

# La planification du réseau hydrométrique minimal

P. DUBREUIL

Directeur de Recherches, Chef du Département de la Recherche Appliquée  
au Service Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M.

et

J. GUISCAFRE

Maître de recherches, Service Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M.

## Résumé

L'organisation des réseaux hydrométriques est un problème d'actualité. Une ébauche de théorie de ces réseaux peut être présentée avec les étapes du développement permettant d'atteindre un optimum : le maximum d'information de qualité choisie pour un coût fixé. La planification est la première étape importante du développement d'un réseau hydrométrique, qui permet de couvrir le paysage géographique sans lacunes importantes.

Des règles méthodologiques pour la mise en œuvre de cette planification ont été élaborées et leur efficacité démontrée sur deux régions de France, la Lorraine et la Maine.

## Abstract :

The management of the hydrometric networks is a topical problem. The theory of these networks may be drafted showing the steps of their development to reach an optimum : to get with a fixed cost the maximum of information, having a selected quality. Planning is the first important step of the network development; it allows to cover the country without big gaps.

Methodological procedures to implement the planning of hydrometric network have been elaborated and their efficiency proved by two examples taken in France (the regions Lorraine and Maine).

L'organisation des réseaux de mesures en hydrométéorologie est une question d'actualité. D'excellents résultats ont déjà été obtenus en matière de gestion proprement dite des réseaux (équipements, mouvements d'information, structures d'exploitation), auxquels nous avons contribué pour une part [1, 2]. Certains travaux ont été également entrepris en vue de tendre vers une optimisation de ces réseaux; bien que très complexe et certainement encore loin d'être élégamment résolue, cette optimisation, ou rationalisation, des réseaux déjà anciens et denses est dans les préoccupations présentes des hydrologues, et ceux de l'ORSTOM n'y font pas défaut [3, 4].

Un domaine est resté jusqu'ici un peu négligé dans la politique d'organisation des réseaux qu'essayent de mettre en œuvre les divers services hydrologiques. Ce domaine est celui de l'orientation du réseau à ses débuts alors que son stade de densité est encore minimal. On doit aisément convenir que, pour de nombreux pays et même pour certaines régions de pays industrialisés, les réseaux de mesure ne sont encore bien souvent qu'embryonnaires ou en cours d'organisation; en conséquence, leur orientation, que nous proposons d'appeler « planification », est une opération primordiale.

Nous avons été amenés à étudier plus particulièrement la planification du réseau hydrométrique minimal. Dans le cadre de ces études, nous avons élaboré des règles méthodologiques propres à cette planification.

Les problèmes relatifs aux autres réseaux de mesures en hydrologie — transports solides, composants chimiques et biologiques —, et en météorologie — pluviométrie, évaporation, etc. —, sont certes de nature assez différente, mais les règles méthodologiques pour la planification de tels réseaux ne doivent pas procéder de concepts très éloignés de ceux qui nous ont guidés pour le réseau hydrométrique proprement dit.

Cet article commence par situer la planification dans la conception évolutive du réseau, puis il présente les règles méthodologiques et les illustre par quelques cas concrets. Une part notable des éléments de cet article est empruntée à un travail réalisé dans le cadre d'un marché d'études pour le Ministère de l'Agriculture. Nous remercions ici M. l'Ingénieur en Chef du Génie Rural des Eaux et des Forêts, chef du Bureau d'Etudes techniques du Service de l'Hydraulique de ce Ministère, qui a bien voulu autoriser cet emprunt.

## **1. La planification dans le développement d'un réseau hydrométrique**

La conception évolutive du réseau de mesure n'a été pleinement admise et adoptée, dans l'école française d'hydrologie, qu'au cours de ces toutes dernières années. On ne peut pas vraiment parler sans exagération d'une théorie de développement du réseau; cependant divers concepts méthodologiques, évoqués dans l'introduction ou que nous allons présenter plus loin, fournissent maintenant des éléments assez substantiels pour que s'ébauche peu à peu une telle théorie.

Nous voudrions simplement, dans ce premier chapitre, montrer comment s'est imposée cette conception évolutive du réseau et définir les principaux stades de développement parmi lesquels celui de la planification est l'un des premiers.

### 1.1. *Les motifs d'installation de stations hydrométriques*

Si l'on remonte de plus d'un siècle en France, ou de quelques décennies dans la plupart des pays en voie de développement, on trouve une situation de fait présentant des aspects analogues. Cette situation correspond à ce que l'on peut qualifier aujourd'hui de contentieux historique, premier stade en quelque sorte du développement du réseau. Cette situation était la suivante : des problèmes précis et localisés d'aménagements des eaux se sont posés. Qu'il s'agisse de contrôler le tirant d'eau d'un bief navigable, d'évaluer la charge sur une prise au fil de l'eau, de calculer un débit pour produire de l'énergie ou pour arroser un périmètre cultivé, il y avait un besoin de connaissance de l'un ou l'autre des éléments de la ressource en eau (hauteur, débit,...). Pour le satisfaire, l'hydraulicien a mis en place une échelle limnimétrique.

L'accélération de la croissance industrielle ici, le manque crucial d'eau ailleurs, ont facilité le développement d'une spécialisation particulière pour l'étude de la ressource en eau, l'hydrologie.

Le nombre de problèmes croissant a provoqué l'augmentation des implantations d'échelle. Le souci de précision, l'intérêt scientifique ont amené à mettre en place des appareils enregistreurs permanents des hauteurs d'eau.

Toutes ces stations de mesures constituent un ensemble disparate. Certaines sont limnimétriques — on n'y mesure que les hauteurs —, d'autres sont hydrométriques — on y mesure les hauteurs et aussi les débits. Ces stations sont tantôt observées en permanence, tantôt épisodiquement, elles peuvent soit mesurer tous les débits, soit seulement ceux de crue ou d'étiage... Disparate, l'ensemble l'est sur le plan de la localisation comme sur celui de la nature des stations.

De disparate, l'ensemble risque de devenir aussi exorbitant. En effet, la multiplication des besoins en eau entraîne celle des points de mesures, et si l'on extrapole, un peu théoriquement, on concevrait l'utilité d'une station sur tous les cours d'eau d'un pays car il n'en est aucun, aujourd'hui ou demain, qui ne puisse servir à satisfaire un besoin.

Devant cette prolifération disparate naturelle, un réflexe modérateur naît. Il est à l'origine de la notion de réseau hydrométrique.

### 1.2. *L'apparition de la notion de réseau*

Les études hydrologiques sont menées à partir de données d'observations qui sont des réalisations aléatoires de variables (hauteurs ou débits par exemple) dont la variabilité dans le temps est grande. Elles ont par conséquent recours à l'outil statistique pour l'analyse de ces variables. Pour atteindre la précision requise par les problèmes de plus en plus complexes d'aménagement, les études hydrologiques ont besoin de s'appuyer sur des chroniques de longue durée des variables analysées. Or de telles chroniques ne sont pas évidemment engendrées par le seul fait de stations mises en place pour répondre à un objectif particulier, car bien souvent ces stations sont fermées aussitôt l'objectif atteint (l'ouvrage construit). On ne peut admettre aisément que de nombreuses sources d'information tarissent de la sorte : il est nécessaire de disposer de stations permanentes d'observations hydrométriques complètes.

Ainsi se justifie la notion de réseau. Et l'on peut définir un réseau hydrométrique comme un ensemble de stations ponctuelles de mesures complètes des hauteurs et débits des cours d'eau, réparties dans une région, dans un pays, avec une certaine densité et selon certains critères.

Le réseau hydrométrique ainsi défini comprend deux types de stations :

a) Des stations tertiaires qui sont justement celles qui ont été mises en place pour répondre à des objectifs spécifiques, elles n'ont aucune raison d'être pérennes et le plus souvent sont fermées après usage. Elles peuvent cependant être conservées pour assumer une fonction de contrôle après réalisation de l'aménagement (contrôle de qualité des eaux, système d'annonce de crue, etc.). Elles peuvent également devenir des stations de base ;

b) Des stations de base qui sont soit primaires, c'est-à-dire fixes et pérennes, soit secondaires, c'est-à-dire susceptibles d'être changées de site après une certaine période si certains critères de précision des données collectées sont respectés.

La sélection entre stations primaires et secondaires s'effectue au stade de la rationalisation du réseau.

Alors que les stations tertiaires ont des emplacements entièrement déterminés par les objectifs qu'elles servent, et que leur gamme d'observations n'est pas toujours complète, les stations de base, au contraire, obéissent à des objectifs généraux de connaissance de la ressource en eau, ce qui ne présuppose pas de leurs emplacements, et elles couvrent toute la gamme de mesures des hauteurs et débits, à de très rares exceptions près.

La définition des critères de choix des emplacements des stations de base est justement ce que nous appelons la planification.

Dans la suite de cet article, la notion de réseau hydrométrique est employée dans une acceptation restreinte pour désigner uniquement l'ensemble des stations de base. C'est évidemment seulement cette fraction de base du réseau dont il importe de suivre et d'orienter le développement. La création, l'évolution des stations tertiaires dépendent en effet d'objectifs spécifiques de portée limitée ; ni leur planification, ni leur rationalisation ne seraient utiles, cependant les stations tertiaires sont doublement liées aux stations de base en ce qu'elles servent de réservoir pour la sélection de ces dernières et par la valorisation de leur information limitée que leur apporte l'information de longue durée de ces stations.

### **1.3. Les étapes de développement du réseau hydrométrique**

L'apparition de la notion de réseau, dans la pratique, n'est pas aussi simple, ni aussi nette que l'exposé théorique précédent le laisserait supposer.

Cette apparition peut survenir en effet aussi bien au niveau des exploitants de stations tertiaires qu'à un niveau quelconque de l'administration d'un pays plus ou moins chargée de l'utilisation des eaux, ne serait-ce que sous l'aspect législatif et juridique.

On peut donc voir des exploitants de stations tertiaires conserver certaines de ces stations en service, même lorsque le but pour lequel elles furent créées est atteint ; ces stations maintenues sont implicitement devenues des stations de réseau.

On peut également voir une ou plusieurs administrations étendre leur compétence juridique sur les eaux au domaine de la mesure et créer un service hydrométrique.

D'autres exemples pratiques sont évidemment concevables ; leur multiplicité et leur variabilité sont étroitement liées au degré de structuration de l'économie du pays concerné et à l'emprise plus ou moins grande du secteur public.

On conçoit ainsi aisément qu'un réseau hydrométrique n'est pas le fruit d'une

création ex nihilo, soudaine et intégrale, mais l'aboutissement de processus divers répartis dans le temps.

Une telle création, qui constitue donc la première étape de développement du réseau, si on laisse jouer librement les structures administratives et techniques intéressées, a de fortes chances de revêtir un aspect désordonné. On peut, en effet, craindre une répartition très irrégulière des stations, des doubles emplois et des lacunes. Or, la quantité comme la maturité d'un réseau se jugent à la densité, à la répartition et à l'âge des stations qui le composent. Ces trois critères de qualité découlent de l'application des simples règles du bon sens au problème des objectifs du réseau.

En exigeant une qualité plus ou moins bonne, ou en situant les trois critères de qualité à des niveaux plus ou moins élevés, on peut définir des étapes de développement du réseau depuis la création jusqu'à l'optimisation complète.

La première de ces étapes est celle dite du réseau hydrométrique minimal, qui correspond en quelque sorte au constat d'achèvement de la création du réseau, et qui, de ce fait, a été plus facile à définir. Le réseau hydrométrique au stade minimal assure une couverture, sans lacune criante, du paysage géographique du territoire intéressé. Le *Guide des Pratiques Hydrométéorologiques de l'O.M.M.* [5] ne définit le réseau minimal que par référence au critère de densité. C'est évidemment tout ce qui est possible au niveau mondial et à la fois réalisable si la création du réseau est désordonnée. L'organisation de cette création s'appuie sur la prise en compte des trois critères, et surtout sur celui de répartition; l'opération qui permet d'effectuer cette organisation c'est la planification.

La planification du réseau minimal de base est, en pratique, l'établissement d'un plan de localisation des stations de mesures destinées à former l'ossature de base permanente de ce réseau, en tenant compte des conditions physiques, climatiques et économiques du milieu régional considéré.

La seconde étape de développement est celle du réseau hydrométrique optimal. Elle est l'aboutissement du vieillissement du réseau hydrométrique minimal, accompagné d'une nouvelle structuration de celui-ci pour satisfaire des critères de qualité plus sévères. Le réseau optimal a une densité suffisante et une répartition adéquate pour permettre le calcul direct ou l'estimation par extension statistique, de toute caractéristique de hauteur ou de débit observée en une station de base quelconque, et cela avec une précision connue et en admettant un certain risque choisi; ce réseau optimal permet également de valoriser au maximum, par extension statistique, toute information de courte durée collectée en une station tertiaire quelconque.

La rationalisation du réseau hydrométrique est l'opération qui doit permettre d'atteindre l'étape optimale ainsi définie.

Les difficultés qu'il y a pour définir exactement les critères que doit satisfaire un réseau optimal (choix de la variable, des niveaux de précision, de risque...) font que l'on considère aujourd'hui que la rationalisation est à répéter plusieurs fois, c'est-à-dire que le stade optimal ne sera atteint que par approximations successives.

#### **1.4. Les conditions de mise en œuvre des étapes de développement**

Des trois critères d'appréciation de la qualité d'un réseau, seul le critère de répartition, pourtant fondamental, ne peut pas être explicité ni simplement, ni numériquement; il est en fait le critère qui permet a posteriori de juger de la satis-

faction fournie par une planification ou une rationalisation en ce sens qu'il conditionne tantôt l'absence de lacune géographique, tantôt le degré de corrélation interpostes. Au contraire, les critères de densité et d'âge, qu'il est aisé de représenter numériquement, servent de constat a priori de la maturité du réseau et par conséquent c'est à partir de leur examen que l'on peut définir le degré d'évolution du réseau et juger s'il est temps de le planifier ou de le rationaliser.

