

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 66.06.60

ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE RENOUVELABLES

Éléments du bilan de l'eau de la France

par

G. CASTANY, O. DELAROZIÈRE-BOUILLIN et J. MARGAT



Département géologie de l'aménagement
Hydrogéologie

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 66.06.60

*Bureau de Recherches
Géologiques et Minières*

73 SGN 244 AME

BIBLIOTHEQUE

1973

R é s u m é

Dans le cadre d'études générales portant sur l'ensemble de territoires nationaux et d'études régionales plus détaillées, une méthodologie d'évaluation et de cartographie des ressources en eau souterraine renouvelables, a été élaborée et a permis d'établir un programme de calcul automatique.

Les principales étapes de la méthode utilisée sont résumées ci-après et illustrées par des exemples concrets présentant l'estimation de bilans hydrauliques nationaux et régionaux et la réalisation de documents cartographiques relatifs aux différents éléments du bilan de l'eau (valeurs moyennes de l'écoulement total et de l'écoulement souterrain en particulier).

T A B L E

1. INTRODUCTION

2. PRINCIPES GENERAUX

- 2.1. Ressources en eau souterraine et en eau de surface
- 2.2. Ressources renouvelables et ressources temporaires en eau souterraine
- 2.3. Variabilité des ressources renouvelables - Réserves utilisables
- 2.4. Principe d'évaluation des ressources en eau souterraine renouvelables

3. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE RENOUELABLES A ECHELLE NATIONALE

3.1. Bilan global de l'eau en France

- 3.1.1. Subdivision du territoire en bassins versants
- 3.1.2. Période de référence du bilan
- 3.1.3. Exploitation des données climatologiques
- 3.1.4. Bilans par bassins versants
- 3.1.5. Synthèse quantitative des bilans élémentaires
- 3.1.6. Synthèse cartographique : carte de l'écoulement total, moyen, interannuel

3.2. Débit moyen des nappes d'eau souterraine de la France

4. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE RENOUELABLES A ECHELLE REGIONALE

5. CONCLUSION

6. BIBLIOGRAPHIE

1. INTRODUCTION

L'évaluation des ressources en eau potentielles - ressources totales et ressources en eau souterraine - fait généralement l'objet, soit d'estimations très globales, soit, au contraire, d'études détaillées, plus ou moins localisées, rarement étendues à l'échelle d'ensembles régionaux d'où il résulte une connaissance soit trop générale soit trop partielle et hétérogène du bilan de l'eau d'un pays. Pourtant l'évaluation de ces ressources en eau potentielles et la représentation cartographique, à petite échelle, de leur distribution géographique sont des éléments de base indispensables à toute étude effectuée en vue de l'établissement du schéma d'aménagement d'une région.

Plus particulièrement, l'étude des ressources en eau souterraine permanentes, c'est-à-dire renouvelables, qui, provenant essentiellement des nappes libres, peuvent être exploitées sans porter atteinte, à long terme, aux réserves, présente un intérêt majeur.

Ces ressources sont liées directement à l'écoulement souterrain et leur évaluation est donc basée sur la détermination des débits moyens d'écoulement total et d'écoulement souterrain, sur la connaissance de la distribution spatiale de ces débits et sur l'estimation de leurs fréquences.

On présente ci-après brièvement la méthodologie simplifiée qui fut d'abord appliquée au territoire français, puis à quelques régions ou territoires étrangers et qui a permis en particulier la réalisation de :

- la carte du débit moyen des nappes d'eau souterraine de la France - échelle 1/1 000 000 - Maître d'oeuvre : Secrétariat permanent pour l'étude des problèmes de l'eau (Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale),
- la carte du débit moyen des nappes d'eau souterraine de Franche-Comté (France) - échelle 1/200 000 - Maître d'oeuvre : Service hydraulique (Division des aménagements ruraux) du Ministère de l'agriculture,
- la carte des ressources renouvelables en eaux souterraines du Vénézuéla - échelle 1/2 000 000 - Maître d'oeuvre : Comision del plan nacional de aprovechamiento de los recursos hidráulicos.

