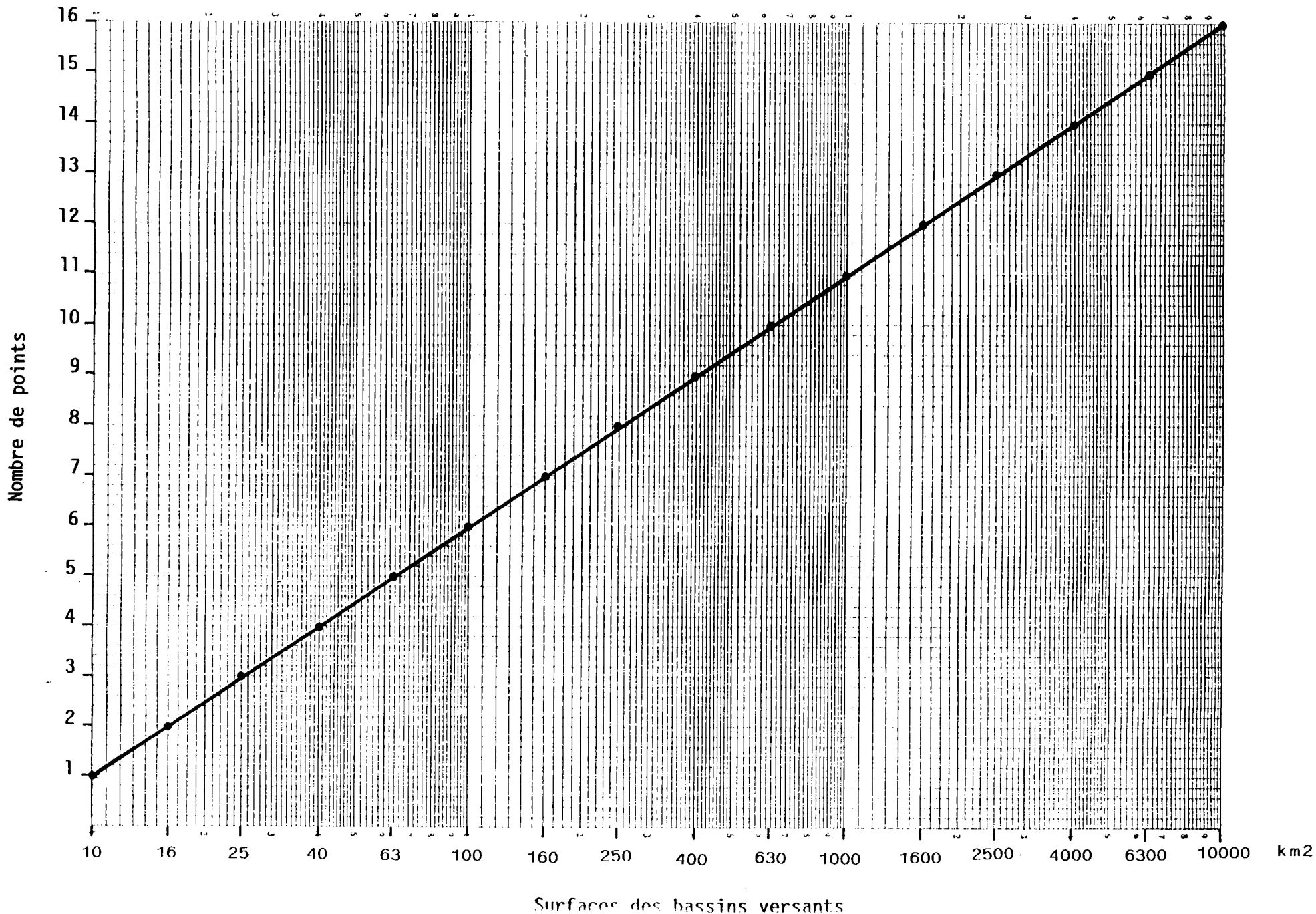
$A$  = surface totale du B.V. (km<sup>2</sup>)

$A_i$  = surface initiale du B.V. au 1er point de jaugeage (km<sup>2</sup>)

$N_{jm}$  = nombre de points de jaugeage, déterminé à priori, par module logarithmique de surface

### NOMBRE DE POINTS DE JAUGEAGE PAR BASSIN (AVEC 6 POINTS PAR MODULE LOGARITHMIQUE)

Figure 2





Exemple : Pour un bassin de 700 km<sup>2</sup> (A), avec première mesure à 10 km<sup>2</sup> (A<sub>i</sub>) et en estimant qu'il est nécessaire d'effectuer 6 jaugeages par module complet de surface, on obtient :

$$N_j = \left[ \text{Log} \frac{700}{10} \times (6 - 1) \right] + 1 = 10,23$$

dans ce cas on effectuera 10 jaugeages répartis sur le cours de la rivière, auxquels on ajoutera éventuellement un point supplémentaire à proximité de l'exutoire du bassin.