On peut dire que la planification est requise pour un réseau jeune et peu dense, tandis que la rationalisation n'est possible que pour un réseau dense et d'un certain âge. Pour transcrire ces propositions en termes numériques nous avons effectué un certain nombre de choix de seuils de densité et d'âge qu'il semble bon de décrire avec quelques détails [6].

Le Guide de l'O.M.M., déjà cité, recommande pour la densité du réseau minimal, les gammes suivantes :

- a) En région non montagneuse, une station pour 1 000 à 2 500 km<sup>2</sup>;
- b) En région montagneuse, une station pour 300 à 1 000 km<sup>2</sup>.

Les densités maximales de ces gammes correspondent aux régions économiquement développées et très peuplées.

A titre d'exemple, nous avons adapté ces recommandations à la France en considérant, d'une part que les densités maximales étaient à retenir et, d'autre part, que la zone méditerranéenne du pays devait être assimilée, quant à la variabilité du régime hydrologique, à la zone montagneuse tandis que le reste du pays pouvait être placé à mi-chemin entre « montagne » et « plaine » étant donné le caractère très varié du paysage français. Nous avons enfin admis que l'on devait classer en zone montagneuse uniquement les grandes chaînes et massifs dont l'emprise géographique était assez grande pour qu'ils influent certainement et notablement sur le régime des précipitations (effet orographique); la seule prise en compte d'une forte pente n'étant pas un critère suffisant pour l'étiquette « zone montagneuse », ce qui écarte les reliefs localisés.

Si l'on se réfère à la classification des reliefs, que nous exposons plus loin, la classe R<sub>5</sub> serait la première classe de relief accidenté, tandis que les classes inférieures (R<sub>1</sub> à R<sub>4</sub>) seraient de relief faible. La présence de petites zones de classes R<sub>5</sub> (Suisse Normande) dans le bassin de la Maine n'empêche pas de mettre celui-ci dans une région non montagneuse; il en est de même des côtes de Meuse en Lorraine où seul le versant vosgien peut recevoir l'appellation de zone montagneuse.

Les densités minimales D<sub>m</sub> que nous proposons pour la France sont ainsi les suivantes :

- a) 1 station pour 300 km<sup>2</sup> en zone montagneuse ou méditerranéenne, soit 3,4 stations pour 1 000 km<sup>2</sup>;
- b) 1 station pour 700 km<sup>2</sup> en zone ni montagneuse, ni méditerranéenne, soit 1,4 station pour 1 000 km<sup>2</sup>, cette seconde densité étant un compromis entre les seuils maximaux de l'O.M.M. (1 station pour 300 et 1 000 km<sup>2</sup>).

Enfin l'O.M.M. recommande de répartir les stations à égalité entre petits et grands bassins, la limite étant prise à 1 000 km<sup>2</sup> en zone de montagne et entre 3 000 et 5 000 km<sup>2</sup> ailleurs. Nous proposons de retenir le seuil de 1 000 km<sup>2</sup> pour la France.

La prise en compte de l'âge des stations doit se faire pour répondre à la question suivante: à partir de combien d'années d'observations en deux stations peut-on considérer qu'il est possible d'établir une corrélation entre elles? Pour la France, aux régimes pas trop irréguliers, un minimum de dix ans paraît indispensable.

On appelle  $D$  la densité de toutes les stations hydrométriques en fonctionnement à un moment donné et  $D'$  la densité de toutes les stations de plus de dix ans de fonctionnement au même moment, toutes deux exprimées comme  $D_m$  en nombre de stations pour 1 000 km<sup>2</sup>.

Si l'on se place au moment de la création du réseau, la densité  $D$  correspond à l'ensemble des stations tertiaires au sein duquel il faudra prélever les stations de base. Comme nombre de ces stations sont inaptes de par leur implantation à être des stations de base, et en considérant qu'il y en a grossièrement la moitié du total, on introduit comme seuil d'évolution  $2 D_m$  à côté de  $D_m$ .

Nantis de ces éléments — les densités minimales  $D_m$ , leurs doubles  $2 D_m$  et les densités observées  $D$  et  $D'$  — les conditions de mise en œuvre des étapes du développement peuvent être précisées.

Les positions respectives des densités observées  $D$  et  $D'$  par rapport aux densités-seuils  $D_m$  et  $2 D_m$  occupent selon les cas cinq plages dans chacune desquelles, le degré d'évolution du réseau ainsi sommairement évalué, il est possible de juger de l'opportunité de franchir l'une ou l'autre des deux grandes étapes du développement, soit la planification, soit la rationalisation. Le tableau ci-après montre ces cinq plages:

Densité $D$	$D < D_m$	$D_m < D < 2 D_m$	$D > 2 D_m$
Densité $D'$ $D' < D_m$	Planification utile	Planification urgente	Planification peu utile
$D' > D_m$		Rationalisation utile	Rationalisation urgente

Les conseils donnés dans ce tableau se justifient d'eux-mêmes sachant les objectifs poursuivis et les règles retenues pour son établissement.

Tant que  $D'$  est inférieur à  $D_m$ , c'est le domaine de la planification du réseau jeune en formation. Cette planification utile ou urgente selon la densité  $D$  des stations devient peu utile si cette même densité franchit le seuil  $2 D_m$ ; l'excès de stations est alors tel que la planification conclurait à de trop nombreuses fermetures ce qui ne serait ni efficace, ni économique.

On ne devrait jamais laisser un réseau jeune croître anarchiquement jusqu'à une telle densité  $D > 2 D_m$  sans le planifier; si une telle erreur était commise, il vaudrait mieux attendre qu'il soit en âge d'être rationalisé plutôt que de le planifier; ce serait un moindre mal.

Dès que  $D'$  dépasse  $D_m$ , le réseau a atteint, en partie au moins, un âge certain et la rationalisation s'impose.

Si l'on accepte de prendre à titre d'illustration de ces conditions de mise en

œuvre des étapes du développement les conclusions d'un précédent article sur l'état des stations hydrométriques en France en mars 1968 [6], on peut dire qu'alors la situation était la suivante:

La rationalisation s'imposait dans de nombreuses régions de montagne telles que celles des bassins côtiers de l'Hérault et des Pyrénées orientales, des bassins de l'Isère, du Rhône amont de Lyon, de la Garonne amont de Toulouse, du Tarn amont de Montauban, du Lot amont de Cahors, de la haute Dordogne et enfin des bassins des affluents alsaciens du Rhin. Un essai nous a montré que dans ces derniers bassins [7], l'opération était un peu prématurée. Il n'est pas certain que le constat soit le même dans les autres régions citées; encore faudrait-il le vérifier et le plus vite serait le mieux si l'on ne veut pas voir maintenir en service des stations qu'il serait plus efficace de déplacer.

La planification, quant à elle et pour la même époque, était déjà urgente dans les bassins suivants: Yonne, Doubs et Saône en amont du Doubs, Moselle et Meuse, Adour, Maine et côtiers vendéens. Dans le cadre du marché d'études cité en introduction, cette opération a été réalisée pour les bassins de la Moselle, de la Meuse et de la Maine [8, 9]. Les travaux accomplis à cette occasion nous servent d'exemples pour illustrer le texte de cet article.

Si l'on veut bien noter enfin qu'en mars 1968, la planification apparaissait nécessaire en outre en six régions de programme de France et que depuis cette date de nombreuses stations ont été mises en place, on conviendra aisément qu'aujourd'hui il y a un risque certain de retard dans la mise en œuvre de la planification du réseau hydrométrique minimal en France, pour quelques bassins la plage de la planification peu utile ( $D > 2 Dm$ ) étant peut-être déjà atteinte.

Pour clore cette première partie, il nous paraît bon de dire que le fait de négliger la mise en œuvre en temps utile des étapes du développement condamne à peu près sûrement les gestionnaires de réseaux à ne pas pouvoir atteindre l'optimum qui s'exprime par l'obtention du maximum d'information de qualité définie pour un coût fixé (le nombre de stations exploitées, par exemple).

## **2. Les règles méthodologiques de la planification**

Il faut envisager de prime abord des règles préalables ou plutôt un exposé des motifs qui définissent l'esprit dans lequel doit être entreprise la planification; cet exposé des motifs outre un schéma opératoire général contient un descriptif du contenu et des limites de la planification.

Ensuite, viennent les règles méthodologiques proprement dites pour la mise en œuvre d'une planification, règles que l'on peut rassembler en deux groupes, celui qui a trait à l'étude des caractères du milieu physico-climatique régional et celui qui regarde les moyens et critères d'implantation des stations.

### **2.1. Exposé des motifs**

La planification doit être mise en œuvre sans tenir compte des éventuelles stations hydrométriques existantes. Elle aboutit à un plan d'implantation de stations qui ne peut pas être en complète harmonie avec ce qui existe; mais la confrontation entre plan d'implantation et situation réelle ne doit intervenir qu'à l'achèvement de la planification. C'est même une opération nécessaire pour appliquer pratiquement

les résultats de la planification théorique. Cette confrontation doit, pour chaque station existante, aboutir à une décision de fermeture ou de maintien; l'ouverture de nouvelles stations recommandées par le plan est décidée ensuite pour toutes celles pour lesquelles n'a pu être trouvé d'équivalent dans le réseau existant.

Evidemment des arbitrages sont concevables, le cas de chaque station étant bien souvent particulier.

Nous limitons notre étude à la planification car il n'y a pas de règles pour cette confrontation, sinon qu'il est recommandable de ne pas fermer les postes ayant déjà plus de dix ans d'âge, mais que l'on peut le faire sans scrupule pour les postes plus jeunes si leur implantation est décevante sous l'angle des critères de la planification. Dans un cas la perte d'information serait excessive, dans le second cas, négligeable.

La planification n'est pas comme la rationalisation une opération raffinée qui a pour but d'atteindre un optimum. C'est au contraire une opération à mener rapidement et simplement à partir des seuls documents existants sur le milieu et de la seule connaissance, disons visuelle ou expérimentale, de celui-ci. Cela veut dire concrètement que l'étude des caractères du milieu qu'ils soient physiques, climatiques ou économiques ne doit s'appuyer que sur des documents généraux publiés et/ou connus.

La planification s'effectue en trois phases:

— Deux phases pour l'étude des conditions physiques et climatiques:

— Une phase d'étude théorique (sur documents généraux) des caractéristiques du milieu physico-climatique;

— Une seconde phase, d'aspect plus pratique, consistant à confronter l'étude théorique avec les réalités régionales (renseignements locaux sur la géographie physique).

A l'issue de ces deux phases menées conjointement, on aboutit au dessin d'une carte des zones hydrologiques théoriquement homogènes;

— Une troisième phase, consistant à prendre en compte les objectifs généraux de l'Administration quant à l'aménagement des bassins et à l'emploi des ressources en eau, afin de choisir les biefs des cours d'eau dans lesquels devraient être implantées de préférence les stations hydrométriques. Elle aboutit au plan de localisation des stations de mesures destinées à former le réseau minimal de base.

Par l'Administration, on entend ici le service gestionnaire du réseau de base qui est, dans la plupart des pays, un service public ou apparenté. Dans le pays où un service unique a vocation pour la gestion du réseau hydrométrique, les objectifs généraux d'emploi de la ressource en eau sont exhaustifs et faciles à définir. Dans les pays où le réseau hydrométrique est compartimenté sous la juridiction de plusieurs services, la définition des mêmes objectifs généraux est plus délicate puisqu'elle doit s'appuyer sur les compétences et les domaines d'intervention de ces divers services entre lesquels l'interférence n'est parfois pas exclue. Ainsi en France, le ministère de l'Agriculture a-t-il compétence sur la ressource en eau de l'espace rural, ce qui implique le contrôle des petits cours d'eau, généralement n'appartenant pas au domaine public en matière de législation des eaux, c'est-à-dire non domaniaux. Mais par contre, à côté des grands cours d'eau généralement navigables, on trouve

parmi les cours d'eau domaniaux de petits cours d'eau dont la ressource est utilisée ou affectée par une zone urbaine ou industrielle notable, et ces cours d'eau sont de la compétence d'autres ministères (Equipement, Industrie).

Pour le réseau de l'Agriculture, qui est composé de stations situées pour la plupart sur des petits cours d'eau (moins de 5 000 km<sup>2</sup> et même moins de 1 000 km<sup>2</sup>) la planification peut se faire à l'échelle de la région ou administrative ou hydrographique, région d'une superficie pouvant varier entre 10 000 et 25 000 km<sup>2</sup> environ. A cette échelle, on peut attendre une relative homogénéité de la géographie, ce qui facilite l'établissement des règles de planification.

Le choix du bassin hydrographique est nettement préférable à celui de la région administrative. Dans ce second cas, comme on l'a vu en Lorraine, les limites de la région ne coïncident pas avec celles des bassins hydrographiques et la fraction de ceux-ci située hors de la région doit cependant être incluse dans la planification régionale si les ressources qu'elle contient intéressent ladite région. La décision est affaire de cas.

La présence d'une frontière internationale en limite de la région à planifier complique encore le problème; cela contraint parfois à ne pas tenir compte des fractions de bassins situées à l'étranger faute d'informations les concernant même si leurs ressources sont utiles à la région étudiée. C'est le cas des bassins du Chiers et de la Sarre en Lorraine qui ont respectivement des parties importantes en Belgique et en Allemagne.

Le choix du bassin hydrographique est satisfaisant mais non suffisant. Bien souvent certaines zones hydrologiques homogènes y sont définies sur de petites surfaces alors qu'elles couvrent des aires supérieures dans les bassins voisins; en conséquence le choix des implantations de stations devrait être revu pour ces zones après planification des bassins limitrophes. Ainsi dans le bassin de la Maine, aurait-on intérêt à reporter certaines implantations dans les bassins voisins de côtiers normands (Orne) ou bretons (Vilaine) plus représentatifs de certains paysages que l'on trouve aux limites septentrionale et occidentale dudit bassin.