2. PRINCIPES GENERAUX

2.1. Ressources en eau souterraine et en eau de surface

Les ressources en eau souterraine doivent être conçues comme comprises dans les ressources en eau totales : cela signifie que leur définition ne doit pas être indépendante de celle des ressources en eau de surface, mais non pas que les unes et les autres doivent être additionnables sans "double emploi". Le souci d'éviter le risque de compter deux fois les mêmes ressources - d'où procéderait l'idée qu'elles devraient être additives - ne se justifierait que si l'on ne considérait que la première utilisation de l'eau, c'est-à-dire si les ressources étaient entièrement consommées par le premier usage qui en est fait. En réalité les diverses utilisations de l'eau ne la consomment que partiellement et donnent lieu à des restitutions, après une dégradation plus ou moins prononcée de la qualité de l'eau. Une même quantité d'eau peut ainsi servir plusieurs fois.

On ne peut donc faire de l'additivité des ressources en eau souterraine, entre elles ou avec les ressources en eau de surface, un critère de définition et de classification. Une fraction souvent importante des débits d'eau souterraine prélevés est en effet restituée principalement aux cours d'eau, accessoirement aux réservoirs aquifères eux-mêmes, mais plus ou moins en aval ou parfois dans un autre bassin. Une partie non négligeable des ressources en eau souterraine peut être réutilisée comme ressource en eau de surface. La condition d'additivité des unes et des autres dépend en définitive essentiellement de l'étendue du domaine servant de cadre à l'évaluation des ressources : l'additivité est d'autant plus partielle que le domaine (bassin) est plus étendu. A l'échelle d'un bassin assez grand, on peut considérer que seule la fraction rigoureusement consommée des quantités d'eau prélevées dans les réservoirs aquifères est soustraite aux ressources en eau globales.

2.2. Ressources renouvelables et ressources temporaires en eau souterraine

Il convient d'opérer une distinction entre des ressources entretenues donc renouvelables devant conserver un caractère permanent (aux variations interannuelles près), et des ressources non renouvelables à durée limitée dans le temps (à terme proche ou lointain). En simplifiant, les premières proviennent surtout du captage d'eau des nappes libres, et

les secondes surtout de l'exploitation des réserves des nappes captives, mais sans correspondance rigoureuse.

Par définition les ressources renouvelables en eau souterraine doivent pouvoir être exploitées en équilibre sans porter atteinte à long terme aux réserves, c'est-à-dire sans "surexploitation". En conséquence l'effet des captages doit être compensé - à terme pluriannuel - soit par des réductions équivalentes de débit aux émergences naturelles de la nappe exploitée, soit par des réalimentations provoquées (induites ou artificielles), soit par une combinaison des deux cas, donc en définitive par une redistribution des débits au détriment des eaux de surface du domaine considéré (ou parfois au détriment de "pertes" par évaporation ou par écoulement vers des domaines où l'eau devient inutilisable : mer, rivière polluée).

Partant du principe que les débits globaux naturels des nappes souterraines équivalent aux débits que les cours d'eau en reçoivent, c'est-à-dire par définition l'écoulement souterrain, on considérera donc comme ressource renouvelable en eau souterraine la fraction de ces débits d'écoulement souterrain qu'il est plus commode et plus économique - compte tenu de la distribution dans l'espace et des variations dans le temps des besoins en eau - ou encore qu'il est préférable compte tenu de la qualité demandée, de capter directement dans les réservoirs aquifères, plutôt que de les dériver des cours d'eau drainant les nappes considérées.

Par contre des ressources temporaires peuvent provenir de l'exploitation de réserves - sans reconstitution possible à l'échelle historique - lorsqu'elle n'a pas d'effet sensible sur les écoulements de surface; il ne s'agit plus alors de captage mais d'extraction d'eau analogue à l'exploitation minière : c'est-à-dire qu'elle ne peut avoir lieu qu'une fois. Aussi vaut-il mieux parler de réserves exploitables.