A partir de la formule générale, on peut construire un abaque mettant en corrélation le nombre de points de jaugeage (N<sub>j</sub> sur échelle arithmétique) et la surface (A sur échelle logarithmique). Un exemple d'abaque (Cf. Fig. 2) a été établi pour l'ensemble du bassin de la Moselle en utilisant une surface initiale au premier point de mesure de 10 Km<sup>2</sup> (A<sub>i</sub>) et en déterminant un nombre de jaugeages de 6 par module complet de surface. Cet abaque permet d'obtenir rapidement le nombre de points de jaugeage minimum nécessaire pour tout bassin inclu dans le bassin de la Moselle.

#### b) Emplacement théorique des points de jaugeages

Comme précédemment, il est possible de répartir les points de jaugeage sur la rivière principale pour des surfaces de bassins-versants qui répondent à une croissance géométrique - La formule générale utilisée est la suivante :

$$A_j = A_i \times \left( \frac{A}{A_i} \right)^\alpha$$

A<sub>j</sub> = surface du B.V. au point de jaugeage (km<sup>2</sup>)

A<sub>i</sub> = surface initiale du B.V. au 1er point de jaugeage (km<sup>2</sup>)

A = surface totale du B.V. (km<sup>2</sup>)

$$\alpha = \frac{R_j - 1}{N_j - 1}$$

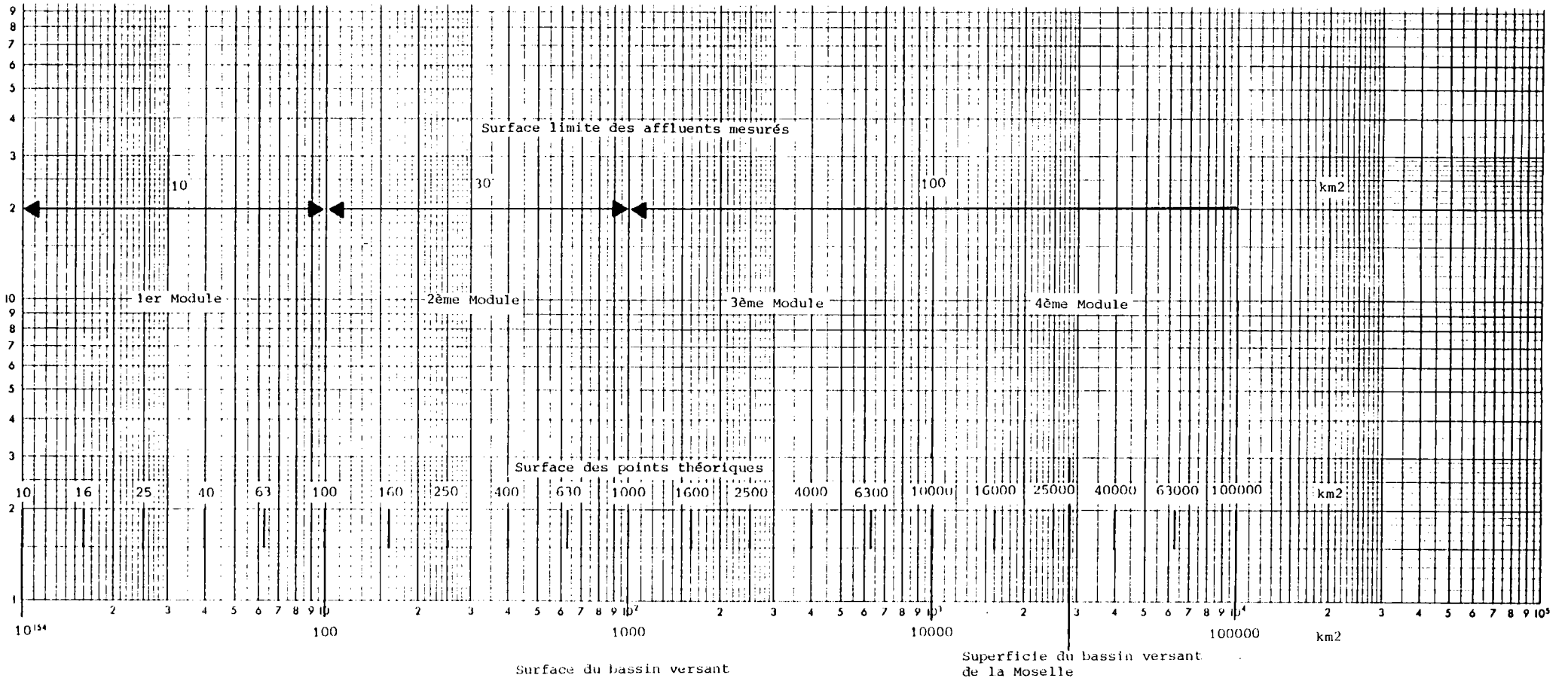
R<sub>j</sub> = rang du point de Jaugeage sur la rivière

N<sub>j</sub> = nombre de points de jaugeage à déterminer à priori.