La planification régionale, telle que nous venons de la définir, n'est valable que pour les petits et moyens cours d'eau. Pour les grands fleuves comme la Loire, le Rhône ou le Rhin, l'étude doit porter sur la totalité du cours. On peut cependant disjoindre les deux cas, car en réalité les critères de planification des grands fleuves sont plus simples et de nature différente de ceux qui s'appliquent aux petits et moyens cours d'eau, comme on le montre plus loin.

## ***2.2. Rassemblement de la documentation et enquête régionale***

La phase préliminaire à toute étude est le rassemblement de tous renseignements, données et documents nécessaires à celle-ci, comme on vient de le montrer dans l'exposé des motifs.

La documentation générale consiste surtout en documents cartographiques, nécessaires généralement à la détermination des différents critères. En effet, comme on va le voir, la quasi-totalité du travail de planification s'exécute sur cartes. Un fond topographique doit être établi, sur lequel on viendra superposer les calques représentant divers caractères du milieu, également cartographiés.

*Pour la topographie*, nous avons à notre disposition en France, un assez grand nombre d'échelles de cartes.

Notre choix s'est fixé pour la France sur deux cartes de l'Institut Géographique National (I.G.N.), de même système de projection (projection LAMBERT) et publiées intégralement ou sur le point de l'être (1/250 000<sup>e</sup>); ce sont les cartes de France au 1/100 000<sup>e</sup> et 1/250 000<sup>e</sup>.

L'échelle du 1/100 000<sup>e</sup> a été choisie de manière à obtenir une précision acceptable dans la détermination du critère de pente, comme nous le verrons ci-dessous.

Pour la représentation et la mise en forme des documents de synthèse, l'échelle au 1/250 000<sup>e</sup> a été jugée la plus satisfaisante car, d'une part, elle permet d'établir un document maniable correspondant à une région variant entre 10 000 et 25 000 km<sup>2</sup>, d'autre part, une surface de 4 cm<sup>2</sup>, réduction d'un petit bassin versant de 25 km<sup>2</sup>, y est appréciable.

Dans tout autre pays, il est conseillé de ne pas trop s'écarter de ces échelles de base. L'échelle du fond topographique servant d'échelle de synthèse, toutes les autres cartes seront réduites ou agrandies à cette échelle.

Pour la géologie, nous disposons en France des cartes géologiques au 1/80 000<sup>e</sup> et 1/320 000<sup>e</sup>. On trouve des cartes analogues dans la plupart des pays.

Pour l'hydrogéologie, l'on dispose très rarement de carte générale, mais il existe des documents pouvant couvrir certaines régions naturelles, telle la carte hydrogéologique du Bassin parisien au 1/500 000<sup>e</sup> (B.R.G.M. 1967). Dans les pays où de tels documents manquent, et cela est fréquent, il faudra procéder à une interprétation hydrogéologique de la carte géologique, opération délicate, sujette à erreurs, à ne confier qu'à une personne au moins avertie de ces questions.

Pour la climatologie, nous disposons de documents généraux tels que l'Atlas climatologique de France ou des publications de l'O.N.M., mais ils doivent être complétés sur le plan local. Des documents analogues existent dans la plupart des pays.

Pour la pédologie, la géomorphologie, ou la végétation, la documentation est ou trop localisée, ou trop générale; elle peut très bien ne pas exister à l'échelle régionale.

L'enquête locale permet de compléter cette documentation générale en rassemblant les documents originaux éventuels, tels que les inventaires régionaux des ressources en eau, les monographies hydrologiques, les études locales des phénomènes karstiques, etc.

L'on recherche aussi les études et monographies géographiques qui aident à la définition des « pays », c'est-à-dire des portions de région constituant pour le géographe des entités homogènes; une certaine concordance peut exister entre ces pays et les zones hydrologiques théoriquement homogènes. Une reconnaissance de terrain peut faciliter cette compréhension des pays.

C'est également au niveau de l'enquête régionale que l'on obtient les informations concernant les programmes — à court, moyen et long terme — d'utilisation des ressources en eau et l'importance des besoins des divers consommateurs.

### 2.3. Etude des caractères du milieu physico-climatique régional

Cette étude doit nous conduire à faire apparaître des zones à caractéristiques hydrologiques homogènes déterminant une certaine aptitude au ruissellement et à l'intérieur desquelles un bassin pourrait être représentatif.

Plusieurs secteurs d'une région étudiée peuvent présenter les mêmes caractéristiques, donc faire partie de la même zone hydrologique théoriquement homogène.

A priori nous ne connaissons pas les caractéristiques hydrologiques d'une zone puisque l'implantation d'une station a pour but de les déterminer et de faire apparaître les liaisons quantitatives existant entre lesdits caractères et les facteurs physico-climatiques de la zone, facteurs physico-climatiques qui sont en général assez bien connus.

Le problème peut être résolu par le biais des caractéristiques physico-climatiques : une zone physico-climatique homogène correspondra par hypothèse à une zone hydrologique théoriquement homogène.

Par définition, à l'intérieur d'une zone hydrologique homogène, on admet que les caractères du régime hydrologique prennent des valeurs peu variables ; on admet également que d'une zone homogène à une autre voisine, au moins l'un des caractères du régime hydrologique change nettement.

Les caractères hydrologiques dépendent fortement des caractères physico-climatiques. Lorsque ces derniers caractères ont une valeur stable et qu'aucun ne varie brutalement, on admet que la zone où ils sont observés ainsi peut être qualifiée de zone physico-climatique homogène.

Il importe donc de définir des zones à caractéristiques physico-climatiques, en classant les facteurs par ordre d'influence décroissante sur le ruissellement et en négligeant les facteurs secondaires.

Les quatre principales caractéristiques jouant un rôle sur le régime hydrologique sont :

- Le climat ;
- Les caractéristiques du sol et du sous-sol ;
- Le relief ;
- Et la couverture végétale.

Dans quel ordre classer ces facteurs ?

Dans une étude déjà ancienne [10], l'un d'entre nous avait proposé l'ordre suivant pour une région tropicale voisine de 100 000 km<sup>2</sup>, située dans le nord-est du Brésil :

- Le climat ;
- La nature du sous-sol (ou sa perméabilité au sens très large) ;
- Le relief ;
- La végétation.

Cet ordre se justifiait pour une région peu accidentée, à végétation naturelle homogène plus ou moins défrichée et où alternaient terrains perméables et imperméables. L'abondance de l'écoulement y dépendait essentiellement de celle des précipitations, la région étant presque semi-aride en certains secteurs.

Un examen comparable doit permettre dans chaque cas de classer au mieux de leur influence les facteurs du milieu.

Si nous considérons chacun de ces facteurs, en France, pour une région limitée à quelques milliers de km<sup>2</sup>, nous nous apercevons que :

- Le climat, en zone tempérée non montagneuse, est assez homogène donc devient un facteur secondaire, alors qu'il reste prépondérant en zone de montagne et en zone méditerranéenne ;

— Le relief, pouvant modifier la répartition en infiltration et ruissellement, estimé sous le simple aspect de la perméabilité, cède le pas à la perméabilité du sous-sol en zone non montagneuse, mais en zone montagneuse ou en zone méditerranéenne il peut être un facteur d'importance suivant les cas;

— La végétation, bien qu'influencée par l'homme, reste plus ou moins liée à un ou plusieurs des trois précédents facteurs, aussi garde-t-elle une importance secondaire.

Nous proposons en règle générale, comme ordre d'importance des principaux facteurs physico-climatiques, pour la France:

— En zone tempérée non montagneuse:

— La nature du sous-sol (ou perméabilité);

— Le relief;

— Le climat;

— La végétation.

— En zone montagneuse ou en climat méditerranéen:

— Le climat;

— La perméabilité et le relief (l'ordre de ces deux facteurs variant suivant le cas);

— La végétation.

Bien entendu, dans certaines situations particulières, l'inversion des facteurs ou l'introduction d'autres facteurs peut être envisagée.

Ainsi l'ordre recommandé pour une zone tempérée non montagneuse a-t-il été retenu pour le bassin de la Maine, tandis qu'en Lorraine nous avons été amenés à inverser climat et relief, à partir du même ordre, parce que le relief s'y avère d'importance secondaire étant très lié à la nature du sous-sol en altitude (versant des Vosges) où justement joue surtout la pluviosité, élément primordial du climat.

L'ordre d'intervention des facteurs étant choisi, après ou sans modification, on est conduit dans un premier stade à diviser, pour chacun de ces facteurs physico-climatiques, la région étudiée en zones où celui-ci présente une certaine homogénéité dans son ensemble; pour cela il faut déterminer la clé de division en secteurs homogènes. Or, si qualitativement les facteurs physico-climatiques d'une région sont assez bien connus a priori, il en va autrement lorsque l'on veut les estimer quantitativement pour en justifier l'homogénéité.

Nous allons illustrer ce travail de cartographie pour la délimitation des zones hydrologiques homogènes en prenant comme exemple une partie intéressante du bassin de la Maine, presque incluse en totalité dans le département de l'Orne et qui correspond à l'extrémité centre-nord du bassin de la Maine; elle couvre les pays du Perche et de la plaine d'Alençon, et l'on y trouve les hauts bassins de la Sarthe et de l'Huisne, gros affluents de la Maine. Il s'agit d'une région variée de collines, formant à l'extrémité occidentale du bassin parisien la séparation entre les bassins de l'Orne et de la Maine, reposant sur des terrains secondaires divers.

### 2.3.1. LA NATURE DU SOUS-SOL OU SA PERMÉABILITÉ

Les caractéristiques du sol et du sous-sol s'imposent au premier stade de division en secteurs de caractéristiques homogènes. Cette division paraît devoir s'accomplir selon le critère de la perméabilité du sol et du sous-sol afin d'individualiser des zones à dominance imperméable ou à dominance perméable; plus précisément le critère de perméabilité doit s'entendre comme le critère de l'existence ou non de nappes plus ou moins liées à l'écoulement de surface, critère qui paraît être le plus intéressant en matière de régime d'écoulement des eaux de surface. On peut également tenir compte dans les critères de division de la vitesse de liaison entre écoulement de cours d'eau et nappe, ou encore du temps de réponse d'une nappe aux précipitations; de ces deux facteurs de temps découle un effet plus ou moins « tampon » du sous-sol sur la restitution des eaux infiltrées à l'écoulement de surface. On est ainsi conduit à séparer les zones où la majorité des écoulements sont superficiels de celles où existe une nappe aquifère qui participe quantitativement de manière non négligeable à l'écoulement des cours d'eau.

La clé de la division réside donc dans l'existence ou l'absence d'un sous-sol perméable et dans le fait que la nappe aquifère de ce terrain perméable, si elle existe, est drainée ou non, en totalité ou partiellement, rapidement ou lentement, par le réseau hydrographique. La perméabilité du sol intervient généralement de façon secondaire et reste un facteur variable déterminant la plus ou moins grande potentialité de ruissellement (ou d'infiltration) dudit sol. En effet, sous cet angle de la perméabilité, sol et sous-sol sont liés mais peut-être pas d'une manière aussi étroite qu'on pourrait le supposer, les conditions de la pédogénèse pouvant très bien modifier, voire inverser relativement la plus ou moins grande perméabilité d'un sol vis-à-vis du sous-sol. On veille donc à tenir compte des influences du sol sur le sous-sol surtout lorsqu'elles sont contradictoires.

Sur le plan quantitatif, on affronte la difficulté de la séparation entre ces deux types de zones entre lesquelles il n'y a pas de frontière précise.

Si la nappe aquifère est drainée par le réseau hydrographique local, on pourrait prendre comme limite un certain pourcentage de l'écoulement total moyen annuel fourni par le drainage (peut-être 40% pour la limite inférieure de la zone à dominance perméable et 10% pour la limite supérieure de celle à dominance imperméable).

En l'absence de drainage local, on pourrait reporter le choix du critère distinctif sur la valeur de la perméabilité moyenne des terrains  $K$  mesurée dans des conditions bien déterminées (méthodes d'analyse hydrodynamique des sols en laboratoire ou au champ selon les procédés de MUNTZ ou PORCHET par exemple). On pourrait admettre ainsi comme zone perméable celle où la perméabilité  $K$  est supérieure à  $2,10^{-5}$  m/s, soit 35 mm/h environ et comme imperméable celle où  $K$  est inférieure à  $4,10^{-6}$  m/s, soit 15 mm/h environ.

Il ne faut pas confondre ces valeurs de perméabilité, qui correspondent au coefficient de l'équation de DARCY, avec d'autres valeurs que certains hydrologues qualifient abusivement de perméabilités telles que l'infiltration réelle *in situ* ou encore le seuil inférieur de précipitation utile, toutes deux assez différentes ne seraient-ce que par la microhétérogénéité du terrain, l'action mécanique de la pluie, etc.

Dans les deux cas, la bande intermédiaire représente une zone sans dominance particulière en matière de perméabilité.

Il est certain que le choix des limites quantitatives est un peu arbitraire; nous n'en avons parlé que pour en montrer les difficultés car en pratique on ne possède ni les renseignements (critère du pourcentage d'écoulement), ni les moyens de calcul rapide (critère de perméabilité moyenne), ni la certitude que le critère quantitatif de distinction soit significatif (nous pensons à K). La séparation des zones doit donc se faire qualitativement. Le choix est peut-être plus arbitraire, mais il est plus rapide et plus aisé pour un spécialiste averti.

En pratique, il est heureux que le sol joue un rôle peut-être moins important que le sous-sol (?) car les documents cartographiques le concernant, qu'il s'agisse de pédologie ou même de géomorphologie, sont assez rares. La source d'information la plus complète est la carte géologique, qu'il faut interpréter en fonction des connaissances que l'on peut avoir sur le manteau d'altération, les couches superficielles et le sol proprement dit.