On entendra donc par exploitation définitive des réserves, celle qui n'est pas compensée au terme choisi pour l'évaluation des ressources renouvelables, en général l'ordre de la décennie. Cette exploitation de réserve ne peut fournir qu'un supplément de ressource temporaire. Comme tout gisement minier, cette réserve d'eau souterraine doit s'exprimer en volume et non en débit, puisque ce dernier est fonction de la durée d'exploitation choisie. De plus on doit également ne prendre en compte que la fraction économiquement exploitable, les critères pouvant toutefois varier avec le temps, et selon le type de besoin à satisfaire.

2.3. Variabilité des ressources renouvelables - Réserves utilisables

Les ressources renouvelables (telles qu'on les a définies ci-dessus 2.2.) en eau souterraine étant dépendantes de l'écoulement en général, et de l'écoulement souterrain en particulier, sont comme ces derniers affectées d'une variabilité de caractère aléatoire. Leur évaluation ne peut donc être basée seulement sur la détermination de débits moyens (mensuels, annuels et pluriannuels). Elle doit indiquer en outre la fréquence des différents débits (probabilité de dépassement, ou, à l'inverse, risque de défaillance).

Cependant les réserves en eau souterraine assurent jusqu'à un certain point une régularisation naturelle des débits des nappes à leurs émergences, amortissant les irrégularités de leur alimentation. Aussi les débits d'écoulement souterrain sont-ils plus réguliers que les débits d'écoulement total (on sait que les premiers constituent généralement la seule composante continue des seconds). Les réserves peuvent assurer de la même manière une régularisation des débits prélevés et permettre une indépendance relative du régime d'exploitation par rapport au régime d'alimentation naturelle des nappes.

On peut donc envisager d'adopter une définition conventionnelle de différents degrés de régularisation possible de la fraction de l'écoulement souterrain considérée comme ressource, en confrontant le volume d'eau que l'on projette de prélever annuellement à une fraction utilisable en pratique de la réserve de la nappe, c'est-à-dire en évaluant un "renouvellement" relatif.

Mais cette "réserve utilisable" ne doit pas être confondue avec la ressource : elle permet seulement d'apprécier la possibilité naturelle de régularisation de la ressource c'est-à-dire d'adapter plus ou moins étroitement l'exploitation aux variations de la demande, notamment selon les saisons.

2.4. Principe d'évaluation des ressources en eau souterraine renouvelables

On entendra, dans tout ce qui suit, par écoulement souterrain (ressources en eau souterraine renouvelables) tout le débit apporté aux cours d'eau par les différents émissaires ou émergences des réservoirs aquifères, et rien que ce débit, sans tenir compte de la vitesse du transfert d'eau dans ces réservoirs.

Il ressort des définitions proposées ci-dessus que les données de base sur lesquelles se fondent les estimations des ressources en eau souterraine renouvelables sont les débits d'écoulement souterrain dont l'évaluation nécessite préalablement celle des débits d'écoulement total.

En effet, l'écoulement souterrain moyen d'un bassin peut être extrait de l'écoulement total moyen en considérant différents domaines supposés homogènes (à l'échelle de travail utilisée) dans lesquels on admet :

- soit que l'écoulement souterrain moyen est une fraction fixe définie de l'écoulement total
- soit que l'écoulement souterrain moyen est assimilable à un écoulement défini conventionnellement (étiage moyen par exemple)
- soit que l'écoulement souterrain moyen est négligeable.

Dans le premier cas, le choix de la proportion de l'écoulement assimilée à l'écoulement souterrain se base sur les données disponibles acquises dans différents petits bassins assez homogènes, utilisés comme "étalons".

L'application de cette méthode, par bassin versant, comporte donc essentiellement deux étapes :

- détermination de l'écoulement total moyen interannuel
- détermination de l'écoulement souterrain moyen interannuel.

Un programme de calcul automatique, établi au B.R.G.M., permet d'évaluer, par bassin, les écoulements total et souterrain et de préciser leur distribution spatiale.

3. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE RENOUVELABLES A ECHELLE NATIONALE

A l'échelle d'un pays entier, c'est-à-dire en considérant un territoire de l'ordre de la centaine de milliers de km², l'évaluation et la cartographie des ressources en eau souterraine renouvelables nécessitent la décomposition du territoire en un certain nombre de bassins indépendants les uns des autres, jaugés ou non ; ce dernier cas impliquant la nécessité d'extrapolations. Un choix de stations (stations de jaugeage et stations climatologiques) doit donc être fait avec un souci de représentativité et d'homogénéité des données.

Un bilan global de l'eau en France a été établi, permettant d'obtenir une carte de l'écoulement total à partir de laquelle l'évaluation et la cartographie des ressources en eau souterraine renouvelables ont pu être faites. L'ensemble du travail réalisé est, à titre d'exemple, résumé ci-après.

3.1. Bilan global de l'eau en France

3.1.1. Subdivision du territoire en bassins versants

Le territoire français, pour l'établissement de son bilan de l'eau, a été subdivisé en 114 bassins (voir figure 1) ou groupes de bassins définis chacun par une ou plusieurs stations de jaugeage, auxquels s'ajoutent 37 bassins ou groupements de bassins non jaugés (bassins inférieurs des grands fleuves, bassins côtiers ou frontaliers).

Le choix des bassins a été guidé par le souci de diviser le territoire en domaines le plus homogènes possible aussi bien dans l'espace (homogénéité des surfaces, surface optimale : 3 000 km² ; homogénéité climatique et lithologique) que dans le temps (homogénéité de la durée des observations aux différentes stations de jaugeage).

Trois types de bassins ont été distingués :

- des sous-bassins (hauts bassins, bassins affluents de grands cours d'eau ou bassins côtiers),