Exemple : Pour un B.V. de 100 km<sup>2</sup> (A) avec une première mesure à 10 km<sup>2</sup> (A<sub>i</sub>) et en estimant qu'il est nécessaire d'effectuer 6 jaugeages (N<sub>j</sub>), on obtient, aux points de jaugeage, les surfaces (A<sub>j</sub>) suivantes :

Rang du point	R <sub>j1</sub>	R <sub>j2</sub>	R <sub>j3</sub>	R <sub>j4</sub>	R <sub>j5</sub>	R <sub>j6</sub>
Surface du B.V.	10	16	25	40	63	100

Figure 3



Ainsi, en utilisant les critères de l'exemple ci-dessus, on peut définir les surfaces des B.V. aux points de jaugeage pour toute taille de B.V. (Cf. Fig. 3).

## 2) Affluents

Les apports des différents affluents doivent être mesurés à la confluence avec la rivière principale pour les raisons suivantes :

- Expliquer l'évolution du profil hydrologique de la rivière principale en fonction des apports
  
- pouvoir caler, sur le profil hydrologique de la rivière principale, le profil d'un affluent qui serait établi à partir de mesures effectuées lors de campagnes antérieures ou ultérieures à celles réalisées sur la rivière principale.

Il n'est cependant pas nécessaire de mesurer tous les affluents qui, selon l'importance de leur débit et la localisation de leur point de confluence, auront une influence plus ou moins importante sur le débit de la rivière principale.

Dans le cadre du bassin de la Moselle (fig. 3), on peut définir des normes simplifiées basées sur des surfaces-limites de bassins-versants affluents pouvant fournir un débit significatif dans l'évolution du profil hydrologique de la rivière principale :

- Le premier point de jaugeage sur la rivière principale est établi pour une surface-seuil de 10 km<sup>2</sup> - De ce fait, aucun affluent dont la surface est inférieure à cette valeur n'est pris en compte.
  
- pour une surface de B.V. comprise entre 10 et 100 km<sup>2</sup>, les affluents dont les B.V. sont supérieurs à 10 km<sup>2</sup> seront jaugés à la confluence.
  
- entre 100 et 1000 km<sup>2</sup>, on jaugera à la confluence tous les affluents dont les B.V. sont supérieurs à 30 km<sup>2</sup>.
  
- et au delà de 1 000 km<sup>2</sup>, les mesures seront effectuées sur les affluents dont les B.V. sont supérieurs à 100 km<sup>2</sup>.

On admet que même pour une surface de B.V. plus importante (supérieure à 10 000 km<sup>2</sup> par exemple), il est nécessaire d'effectuer un point de mesure à la confluence des affluents dont la surface est au moins égale à 100 km<sup>2</sup>. En effet, ce point de mesure doit permettre par la suite de caler le profil hydrologique de l'affluent sur celui de la rivière principale et ceci dans la mesure où on prévoit d'effectuer des profils hydrologiques pour toutes les rivières dont le bassin est supérieur à 100 km<sup>2</sup>.

### 3) Applications à des bassins d'ordre différent

Nous avons confronté cette détermination théorique des points de mesure avec le réseau de points réellement mesurés sur certaines rivières.

Les rivières utilisées comme exemples sont choisies en fonction de l'ordre de bassin défini dans la première partie de cette étude :

#### - Ordre 8 : la Meurthe (3 085 km<sup>2</sup>) - Annexe 3

La surface réelle du B.V. de la Meurthe est légèrement inférieure à la limite inférieure de l'ordre 8 (3 150 km<sup>2</sup>). Cependant, l'appartenance à cet ordre semble plus adaptée.

Sur le graphique (Annexe 3), on constate que, la mesure des débits sur la rivière principale pour les surfaces théoriques définies précédemment, n'est pas toujours possible. En effet, la Fave, affluent important de la Meurthe (178 km<sup>2</sup>), fait passer le bassin-versant de la Meurthe d'une surface de 186 km<sup>2</sup> (à l'amont de la confluence) à une surface de 364 km<sup>2</sup> (à l'aval de la confluence). Le point de mesure théorique prévu à 250 km<sup>2</sup>, ne peut donc être réalisé.