S'il existe une carte hydrogéologique de la région, comme pour le Bassin parisien, on s'y réfère de préférence à la carte géologique puisqu'elle en est déjà une interprétation avec classement du sous-sol en types de terrain perméable, faiblement perméable ou imperméable. Sinon, il faudra avoir recours aux cartes géologiques soit au 1/80 000<sup>e</sup>, soit au 1/320 000<sup>e</sup> et en faire l'interprétation, en précisant les points suivants (souvent après enquête régionale et examen d'études locales hydrogéologiques):

— Existence ou non d'un drainage de nappe par les cours d'eau — présence de sources;

— Existence de zones karstiques: pertes, résurgences.

Pour le bassin de la Maine, nous avons travaillé en collaboration avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) qui avait effectué une analyse hydrogéologique préalable de l'information géologique, analyse orientée vers l'objectif de planification de réseau [11].

De ce travail, nous avons conclu que la division du sous-sol selon sa perméabilité, au sens large explicité ci-dessus, pouvait se faire en cinq classes. Elles sont présentées ci-après, avec pour chacune quelques exemples des terrains géologiques à y inclure et des étages stratigraphiques correspondants en France.

*P<sub>1</sub>. — Zone perméable à aquifère « drainant » ou non drainé:*

Terrain perméable apte à constituer un aquifère important et généralisé;

— L'aquifère est qualifié de « drainant », lorsque, le terrain étant très perméable, les précipitations s'infiltrent en presque totalité, et qu'en surface le réseau hydrographique est très peu ou pas du tout développé, exemple du calcaire de Beauce (Stampien);

— L'aquifère est non drainé, lorsqu'il n'alimente pas ou peu le réseau hydrographique en place.

*P<sub>2</sub>. — Zone perméable à aquifère drainé:*

Terrain perméable ayant un aquifère important et généralisé alimentant en tout ou partie le réseau hydrographique en place;

- Alluvions récentes sablo-argileuse et limoneuse: Quaternaire, Pliocène;
- Sables: Eocène, Sénonien, Turonien, Cénomaniens Albien;
- Calcaires poreux et craie: Aquitanien, Ludien;
- Grès: Trias inférieur.

**P<sub>3</sub>. — Zone à perméabilité moyenne ou faible:**

Principalement terrain à perméabilité moyenne et faible mais aussi terrain perméable de faible extension et puissance, susceptibles de ne former qu'un aquifère d'importance et d'extension réduites;

- Domaines sableux ou crayeux avec couverture d'argile à silex;
- Calcaire de Touraine: Sannoisien;
- Sables, grès et calcaires: Bartonien, Lutétien;
- Calcaires et marnes: (Portlandien), Oxfordien, Lias indifférencié.

**P<sub>4</sub>. — Zone karstique:**

Terrain à perméabilité en grand présentant un écoulement souterrain très irrégulier prédominant, c'est-à-dire possédant un réseau karstique important;

- Calcaires karstifiés: Portlandien, Lusitanien, Bathonien-Bajocien, Muschelkalk

**P<sub>5</sub>. — Zone imperméable:**

Terrain imperméable sans aquifère notable;

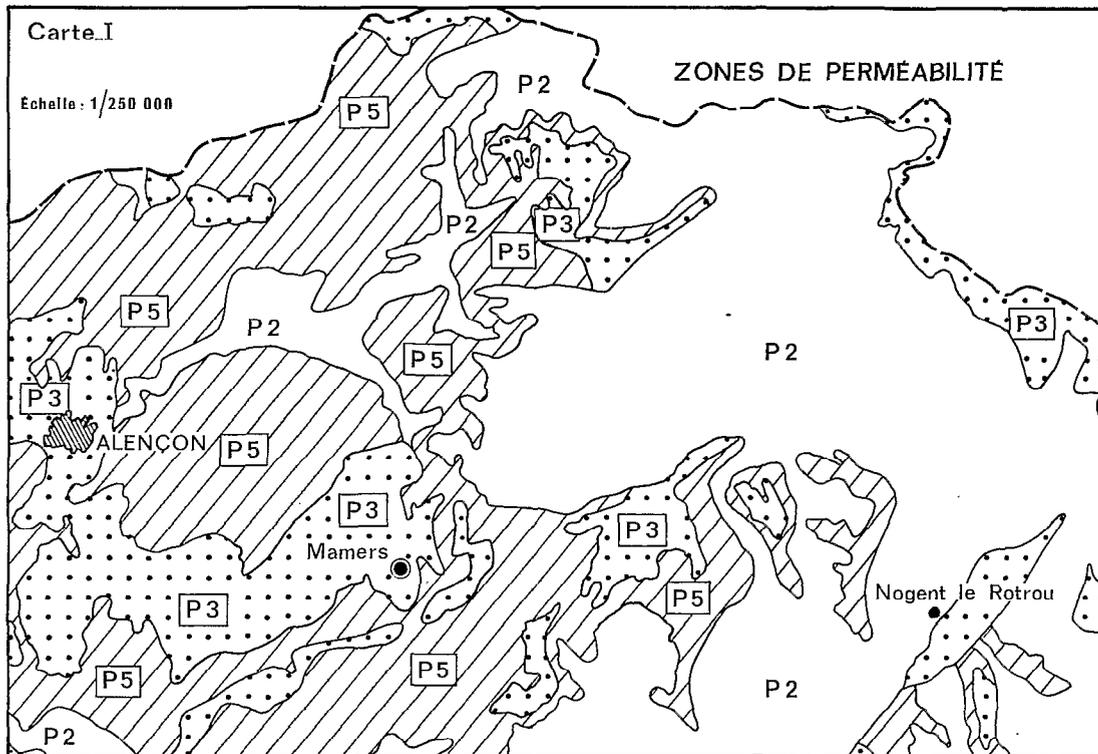
- Marnes et argiles: Sannoisien inférieur-Ludien, Cénomaniens-Albien, Oxfordien-Callovien, Kimméridgien, Lias supérieur, Kcuper et Lettenkohle;
- Schistes: Carbonifère moyen, Dévonien, Silurien, Précambrien;
- Massifs granitiques.

En pratique la détermination en régions de perméabilité homogène se fait en deux stades.

Au premier stade, sur calque avec fond de carte atténué, à l'échelle de base, soit par exemple au 1/250 000<sup>e</sup>, sont représentés les principaux terrains ou zones de terrains composant le sous-sol de la région, affectés de leur indice de perméabilité (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>); il est souhaitable que ce calque soit établi par un hydrogéologue, sinon qu'il le soit au moins sous ses conseils.

Puis au second stade, sur un autre calque, l'hydrologue établit la carte définitive des régions de perméabilité homogène en réunissant les terrains voisins ayant le même indice et en stylisant le pourtour de ces régions. Il sera amené ainsi à réunir en une seule zone des terrains de classes différentes, opposées, même extrêmes (P<sub>1</sub> et P<sub>5</sub> par exemple) qui, par leur faible extension et leur succession, forment en quelque sorte une zone de perméabilité moyenne mais hétérogène; cette zone sera indicée P<sub>3-H</sub> et ne sera prise en considération, lors du choix des bassins, qu'une fois épuisées les possibilités de la zone P<sub>3</sub>.

Il est à signaler qu'il est beaucoup plus facile d'agrandir, lors du report sur document au 1/250 000<sup>e</sup>, les limites des différentes zones d'après un document de plus faible échelle, comme c'est le cas avec la carte hydrogéologique précitée, que de réduire et de styliser celles fournies par des documents à plus grande échelle tels que la carte géologique de France au 1/80 000<sup>e</sup>; il est alors recommandé de s'inspirer pour la stylisation de la carte géologique au 1/320 000<sup>e</sup>.



La carte I montre les zones de perméabilité de la région choisie en exemple. On y trouve trois types de terrains :

a) perméables à aquifère drainé de classe  $P_2$  correspondant aux alluvions récentes et surtout aux sables (Sénonnien, Cénomannien) et à la craie (mêmes étages) que l'on trouve en majorité dans le Perche (haut-bassin de l'Huisne);

b) imperméables de classe  $P_5$  correspondant aux marnes et argiles (Oxfordo-Callovien) du haut-bassin de la Sarthe;

c) à perméabilité moyenne ou faible de classe  $P_3$  qui correspondent aux alternances de sables et argiles à silex, ou de calcaires et marnes qui se trouvent à l'intérieur ou en bordure des terrains imperméables de la haute Sarthe. Les imbrications des terrains de classes  $P_2$  et  $P_5$  sont telles que beaucoup de groupements hétérogènes ont été formés sous la classe  $P_{3-H}$

### 2.3.2. LE RELIEF

Le relief est un facteur d'importance capitale sur la plus ou moins grande aptitude au ruissellement des terrains; il peut modifier la répartition entre infiltration et ruissellement, estimée sous le simple aspect de la perméabilité; il est surtout un facteur de répartition des eaux de pluie entre le ruissellement et l'évapotranspiration réelle.

La préhension du relief doit être la plus globale possible; elle peut rester qualitative comme pour la perméabilité mais il est facile d'en donner une vision quantitative

sans avoir à effectuer des calculs complexes. Pour cela, on adopte une classification des bassins en sept classes de relief, définie ci-dessous, ce qui permet ensuite une subdivision du paysage en zones de même classe de relief.

### 2.3.2.1. Détermination de la classe de relief d'un bassin

Le relief d'un bassin est pleinement représenté par ses indices de pentes  $I_p$  ou  $I_G$ .

L'indice de pente  $I_p$  a été défini par M. ROCHE [12]. On le calcule en appliquant la relation:

$$I_p = L^{-1/2} \sum (a_i d_i)^{1/2} \quad (1)$$

dans laquelle:

—  $a_i$  représente la portion (%) de la surface  $A$  du bassin comprise entre les courbes de niveau voisines  $c_i$  et  $c_{i-1}$ ;

—  $d_i = c_i - c_{i-1}$  dénivelée entre les deux courbes de niveau voisines cotées  $c_i$  et  $c_{i-1}$ ;

—  $L$  la longueur du rectangle équivalent déterminée par la formule:

$$L = A^{1/2} \frac{C}{1,128} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{C} \right)^2} \right] \quad (2)$$

où  $C$  est l'indice de compacité ou coefficient de forme, avec:

$$C = 0,282 P A^{-1/2} \quad (3)$$

Outre le tracé des courbes de niveau (il en faut trois au moins pour que l'indice ait une certaine précision), il faut délimiter le bassin, mesurer la surface  $A$ , son périmètre  $P$ , calculer  $C$  et  $L$ , puis mesurer les surfaces intermédiaires entre les diverses courbes de niveau. L'unité de base de calcul de tous ces caractères est le kilomètre;  $P$ ,  $L$ ,  $d_i$  s'expriment en kilomètres,  $A$  en  $\text{km}^2$ ,  $C$  et  $I_p$  sont des nombres sans dimension.

Ce travail assez facile peut cependant être considéré comme trop long, pour une prospection cartographique générale n'ayant pour but que de distinguer des régions à relief homogène et au cours de laquelle plusieurs centaines de bassins doivent faire l'objet de mesures.

On simplifie la tâche en se contentant de calculer l'indice de pente globale  $I_G$  qui s'exprime, lui, en  $\text{m}/\text{km}$  ou en %.

Rappelons qu'il ne s'agit pas d'un indice de pente précis, comme  $I_p$  bien qu'il lui soit assez étroitement lié, mais d'un indice simple dont la formule est:

$$I_G = \frac{D}{L} \quad (4)$$

La dénivelée  $D$ , évaluée en mètres, est prise égale à celle qui sépare les altitudes ayant approximativement 5% de la surface du bassin au-dessus et au-dessous d'elles;  $H_5$  et  $H_{0,5}$  se déterminent à l'estime au vu de la carte altimétrique sans tracer la courbe hypsométrique:

$$D = H_5 - H_{0,5}$$

L'indice de pente global  $I_G$  a été primitivement conçu pour faciliter l'étude des bassins représentatifs de faible superficie [13]. C'est pourquoi la première subdivision

en classes de relief d'après  $I_G$  (on peut le faire aussi d'après  $I_p$  l'indice de pente de M. ROCHE) a-t-elle eu pour base  $25 \text{ km}^2$ .

Pour une surface de base de  $25 \text{ km}^2$ , il a été établi une division arbitraire du relief en sept classes, à partir d'une division logarithmique des indices de pente  $I_p$  et  $I_G$ . Cela a donné le tableau de classement suivant, en fonction de  $I_G$ :

$R_1$	Relief très faible	$I_G < 2 \text{ m/km}$
$R_2$	Relief faible	$2 < I_G < 5 \text{ m/km}$
$R_3$	Relief assez faible	$5 < I_G < 10 \text{ m/km}$
$R_4$	Relief modéré	$10 < I_G < 20 \text{ m/km}$
$R_5$	Relief assez fort	$20 < I_G < 50 \text{ m/km}$
$R_6$	Relief fort	$50 < I_G < 100 \text{ m/km}$
$R_7$	Relief très fort	$I_G > 100 \text{ m/km}$

L'indice de pente d'un bassin,  $I_p$  ou  $I_G$ , diminue quand la superficie du bassin croît. Cette variation est à peu près linéaire entre les logarithmes des indices et de la superficie.

Les indices de pente de bassins de superficie différente ne sont donc pas comparables.

Pour les rendre comparables, on doit s'affranchir de l'effet de superficie; à cet effet, on a introduit un caractère nouveau que nous convenons d'appeler la « dénivelée spécifique »  $D_s$  (\*) et qui, homogène à une longueur, s'exprime en mètres. La dénivelée spécifique  $D_s$  est le produit de l'indice de pente global par la racine carrée de la superficie du bassin.

$$D_s = I_G A^{1/2}$$

$$\text{ou } D_s = D \times K$$

$$\text{avec } K = \frac{A^{1/2}}{L}$$

Or, d'après la formule (2), nous déduisons que:

$$\frac{1}{K} = \frac{L}{A^{1/2}} = \frac{C}{1,128} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{C} \right)^2} \right] = f(C)$$

d'où il apparaît que  $K$  n'est fonction que de  $C$ , c'est-à-dire de la forme du bassin.