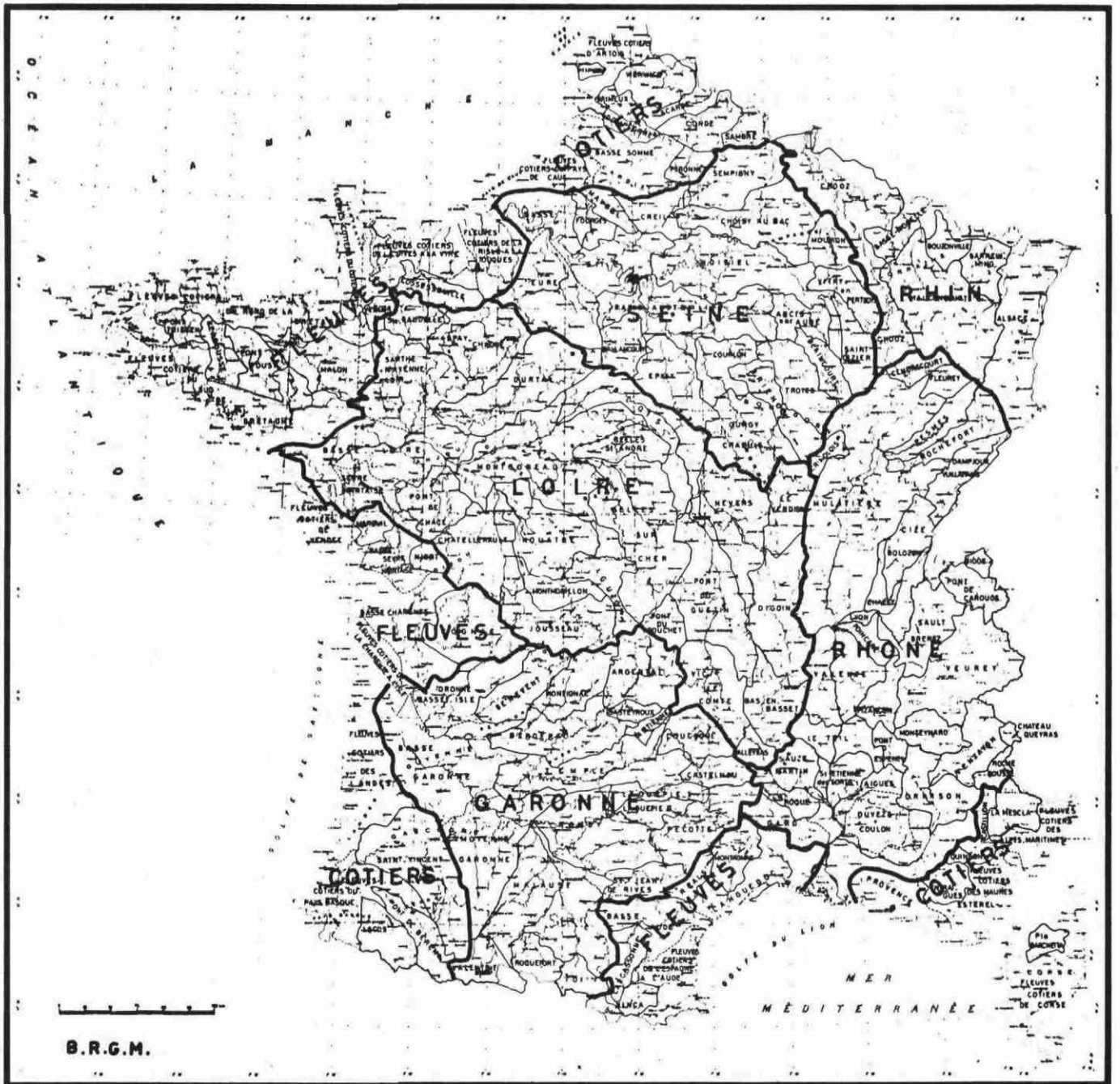


Fig 1 - SUBDIVISION DU TERRITOIRE FRANÇAIS EN BASSINS VERSANTS

- des bassins partiels (bassins versants d'un segment de cours d'eau compris entre une station de jaugeage amont et une station de jaugeage aval) où les évaluations de débit sont effectuées par différence,
- des bassins composés (ensembles de bassins versants adjacents) où les évaluations de débit sont faites par addition.

La superficie totale du territoire jaugeé utilisé est égale environ aux 2/3 de la France.

3.1.2. Période de référence du bilan

Après comparaison avec des périodes de référence plus longues et examen de l'ensemble des données hydrologiques disponibles, la période décennale 1958-1967 a été retenue comme période de référence pour l'établissement du bilan de la France. Pour les stations de jaugeage qui ont été exploitées pendant une partie seulement de cette période de référence, les modules d'écoulement total naturels interannuels ont été partiellement extrapolés (méthode des coefficients d'hydraulicité).

3.1.3. Exploitation des données climatologiques

Une carte des précipitations moyennes annuelles (en courbes isohyètes) a été établie, pour l'ensemble de la France, à l'échelle du 1/1 000 000, concernant la période 1958-1967 (voir réduction figure 2).

Cette carte a été dressée à partir des relevés de 310 postes climatologiques : 93 postes répartis sur l'ensemble du territoire et 217 postes situés en régions de montagne.

A partir de cette carte d'isohyètes, le calcul des volumes d'eau précipités moyens interannuels (1958-1967) a été effectué, par planimétrie, pour chaque bassin versant étudié.

3.1.4. Bilans par bassins versants

La comparaison des volumes d'eau précipités et des volumes d'eau écoulés à l'exutoire a permis d'établir, pour chaque bassin versant, un bilan élémentaire.