Cependant globalement, le nombre de points de mesure effectivement réalisé sur le cours de la Meurthe (12) correspond au nombre de points théoriques (13). Leur répartition est sensiblement similaire à celle du schéma théorique.

En y ajoutant les points de mesure aux confluences des affluents les plus importants (11), sélectionnés selon les normes définies précédemment, on obtient un total de 24 points, soit environ 1 point pour 130 km<sup>2</sup>.

#### - Ordre 7 : Le Madon (1 032 km<sup>2</sup>) - Annexe 4

Si le nombre de points de mesure réellement effectués est proche du nombre de points théoriques (11), par contre leur répartition correspond rarement à la répartition théorique.

Au total, avec les affluents principaux sélectionnés (9), on a 20 points de mesure, soit 1 point pour 50 km<sup>2</sup>.

- Ordre 6 : La Vezouze (563 km<sup>2</sup>) - Annexe 5

Le nombre de points jaugés sur la rivière principale (9) correspond au nombre théorique (9) et leur répartition est satisfaisante - Seule la mesure à 16 km<sup>2</sup> ne peut être réalisée, car le ruisseau du Val à une surface de bassin-versant supérieure à celle de la Vezouze au droit de leur confluence.

Avec la mesure, aux confluences, des principaux affluents sélectionnés (8), le total des points jaugés est de 17, soit 1 point pour 33 km<sup>2</sup>.

- Ordre 5 : Le Rabodeau (152 km<sup>2</sup>) - Annexe 6

Les 7 points de mesure effectués correspondent sensiblement aux points théoriques, en nombre et en répartition.

En y ajoutant 3 points de mesure sur les principaux affluents sélectionnés (le ruisseau de la Ravines ne devant pas être pris en compte en théorie), on obtient un total de 10 points de mesure, soit 1 point pour 15 km<sup>2</sup>.

L'analyse de ces exemples montre bien que la détermination théorique des points de mesure sur une rivière est proche de la détermination intuitive que réalise les jaugeurs en choisissant les points de mesure sur le terrain.

Cette démarche théorique est très utile pour déterminer un réseau minimum de points de mesure nécessaires à l'élaboration des profils hydrologiques et à leur interprétation. Cependant, elle doit être nécessairement confrontée aux réalités des écoulements qui ne peuvent être appréciées qu'en effectuant des reconnaissances sur le terrain.

## C O N C L U S I O N

L'estimation d'un réseau minimal de points de mesure, pour la réalisation des profils hydrologiques des rivières en période de basses-eaux, permet de mettre en évidence l'application de certaines lois basées sur les surfaces.

La surface est non seulement un paramètre fondamental mais c'est également une donnée qui peut être assez facilement déterminée. La fonction géométrique de cette donnée semble être bien adaptée aux objectifs recherchés (classement des bassins-versants pour définir des priorités de mesure, répartition des points de mesure sur le cours principal des rivières).

La planification des campagnes de mesures peut ainsi être élaborée en tenant compte des ordres de bassins définis. Sur l'ensemble du B.V. de la Moselle, en prenant en compte uniquement les points de mesure à effectuer sur les cours principaux des rivières dont les bassins ont une surface supérieure à 100 km<sup>2</sup> (Cf. annexe 2) on obtient les valeurs suivantes :

Ordre	9	8	7	6	5	Total
Nombre de points	19	45	85	176	356	681
Nombre de rivières	1	3	7	18	48	77
Nombre de points par rivière	19	15	12	10	8	9

Il est possible, à l'aide de ces données et en fonction des priorités (choix des bassins selon les ordres), de déterminer un nombre minimal de points de mesure à effectuer pour un bassin donné .

Exemple du bassin de la Meurthe (en prenant en compte tous les B.V. supérieurs à 100 km<sup>2</sup>) :

- Ordre 8 (Meurthe) .....1 X 15 = 15
- Ordre 7 (néant) .....= 0
- Ordre 6 (Vezouze, Mortagne) .....2 X 10 = 20
- Ordre 5 (Fave, Rabodeau, Plaine, Sanon) .....4 X 8 = 32

-----  
T o t a l : 67 points

Ainsi, dans le cas d'une campagne générale de mesures sur l'ensemble du bassin de la Meurthe, on peut considérer que ce nombre de points de jaugeages (67) est un nombre minimal nécessaire pour l'élaboration des profils hydrologiques de toutes les rivières dont les bassins sont supérieurs à 100 km<sup>2</sup> (cas d'une campagne en étiage sévère, par exemple).