Par conséquent,  $D_s$  est le produit de la dénivelée  $D$  par un coefficient dépendant de l'indice de compacité  $C$ , lequel coefficient est égal à 1 lorsque  $C \leq 1,128$  par définition de  $C$ , voir formules (2) et (3).

La dénivelée spécifique  $D_s$  est donc indépendante de la surface du bassin, et par conséquent ses valeurs pour différents bassins sont immédiatement comparables entre elles.

Cela nous permet de dresser un nouveau tableau de classement, déduit du précédent établi pour une surface de  $25 \text{ km}^2$ , et applicable, celui-ci, à tout bassin *quelle que soit sa superficie*:

(\*) Nous pourrions également l'appeler la « dénivelée réduite »

R <sub>1</sub>	Relief très faible	D <sub>s</sub> < 10 m
R <sub>2</sub>	Relief faible	10 < D <sub>s</sub> < 25 m
R <sub>3</sub>	Relief assez faible	25 < D <sub>s</sub> < 50 m
R <sub>4</sub>	Relief modéré	50 < D <sub>s</sub> < 100 m
R <sub>5</sub>	Relief assez fort	100 < D <sub>s</sub> < 250 m
R <sub>6</sub>	Relief fort	250 < D <sub>s</sub> < 500 m
R <sub>7</sub>	Relief très fort	D <sub>s</sub> > 500 m

Le fait que D<sub>s</sub> ne soit fonction que de D et de C, nous affranchit des calculs intermédiaires; cela nous a permis en outre de dresser un abaque à points alignés assez simple (fig. 2).

Sur cet abaque, l'alignement A.P. nous définit le point C; par une courbe auxiliaire nous obtenons la valeur et le point K; l'alignement KD nous donne le point R c'est-à-dire la valeur D<sub>s</sub> ou directement la classe de relief R<sub>i</sub>.

En pratique, sur la carte topographique, dotée de courbes de niveau, à l'échelle du 1/100 000<sup>e</sup>, par exemple, on détermine:

- la dénivelée D à l'estime;
- la surface A par planimétrage;
- le périmètre P à l'aide du curvimètre.

Pour la mesure du périmètre P, il faut styliser le dessin du contour du bassin en éliminant dentelures et festons qui n'ont aucune influence sur les temps d'écoulement et accroissent la valeur du périmètre. Ces irrégularités du contour dépendent de la minutie apportée au tracé du contour et leur dessin est donc très variable.

Le coefficient de forme C, calculé d'après A et P, doit en effet représenter la plus ou moins grande vitesse de concentration de l'écoulement vers l'exutoire, donc donner une image du temps de concentration. La mesure de P doit donc tenir compte de l'extrémité contenant le thalweg le plus long, mais ne doit pas s'attarder inutilement à suivre les courbures de la limite du bassin dues à quelque affluent secondaire sans effet sur le temps d'écoulement.

Pour que A et P soient évalués avec une précision acceptable, il faut que l'aire à mesurer *sur le document* soit supérieure à 5 cm<sup>2</sup> et le périmètre à 10 cm [13]; ce qui fixe pour la carte au 1/100 000<sup>e</sup>, la limite supérieure de surface admissible à 7 km<sup>2</sup>; or nous sommes dans une gamme bien supérieure de bassin pour la planification du réseau de base puisqu'il est peu vraisemblable, sauf régions très accidentées et particulières (îles par exemple) que des stations de réseau soient implantées en dessous d'environ 50 km<sup>2</sup> de bassin versant.

Quant à la limite inférieure de dénivelée D (m) recommandée pour le calcul de I<sub>p</sub> et de I<sub>G</sub> elle est D = 3 d<sub>i</sub>. L'équidistance des courbes pour la carte au 1/100 000<sup>e</sup> est de 20 m en général et de 10 m en plaine, ce qui porte la limite inférieure de la dénivelée à 30 m pour qu'une précision acceptable soit obtenue [13].

En zone de plaine, pour un bassin ayant un coefficient de compacité C ≤ 1,128, on a alors K = 1 d'où D<sub>s</sub> = D = 3 d<sub>i</sub> et la limite inférieure de D<sub>s</sub> étant de 30 m, il serait classé en limite inférieure de R<sub>3</sub> (relief assez faible). Il faudrait donc en plaine une carte d'échelle plus grande. En fait, il ne faut pas oublier que la limite D = 3 d<sub>i</sub> est fixée surtout pour que l'indice de pente I<sub>p</sub> soit déterminé avec une précision acceptable, pour D<sub>s</sub> nous pouvons descendre sans inconvénient au-dessous de cette limite

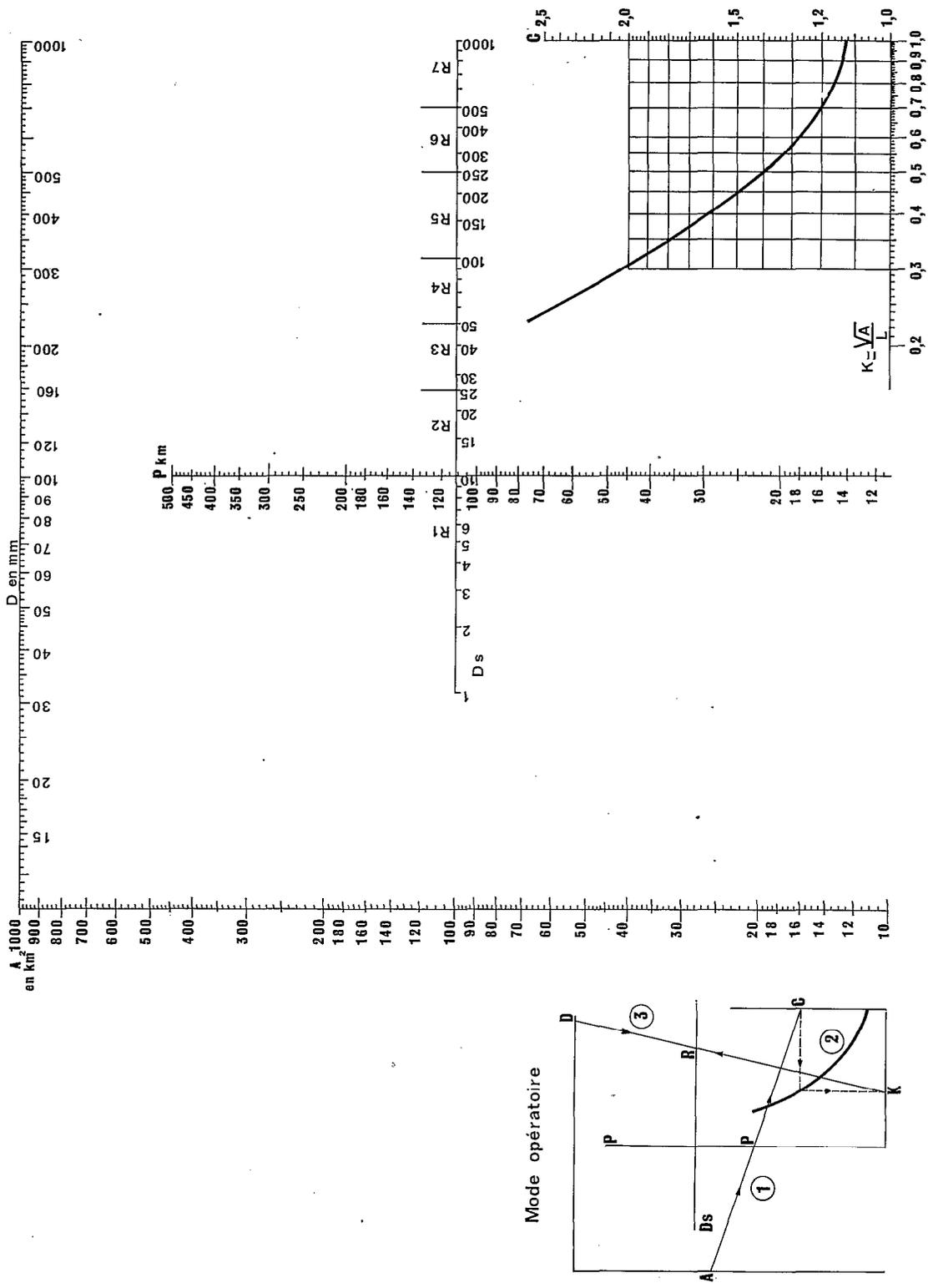


Fig. 2 — Abaque de calcul de la dénivelée spécifique et des classes de relief.

dans le cadre d'une prospection cartographique générale n'ayant pour but que de distinguer des régions à relief homogène. La carte au 1/100 000<sup>e</sup> type France I.G.N. convient donc à cette prospection.

### 2.3.2.2. Détermination des régions de même classe de relief

Compte tenu, d'une part, qu'il est peu vraisemblable qu'un réseau hydrométrique possède des stations à l'issue de bassin de moins de 25 km<sup>2</sup>, et, d'autre part, que les bassins ne sont jamais homogènes sous l'angle des pentes, surtout lorsque les superficies dépassent quelques centaines de km<sup>2</sup>, la délimitation des classes de relief s'effectue sur bassins unitaires oscillant de préférence entre 50 et 100 km<sup>2</sup>. On peut envisager, pour des bassins de plus grande superficie, composés de sous-bassins unitaires, de déterminer leur classe de relief tant que la complexité du relief des sous-bassins le permet (c'est-à-dire qu'il n'y a pas trop d'hétérogénéité entre eux — écart d'une classe de relief au plus), mais la limite supérieure pour une telle détermination semble être de l'ordre de 500 km<sup>2</sup>.

Une région de l'ordre de 25 000 km<sup>2</sup> sera donc subdivisée en 400 bassins unitaires environ.

Dans ce cas, il semble préférable pour déterminer les différents facteurs A, L, D et D<sub>s</sub> ou R, d'effectuer chaque opération, planimétrage, curvimétrage, estimation de D et détermination de R, pour une série de bassins groupés en grands ensembles (bassin ou sous-bassin fluvial) que bassin par bassin.

Il est également préférable de tracer les limites des bassins dans un certain ordre, par exemple de les prendre dans l'ordre des confluences en partant de la source du cours principal, et de les identifier: nom, si possible, du cours principal drainant le bassin considéré et du lieu le plus proche de l'exutoire dudit bassin, et numérotation.

Lors du tracé des bassins unitaires, l'on recherche dans la mesure du possible une bonne compacité de manière à diminuer l'influence de la forme du bassin dans la détermination de D<sub>s</sub> et de la classe de relief R.

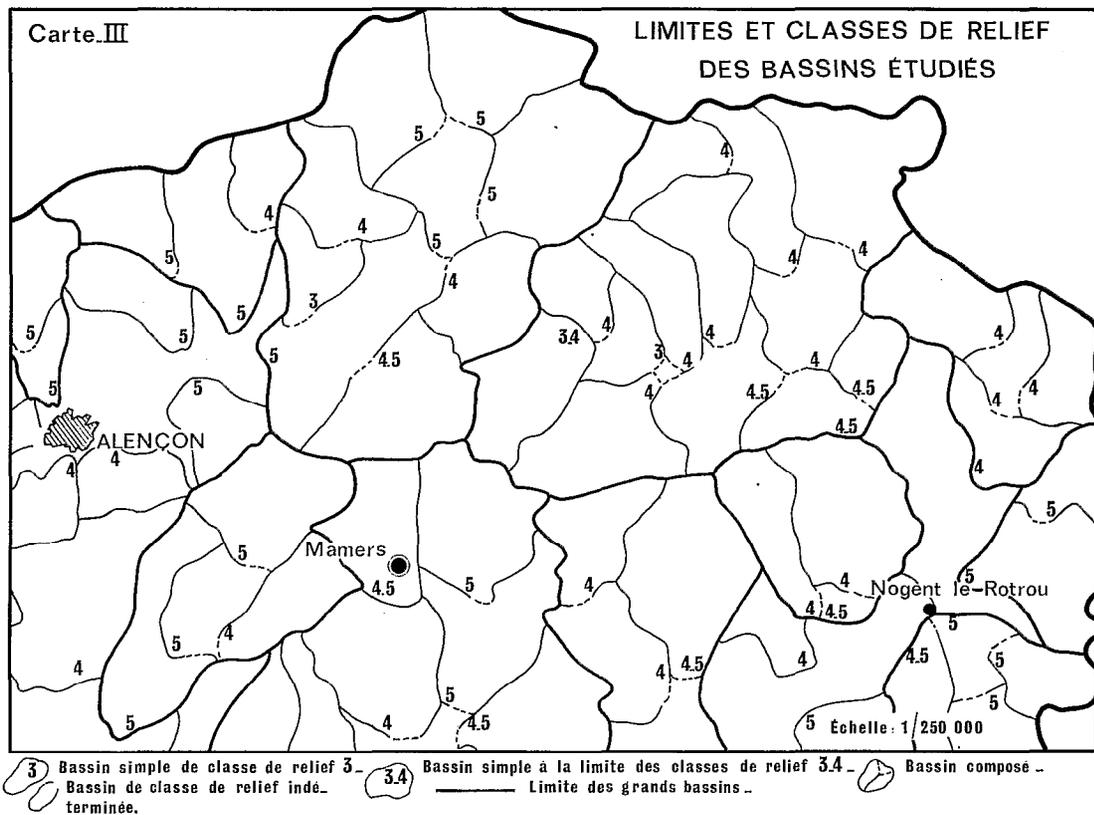
On arrête son choix sur la limite inférieure d'un bassin unitaire d'après diverses considérations: rupture visible de pentes dans le paysage, confluence proche, etc.

La détermination des régions de même classe de relief se fait en deux temps.

Toujours sur calque et à l'échelle de synthèse (par exemple le 1/250 000<sup>e</sup>), on reporte d'abord les limites des bassins versants étudiés; on peut y ajouter les limites de grands ensembles ou tous ensembles hydrographiques dont on n'a déterminé que la superficie. Pour chaque bassin l'on indique son numéro et la classe de relief à laquelle il appartient — R<sub>4</sub> par exemple — ou mieux l'indice de cette classe — 4. Si le bassin est à la limite de 2 classes de relief, les deux classes seront indiquées: R<sub>3-4</sub> ou 3-4, pour un bassin à la limite des classes de relief R<sub>3</sub> et R<sub>4</sub>.

Ce calque de travail sera très utile lors du choix des stations.

La carte III nous en donne une représentation pour la région pilote choisie. On y voit bien l'influence de la forme du bassin sur la classe de relief: ainsi sur le cours supérieur de l'Huisne apparaît-il à la faveur d'un ou deux sites correspondant à des bassins allongés des classes de relief R<sub>3</sub> alors que manifestement le paysage régional est de classe de relief R<sub>4</sub> et même à tendance R<sub>5</sub>, comme le prouvent toutes les autres déterminations faites sur le bassin de l'Huisne en amont de Nogent-le-Rotrou.

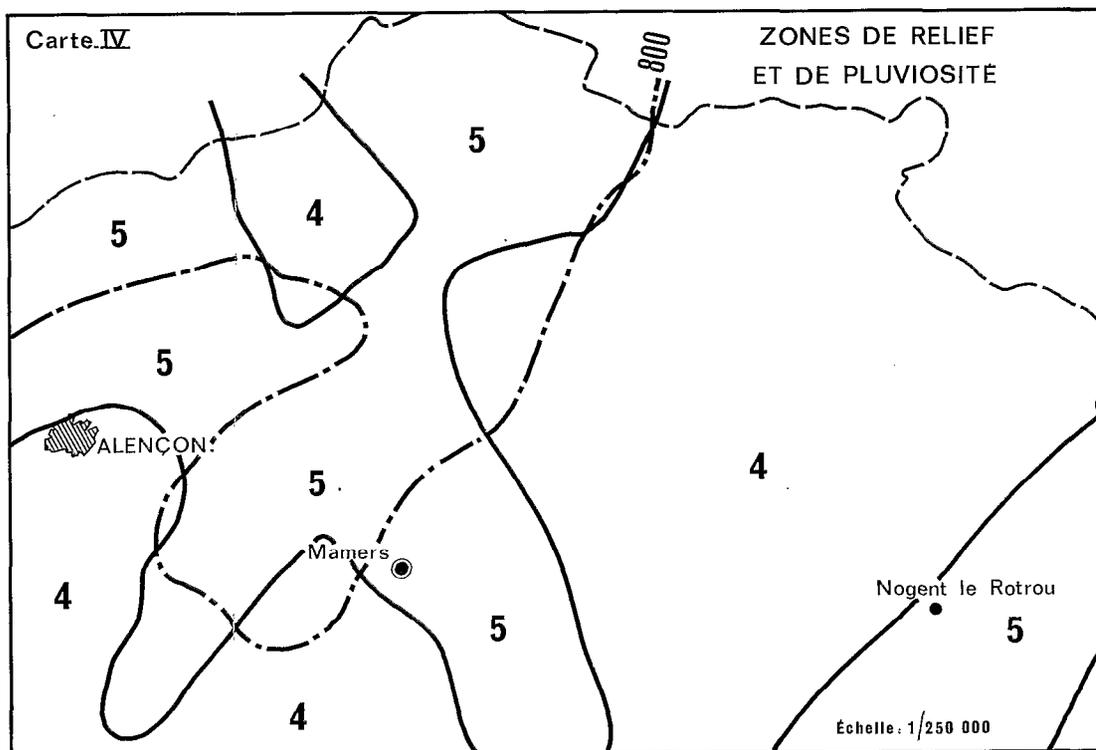


Ensuite, sur un deuxième calque, élaboré d'après le premier, sont tracées les limites des zones de même classe de relief, limites englobant les bassins versants unitaires appartenant à cette classe ou à la limite de celle-ci: un bassin d'indice 3-4 peut aussi bien être intégré dans une zone de relief  $R_4$  ou  $R_3$  si les bassins l'envoyant sont respectivement d'indice 4 ou d'indice 3.

Un bassin isolé ayant son indice voisin de celui de l'ensemble des bassins adjacents est inclus dans la même zone de relief que ces bassins, car l'on ne tient plus compte alors de l'appartenance à un même grand bassin hydrographique.

Il s'agit, comme lors du tracé de la carte des perméabilités, d'une opération de stylisation des zones de relief. C'est pourquoi après le travail de découpage stylisé en zones hydrologiques homogènes, il est très utile de revenir à la carte des pentes des bassins unitaires pour la sélection des stations.

La carte IV montre le résultat auquel l'on arrive à partir des déterminations figurées sur la carte III. Ainsi l'apparition fortuite de classe  $R_3$  sur le cours supérieur de l'Huisne disparaît-elle, comme non significative, dans une zone homogène de classe  $R_4$ ; on apprécie de même la séparation en zones de classes  $R_4$  et  $R_5$  effectuée dans le haut bassin de la Sarthe par regroupements sectoriels au-dessus des limites hydrographiques.



5 Classe de relief - 800: Isohyète interannuelle (période 1931-1960) en mm. - - - - Limite de classe de pluviosité.  
 ——— Limite de zone de relief.

### 2.3.3. LE CLIMAT

Le climat intervient généralement dans le bilan hydrologique essentiellement par les précipitations (hauteur annuelle, irrégularité interannuelle, répartition mensuelle, type de précipitations, hauteurs de précipitations exceptionnelles, intensités-durées-surfaces des chutes de pluie, etc.), secondairement par les températures (moyenne annuelle, variation mensuelle, maximums, minimums et écarts, etc.) et beaucoup plus accessoirement par le régime des vents et l'humidité.

Or, en France, la faible superficie d'une région fait que le climat qui y règne est assez homogène et sans grande variabilité, ce qui permet de négliger les facteurs secondaires: humidité, insolation, etc.

Il reste que le climat peut être caractérisé sous le seul aspect de la pluviosité et de la température, sans exclure tout autre facteur sélectif dans des cas particuliers, pour discriminer les régions homogènes.

En région de climat tempéré, non montagneux, la quantité réduite de jours de gel et de neige peut permettre de négliger le facteur température et de s'en tenir seulement à la pluviosité.

La pluviosité peut être représentée par deux termes: la hauteur moyenne annuelle de précipitations d'une part; et si besoin est, et si des informations sont disponibles, le pourcentage des précipitations dues à la neige en saison d'hiver, d'autre part.

Cette dernière influence peut être caractérisée également par un isotherme ou une altitude plus ou moins précise.

On sait en effet que dans une région peu étendue tous les autres caractères du régime des précipitations sont assez étroitement liés à la hauteur annuelle de pluies.

Donc, dans la plupart des cas, la hauteur moyenne annuelle est la clé de la division en zones climatiques homogènes; cette diversification se fait en fonction du gradient pluviométrique régional.

Par exemple, en Lorraine, la majeure partie du plateau a une pluviosité comprise entre 650 et 1 000 mm, puis au contact des Vosges la pluviométrie passe de 1 000 à 2 200 mm environ, aussi avons-nous pris le découpage suivant en classes de climat homogène, de pluviosité croissante:

- H<sub>1</sub> Précipitations annuelles moyennes inférieures à 800 mm.
- H<sub>2</sub> Précipitations annuelles moyennes comprises entre 800 et 1 000 mm.
- H<sub>3</sub> Précipitations annuelles moyennes comprises entre 1 000 et 1 400 mm.
- H<sub>4</sub> Précipitations annuelles moyennes comprises entre 1 400 et 1 800 mm.
- H<sub>5</sub> Précipitations annuelles moyennes supérieures à 1 800 mm.

La limite des zones climatiques homogènes coïncide avec le tracé des isohyètes moyennes interannuelles correspondantes; soit pour la Lorraine les isohyètes 800-1 000, 1 400 et 1 800. Ces isohyètes sont portées comme de bien entendu sur calque à l'échelle de synthèse.

Dans le bassin de la Maine, au climat océanique à légère tendance continentale vers l'Est, les précipitations annuelles moyennes varient entre 500 et 1 300 mm.

Nous avons divisé le climat en quatre classes de pluviosité croissante déterminées à partir de la moyenne interannuelle (1931-1960) des précipitations:

- H<sub>1</sub> Précipitations < 600 mm.
- H<sub>2</sub> Précipitations comprises entre 600-800 mm.
- H<sub>3</sub> Précipitations comprises entre 800-1 000 mm.
- H<sub>4</sub> Précipitations > 1 000 mm.

Pour la région pilote, le tracé de ces isohyètes limites de classes de pluviosité est figuré sur la carte III, avec le relief. Peu accidentée, la région pilote est seulement traversée par l'isohyète 800 mm et donc scindée en deux classes: H<sub>3</sub> au Nord-Ouest, H<sub>2</sub> au Sud-Est.

Nous n'avons pas eu besoin, pour traiter les deux régions citées (Lorraine et Maine), de faire appel au critère de température, aussi est-il assez difficile de préciser sous quel aspect quantitatif il convient de l'appliquer.

On peut considérer que pour des pays plus ou moins tempérés comme la France l'effet thermique le plus net sur le régime des écoulements en cours d'eau est l'existence ou non de gel plus ou moins prolongé: rupture des conditions d'infiltration sur sol gelé, risque de prise en glace totale ou partielle des biefs des cours d'eau.

Les critères quantitatifs seraient à choisir entre:

- Tracé de l'isotherme moyen mensuel de 0 °C;
- Tracé de l'isotherme minimal moyen mensuel de 0 °C;
- Nombre moyen annuel de jours continus de gel.

En pays chaud, méditerranéen ou intertropical, la température intervient comme

facteur de l'évapotranspiration potentielle, laquelle influe sur la possibilité qu'ont les pluies de donner ou non de l'écoulement.

Il n'est pas certain alors que la prise en compte des seuls isothermes moyens ou maximums moyens mensuels suffise, peut-être faudrait-il faire appel à l'une des formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle (THORNTHWAITE, TURC ou PENMAN ?...).

Seules des applications pratiques permettraient de choisir ici ou là le bon indice thermique ou évaporométrique pouvant servir de clef accessoire à la division climatique.

#### 2.3.4. LA VÉGÉTATION

La couverture végétale est le dernier élément du milieu naturel qui puisse intervenir pour la détermination de régions homogènes du point de vue hydrologique.

Le choix des différents facteurs précédents implique plus ou moins, a priori, une prise en considération de la végétation naturelle.

La végétation ne peut donc intervenir comme élément de différenciation, en quatrième stade, sous son aspect botanique et naturel mais sous son aspect de couverture du sol, plus ou moins modifiée sous l'influence de l'homme.

Voyons tout d'abord comment le problème peut être analysé pour un pays, tel la France, de climat tempéré et d'agriculture intensive dans lequel l'influence de l'homme sur le paysage est déterminante.

A la division du couvert végétal proposée par les géomorphologues de l'équipe du professeur TRICART à l'occasion d'une cartographie du bassin de la Seine, [14]: labour, prairie, vigne, verger et cultures maraîchères, friche et lande, forêt, sans oublier les zones rocheuses et les zones urbaines, nous préférons la division suivante qui tient compte de la nature et de la période de couverture, et qui est extraite d'une note de recommandations du B.E.P. (\*) relatives aux bassins d'investigation [15]:

##### A. — *Végétations pluri-annuelles:*

- a) forêt et bois;
- b) culture arbustive (verger et vignes);
- c) prairie, pâture non fauchées;

##### B. — *Végétations annuelles (labours et assolements):*

a) céréales d'hiver et prairie à faucher représentant en France le cycle hiver, printemps, été c'est-à-dire une longue période de couverture;

b) céréales de printemps et plantes sarclées représentant le cycle de printemps, automne, c'est-à-dire une courte période de couverture.

Cette division, très fine, peut être légèrement simplifiée pour des grands bassins et pour l'objectif qui nous préoccupe, en trois classes:

- a) forêt, bois et cultures arbustives;

(\*) Bureau d'Etudes Permanent pour l'Action Concertée EAU de la Délégation générale à la Recherche scientifique et technique - D.G.R.S.T.

- b) prairies non fauchées;
- c) prairies fauchées et grandes cultures.

Il n'est pas certain que l'on dispose d'éléments cartographiques permettant une étude aussi fine du couvert végétal. En tout état de cause on doit au moins caractériser le groupe végétal dominant dans une zone donnée, étant entendu, comme une récente étude l'a montré [16], que le groupe forêt, lorsqu'il est présent en grands ensembles, semble être le plus caractéristique: il influe sur le déficit annuel d'écoulement, la répartition saisonnière du même écoulement et le débit spécifique instantané de crue. Le taux de boisement peut alors être pris comme critère de division du facteur végétation, ce qui a été fait pour la Lorraine.

Le bassin de la Maine est une région essentiellement agricole présentant, outre quelques plaques forestières, deux grands types de paysage agricole ayant une influence sur l'écoulement: à l'Ouest, les champs clos séparés par haies, fossés et talus ou Bocage et, à l'Est, les champs ouverts.

Le bocage est actuellement en pleine évolution, évolution tendant à la création de champs ouverts, ce qui risque d'entraîner, avec la disparition des fossés, talus et haies, une modification du microclimat et de l'hydrologie des zones transformées.

Cette modification de l'hydrologie n'est qu'une supposition non vérifiée. Cependant il a été jugé prudent de tenir compte de l'éventualité de son existence afin d'améliorer la qualité des données que fournira le réseau.

La transformation du bocage en champs ouverts étant liée au remembrement et pour les raisons présentées ci-dessus, on a jugé utile, dans la zone de bocage, de prendre en considération des zones remembrées ou en cours de remembrement d'une part, et les zones dont le remembrement est prévu dans les 10 ans à venir, d'autre part, afin de ne pas recommander des implantations de stations qui ne seront plus représentatives avant d'avoir porté leurs fruits.

Ce qui nous amène à une division en cinq classes:

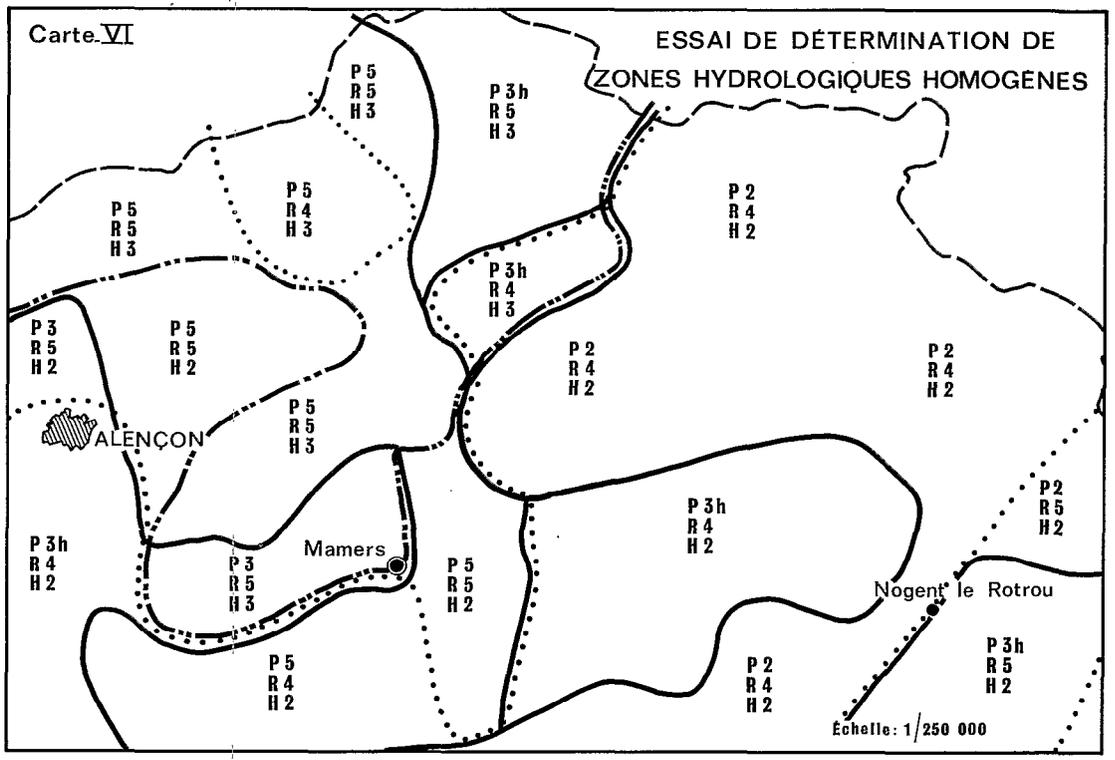
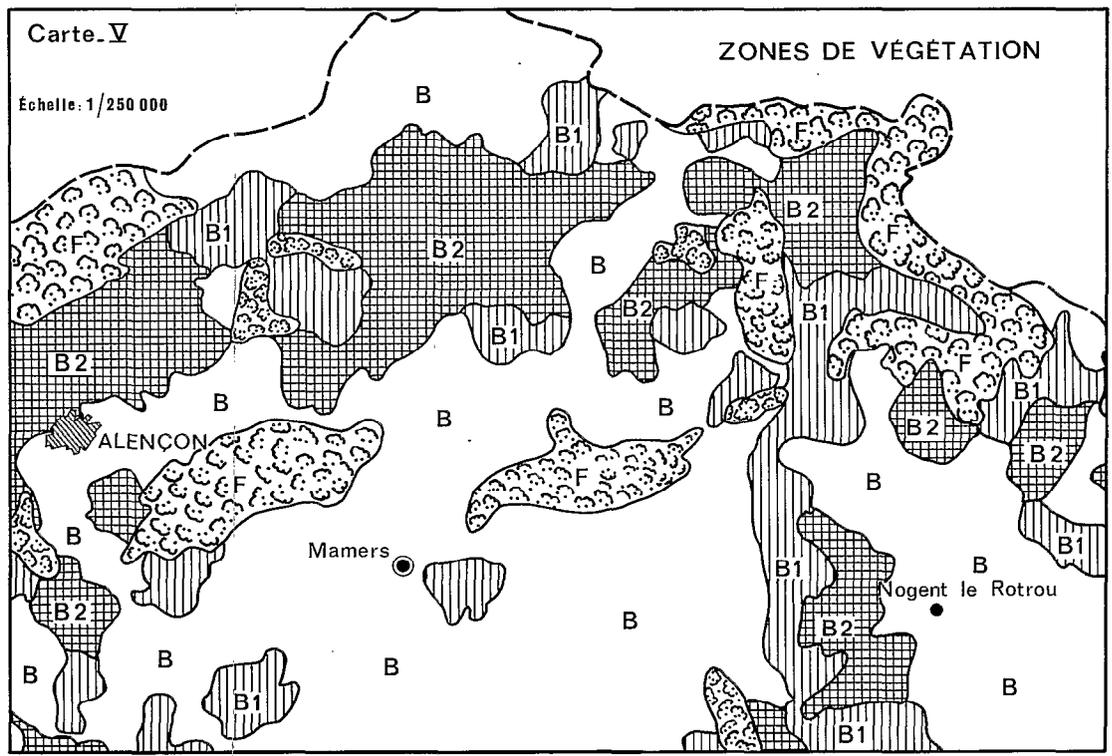
- F Forêt.
- B Bocage.
- B<sub>1</sub> Bocage à remembrement prévu.
- B<sub>2</sub> Bocage remembré (ou en cours de remembrement).
- O Champs ouverts.

Cet exemple de la Maine est évidemment assez complexe, mais les problèmes de bocage et de remembrement ont assez d'importance dans l'espace rural français pour que nous ayons jugé utile d'en tenir compte.

On voit donc que la clef de la division en classes homogènes de couverture végétale, si elle doit s'inspirer de la séparation en trois groupes a, b et c faite précédemment, doit également être adaptée à chaque région en fonction des particularités de celle-ci.

Ceci peut certainement s'appliquer à tout autre pays dont le paysage rural est comparable à celui de la France, sous l'influence prépondérante de l'intervention de l'homme. En pays d'agriculture extensive, la végétation naturelle — forêt, savane ou steppe — reste la base et l'effet du plus ou moins grand défrichement est à considérer pour effectuer la division en classes homogènes.

La division du couvert végétal se concrétise par le tracé de zones homogènes



Perméabilité P1, P2, P3, P5 - - - - - Relief R1, R2, R3, R4, R5 - - - - - Pluviosité H1, H2, H3, H4 -

dans lesquelles la couverture végétale considérée dominante occupe tout ou partie du paysage (pourcents de la superficie supérieurs à certains seuils, 75 ou 50% par exemple); suivant les régions le paysage offre plus ou moins de complexité dans sa couverture végétale et l'on doit faire appel au facteur végétal dominant ou à tout ou partie des autres facteurs.

La carte V montre ce qu'il en a été dans la région pilote de la Maine: nous sommes dans un paysage de bocage, où le remembrement a déjà été réalisé sur d'importantes surfaces dans le haut bassin de la Sarthe; du bocage naturel subsiste et l'on trouve quelques îlots forestiers sur les hauteurs couvertes d'argiles à silex et sur le socle cristallin.

### 2.3.5. DÉTERMINATION DES ZONES HYDROLOGIQUES THÉORIQUEMENT HOMOGÈNES

La conjugaison des différents facteurs  $P_1$ ,  $R_1$ ,  $H_1$ ,  $V_1$  fait apparaître des groupements de facteurs qui caractérisent les zones hydrologiques théoriquement homogènes.

La superposition des calques représentant les zones homogènes relatives à chaque critère fait apparaître les limites de secteurs de zones physico-climatiques homogènes correspondant aux zones hydrologiques théoriquement homogènes. Il est en effet souvent possible qu'une zone, par exemple  $P_1 R_1 H_1 V_1$ , occupe plusieurs emplacements géographiques distincts, que nous appelons des secteurs.

A ce stade, il faut prendre garde de ne pas pousser à l'excès les sectorisations et zonifications, car à l'extrême tous les bassins sont différents à un titre quelconque.

Aussi est-il préférable de superposer successivement les tracés relatifs aux différents critères par ordre d'importance, et, pour éviter la création de bandes marginales ou de secteurs de trop faible superficie pour contenir un bassin unitaire de 50 km<sup>2</sup> environ (8 cm<sup>2</sup> au 1/250 000<sup>e</sup>), on peut confondre le tracé assez souple de limite d'un critère avec celui plus rigide d'un autre, par exemple le tracé d'une isohyète avec la limite de deux zones de perméabilité non voisines ( $P_1$  et  $P_3$ ).

Il est même parfois préférable de n'utiliser que les trois premiers critères — perméabilité, climat, relief — lors de la première détermination graphique des zones homogènes, et de ne faire intervenir la végétation qu'à un stade ultérieur.

On aboutit à une carte des zones hydrologiques théoriquement homogènes. L'exemple de la région pilote présenté sur la carte VI, montre comment l'on arrive à une sectorisation pas trop excessive en jouant sur les limites de facteur, surtout sur celui de pluviosité. Malgré cela la variété du paysage bocager du Perche et du Pays d'Alençon est telle que sur environ 2 500 km<sup>2</sup> on arrive à 16 secteurs représentant 12 zones homogènes distinctes.

On procède alors pour terminer cette première phase de la planification à un inventaire des groupements hydrologiques homogènes et de leurs secteurs, avec leur importance superficielle, en prenant successivement chaque critère suivant son aptitude au ruissellement:  $P_5 R_6 H_5$ ,  $P_5 R_6 H_4$  ...,  $P_5 R_5 H_5$  ... etc. par exemple.

Ceci afin d'obtenir un classement grossier des zones par aptitude probable au ruissellement. De la sorte, la substitution d'un bassin par un autre situé dans une zone d'aptitude voisine est grandement facilitée lors de l'opération de sélection des stations.

Cet inventaire fait apparaître qu'un groupement peut très bien ne pas être représenté, ou alors l'être par un ou plusieurs secteurs d'importance inégale.

Lors de cet inventaire, pour une classe donnée d'un critère, il sera bon de grouper ensemble les secteurs pouvant présenter un caractère secondaire.

C'est à ce stade qu'apparaît la concordance entre le « pays » du géographe défini par une unité du paysage avec les zones hydrologiques théoriquement homogènes.

Le « pays » peut correspondre à un seul secteur de zone important créant un paysage monotone ou bien à la juxtaposition de petits secteurs de zones différentes parfois d'aptitude au ruissellement voisine, parfois d'aptitude éloignée, présentant des paysages très variés mais dont l'ensemble forme une entité pour le géographe.

## 2.4. Choix des implantations de stations

### 2.4.1. MOYENS ET CRITERES

Il s'agit d'implanter des stations pour répondre à deux besoins:

a) saisir la particularité de la plupart des zones hydrologiques théoriquement homogènes précédemment définies;

b) répondre aux objectifs généraux de l'organisme gestionnaire du réseau.

Ces deux points exigent de la part de cet organisme, dans sa politique d'aménagement des bassins hydrauliques et de mobilisation des ressources en eau pour faire face aux différents besoins en présence, de définir:

— Des zones cruciales dans lesquelles les ressources sont faibles en face de besoins importants;

— Des secteurs susceptibles de faire l'objet à court ou moyen terme d'aménagements hydrauliques, c'est-à-dire où des projets sont déjà suffisamment élaborés.

Une carte des aménagements hydrauliques et des zones cruciales d'utilisation des eaux est alors dressée. On y trouve outre ces zones, tous les grands utilisateurs d'eau (usines, dérivations, prises pour canaux... etc.) et les grands projets (de barrage, de canalisation, de recalibrage des lits... etc.).

A partir de ces éléments, carte et inventaire des zones hydrologiques homogènes (classement par aptitude au ruissellement et localisation des secteurs), carte des zones cruciales et d'aménagements, on effectue l'implantation des stations en prenant en considération quelques autres critères tenant soit aux conditions physiques, soit aux conditions économiques, soit au régime hydrologique, soit aux règles de répartition de stations.

#### a) Critères physiques

##### — Nature du chevelu hydrographique

Les apports d'un affluent important modifient le régime du cours principal; la connaissance de ces modifications implique donc l'implantation de stations aux grandes confluences.

##### — Existence de points singuliers

Présence de perte ou résurgence importante modifiant tout ou partie du régime d'écoulement surtout en étiage, modifications qu'il est souvent important de connaître.

#### b) Critères économiques

Une modification importante de l'écoulement sous l'action de l'homme, telle qu'une prise ou un rejet de tout ou partie des débits d'un cours d'eau vers ou dans

un autre, interdit le choix d'un tel bief pour une station de base, à moins que les règles hydrauliques de gestion soient bien connues et permettent aisément le calcul des débits naturels à partir des débits influencés.

L'intervention croissante de l'homme sur l'écoulement naturel est inéluctable, aussi ce critère négatif ne doit-il être appliqué qu'avec une grande souplesse.

Par ailleurs, les zones cruciales pour l'utilisation des eaux doivent être choisies de préférence pour les implantations de stations afin que la ressource en soit bien connue, bien entendu si une modification du régime d'écoulement ne rend pas la chose illusoire.

#### c) *Critères hydrologiques*

La plupart des caractères quantitatifs du régime hydrologique varient avec la superficie, ou mieux avec le logarithme de la superficie du bassin drainé. Il importe donc de répartir les stations à l'issue de bassins occupant des superficies différentes, en faisant en sorte que le nombre de stations soit à peu près le même pour des gammes de superficie d'amplitude logarithmique constante. Ceci permet un échelonnement régulier des stations en fonction du logarithme des superficies.

La bande de superficie la plus exploitée lors de la planification est sensiblement celle d'un module logarithmique allant de 50 à 500 km<sup>2</sup>.

On peut pour fixer les idées donner un exemple indicatif de découpage de gammes équidistantes en logarithmes:

— soit en deux intervalles par module:

50-150 / 150-500

ces intervalles étendus aux bassins plus grands donnent la gamme de base:

50-150 / 150-500 / 500-1 500 / 1 500-5 000 / etc.

— soit en trois intervalles par module

50-100 / 100-250 / 250-500

#### d) *Critère de répartition des stations et de densité minimale d'un réseau hydro-métrique*

La planification qui a pour but de faire « coller » le nombre de stations à la nature géographique de la région va servir à mieux définir la densité souhaitable du réseau minimal pour la région étudiée. Aussi doit-on se contenter de ne pas trop s'éloigner (2 fois plus ou moins ?) des densités choisies a priori.

Les stations doivent théoriquement être réparties également entre bassins de moins de 1 000 km<sup>2</sup> et de plus de 1 000 km<sup>2</sup>.

Cette répartition est valable au stade d'un grand bassin hydrographique où sont alors prises en compte les stations implantées pour raison économique ou de grande confluence, le long des grands axes fluviaux mais elle ne l'est pas dans le cadre d'une planification régionale, où la densité des stations implantées pour les bassins de moins de 1 000 km<sup>2</sup> ne peut qu'être supérieure à la moitié de la densité minimale régionale.

#### 2.4.2. MODE OPÉRATEUR

Pour effectuer le choix des implantations de stations, on procède par éliminations successives. On superpose le calque des zones hydrologiquement homogènes et celui

des limites des bassins versants étudiés (il s'agit du calque des pentes des bassins unitaires).

Pour la région pilote présentée, cela revient à superposer la carte VI à la carte III. On obtient ainsi un inventaire des bassins inclus entièrement ou presque (80 à 90%) dans les différentes zones répertoriées avec les exceptions suivantes:

— Possibilité d'assimilation d'un bassin portant sur plusieurs zones à une de ces zones si elles ne sont différenciées entre elles que par un critère pondérable, critère de pluviométrie en général: un bassin portant sur les zones  $P_i R_i H_{i+1}$ ,  $P_i R_i H_i$  et  $P_i R_i H_{i-1}$  pourra être assimilé à la zone  $P_i R_i H_i$ ;

— Hypothèse, pour les grands bassins, de variation normale décroissante du critère relief avec la surface.

Il est intéressant d'établir cet inventaire en tenant compte de la superficie des bassins de manière à faciliter le choix suivant l'une des gammes des surfaces drainées. Par exemple en classant les bassins suivant le découpage:

1	2	3	4	5
50-100	100-150	150-250	250-500	< 500

le groupement des classes 1 + 2 et 3 + 4 donne la gamme de base à deux intervalles entre 50 et 500 et celui des classes 1, 2 + 3 et 4 la gamme à trois intervalles.

C'est à ce stade, immédiatement préalable à celui de la sélection des bassins pour le réseau de base, que l'on utilise le dernier facteur du milieu, celui de la couverture végétale.

Ainsi, dans l'exemple du bassin de la Maine, l'évolution qui affecte le paysage bocager nous a-t-il conduits à préconiser l'implantation de deux types de stations, tous autres critères ( $P_i R_i H_i$ ) supposés égaux:

a) des stations représentatives du bocage remembré, c'est-à-dire de la situation finale de l'évolution du paysage;

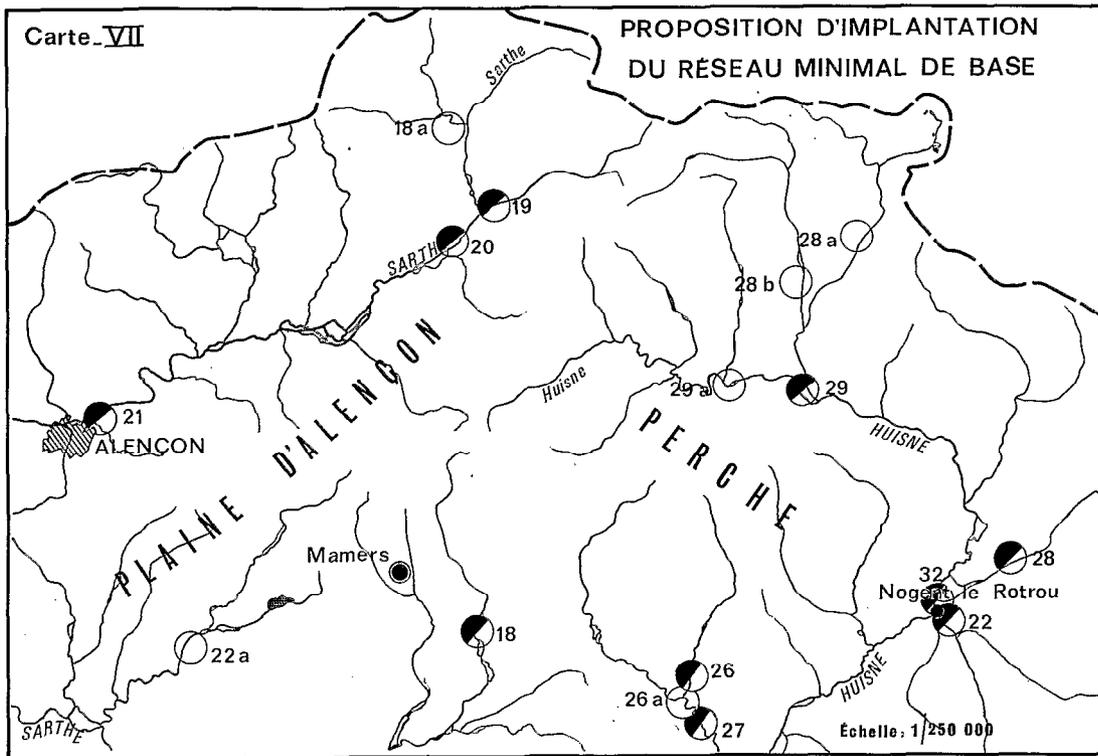
b) des stations représentatives du bocage naturel, donc de l'état initial du paysage avant évolution, en les choisissant pour qu'elles puissent fonctionner le plus longtemps possible.

On procède alors, sur le lot des bassins retenus, à une nouvelle sélection par superposition de la carte des zones cruciales et d'aménagements, sélection qui détermine ou une priorité dans le choix d'un bassin ou son élimination.

On procède enfin au choix définitif. Il est possible que pour certaines stations une alternative soit proposée entre tel ou tel pays, tel ou tel bassin hydrographique, ce qui signifie que plusieurs bassins sont aptes a priori à représenter une certaine zone homogène.

Il est entendu que la carte d'implantation n'a pour but que la définition d'un bief à l'intérieur duquel peut se situer la station choisie. Le choix de la section de mesure est évidemment un problème de gestion et non plus de planification.

La carte VII montre le résultat atteint dans la région pilote présentée. Il faut se rappeler que cette région n'étant qu'une fraction du bassin de la Maine, les stations



## STATIONS REPRÉSENTATIVES DE ZONE HYDROLOGIQUE HOMOGÈNE

● 19 Site recommandé ○ 19a Site de remplacement

qui y sont implantées sont représentatives de zones hydrologiques homogènes présentes par quelques secteurs dans la région pilote et pouvant également apparaître en d'autres secteurs, ailleurs dans le bassin de la Maine. Inversement, certains secteurs représentatifs de zones hydrologiques homogènes dans la région pilote peuvent n'être pas choisis pour implanter une station, un meilleur site étant retenu, hors de cette région pilote.

C'est pourquoi, entre autres, ne trouve-t-on que 10 stations implantées alors que 12 zones avaient été déterminées. Ces stations sont censées représenter:

a) pour la n° 18 la zone imperméable des argiles ( $P_5 R_5 H_3$ ,  $P_5 R_5 H_2$ ) dans le bocage à relief assez fort;

b) pour les n° 19 à 22 la plaine d'Alençon et la côte de Perche à perméabilité hétérogène et relief assez fort ( $P_{3-H} R_5 H_3$ ,  $P_{3-H} R_5 H_2$ ) tantôt en bocage naturel, tantôt en bocage remembré;

c) pour les n° 26 et 27, le bocage naturel à relief plus modéré des mêmes pays ( $P_{3-H} R_4 H_2$ );

d) pour les n° 28, 29 et la n° 32, le Perche sableux plus perméable ( $P_2 R_5 H_2$ ,  $P_2 R_4 H_2$ ) à bocage remembré.

Plusieurs stations de remplacement sont également indiquées sur cette carte.

A cette sélection de stations représentatives de zones hydrologiques homogènes,

qui ne peuvent guère prétendre couvrir une gamme de superficies de bassins dépassant 1 000 km<sup>2</sup>, en vertu des règles de travail suivies, il faut ajouter des stations représentatives des grands cours d'eau pour des bassins supérieurs à 1 000 km<sup>2</sup> environ.

L'implantation de ce second groupe de stations doit tenir compte de la confluence des principaux cours d'eau et affluents, de l'échelonnement des stations le long du cours principal et de la gamme logarithmique des surfaces drainées admise. Ces règles de sélection peuvent paraître trop simples mais nous les estimons comme étant suffisantes et valables jusqu'à des superficies d'au moins 2 000 km<sup>2</sup>. Au-delà, il est bien possible que les critères économiques ne deviennent prépondérants dans le choix, ce qui conduit à n'énoncer aucune règle générale, les problèmes des grands fleuves étant alors, et sous cet angle de vue, spécifiques.

\*  
\* \*

Une planification régionale de réseau hydrométrique minimal de base doit se terminer par une récapitulation des stations recommandées par tranches de superficie afin de vérifier que l'on ne s'est pas trop éloigné de la densité minimale retenue a priori (Dm + 50% ? par exemple) et que la répartition en superficies drainées n'est pas trop hétérogène.

Il est ensuite temps de procéder à la confrontation de ce plan avec l'ensemble de stations déjà existant en vue du maintien, de la fermeture ou de la création de stations, comme on l'a évoqué dans l'exposé des motifs (par. 2.1).

## Bibliographie

- [1] DUBREUIL (P.) – 1968-1969 – Etude de l'extension rationnelle du réseau hydrométrique du Ministère de l'Agriculture. 1. Rapport méthodologique, multigr. 96 p. 2. Rapport de mise en œuvre, multigr. 83 p. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol. et Minist. Agricult., Serv. de l'Hydraulique*, Paris.
- [2] DUBREUIL (P.) – 1968 – Les conceptions nouvelles dans le domaine du limniographe en 1968: dispositifs actuellement utilisables, prototypes et projets. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol.* vol. V, n° 4, pp. 3-24.
- [3] ROCHE (M.) – 1967 – Composition et rationalisation des réseaux hydrométéorologiques. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol.* vol. IV, n° 3, pp. 47-60.
- [4] HERBAUD (J.) – 1969 – Essai sur les problèmes de rationalisation de réseaux, mise en œuvre sur un réseau pluviométrique. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.* vol. VI, n° 4, pp. 3-42.
- [5] W.M.O. – 1965 – Guide to hydrometeorological practices: 1<sup>er</sup> édition, n° 168, T.P. 82, Genève.
- [6] DUBREUIL (P.) – 1969 – Nature et répartition des stations hydrométriques de réseaux en France au début de 1968. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. VI, n° 2, pp. 17-42.
- [7] HERBAUD (J.) – 1970 – Etude des affluents alsaciens du Rhin - 3. Rationalisation de réseaux. Multigr. pp. 45-135 + annexes + 2 cartes h.t. *Cah. ORSTOM serv. Hydrol. et Minist. Agricult., Serv. de l'Hydraulique*, Paris.

- [8] DUBREUIL (P.), GUISCAFRE (J.) – 1970 – Planification du réseau hydrométrique minimal. 1. Règles méthodologiques. 2. Application à une région-type la Lorraine. Multigr. 50 p. + 8 cartes h.t. *Cah. ORSTOM serv. Hydrol. et Minist. Agricult. Serv. de l'Hydraulique*, Paris.
- [9] DUBREUIL (P.), GUISCAFRE (J.) – 1970 – Planification du réseau hydrométrique minimal. 1. Règles méthodologiques. 2. Application à une région-type le bassin de la Maine. Multigr. 47 p. + 8 cartes h.t. *Cah. ORSTOM serv. Hydrol. et Minist. Agricult., Serv. de l'Hydraulique*, Paris.
- [10] DUBREUIL (P.) – 1965 – Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de zones hydrologiques homogènes. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. II, n° 2, pp. 3-20.
- [11] B.R.G.M. – 1970 – Carte de classification hydrogéologique appliquée à la recherche des facteurs du régime de l'écoulement. Bassin de la Maine. 1/250 000<sup>e</sup>. (Inédit). Départ. d'Hydrogéologie, B.R.G.M., Orléans.
- [12] ROCHE (M.) – 1965 – Hydrologie de Surface. *ORSTOM* Gauthier-Villars, Ed. Paris.
- [13] DUBREUIL (P.) – 1966 – Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants, leur détermination avec une précision acceptable. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. III, n° 5.
- [14] Centre de Géographie Appliquée de l'Université de Strasbourg – Bassin de la Seine. Carte de la couverture végétale au 1/750 000<sup>e</sup>. D.A.T.A.R., Paris.
- [15] B.E.P. (D.G.R.S.T.) – 1970 – Recommandations relatives à un programme minimum commun des études menées sur bassins versants d'investigation. Multigr. 37 p. + annexes. D.G.R.S.T. Action Concertée Eau, Paris.
- [16] DUBREUIL (P.), HERBAUD (J.) – 1970 – Contribution à la connaissance quantitative des modifications du régime hydrologique sous l'effet du taux de boisement à l'aide de deux exemples: le bassin alsacien du Rhin et le bassin du Jaguaribe (Brésil). XI<sup>e</sup> Journée de l'Hydraulique. S.H.F., Paris.