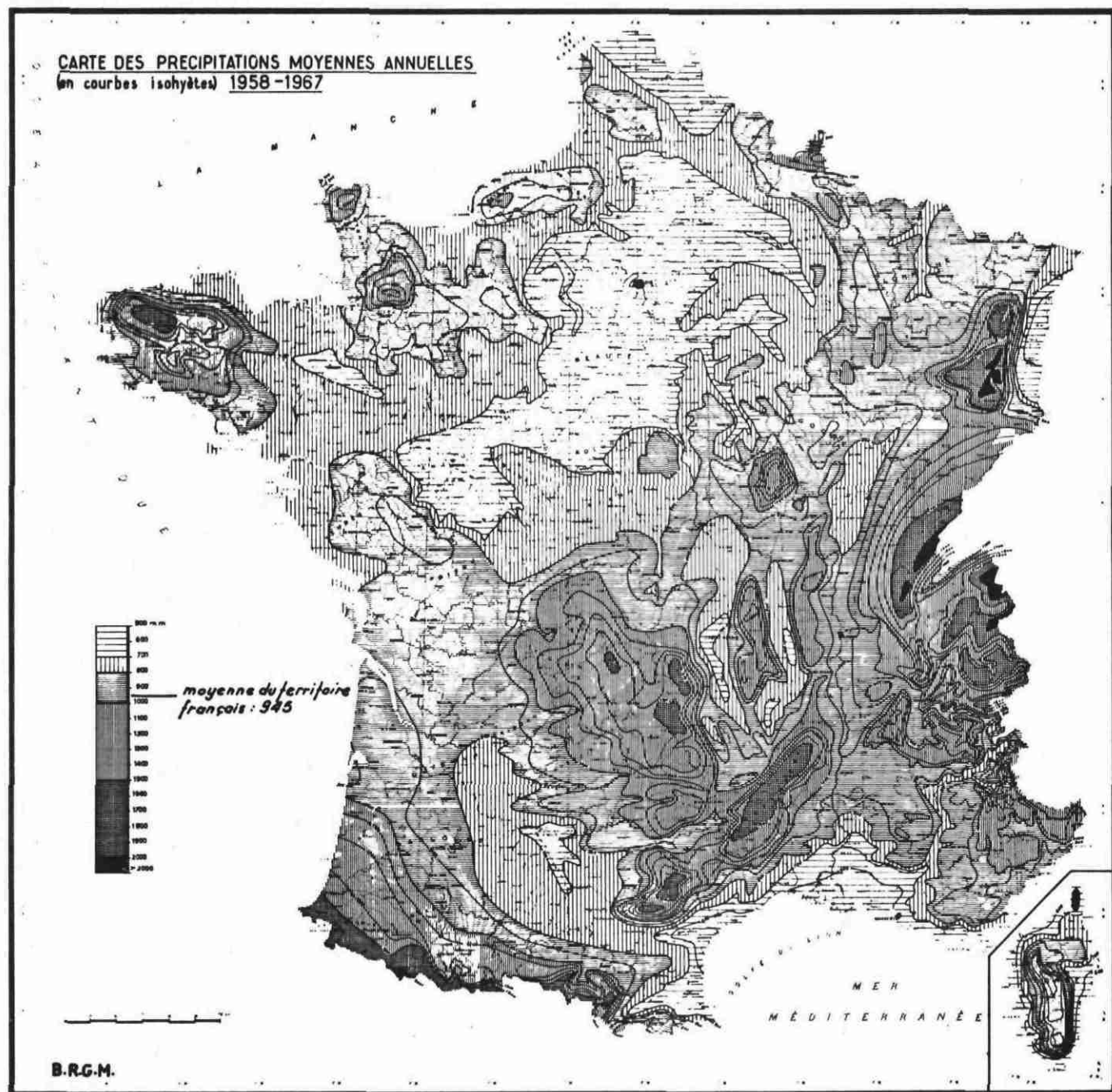


Fig. 2

Ces bilans comportent une certaine marge d'erreur due essentiellement aux imprécisions des mesures de débits et de l'évaluation des volumes d'eau précipités. Cette marge d'erreur est généralement faible dans les régions de plaine mais peut devenir assez importante en montagne bien que le réseau pluviométrique utilisé y soit plus dense.

3.1.5. Synthèse quantitative des bilans élémentaires

La figure 3 présente, par bassins fluviaux et groupes de bassins côtiers, la somme des bilans établis pour les différents bassins versants.

Pour le total des bassins versants jaugés soit 359 923 km² on obtient le bilan suivant :

Unités	Précipitations = écoulement + déficit d'écoulement		
10 ⁹ m ³ /an	340	147	193
mm	945	408	537
l/s.km ²	29,9	12,9	17,0

Ce bilan peut être considéré comme représentatif du territoire français à la totalité duquel son extrapolation* donne le bilan suivant (valeurs arrondies) :

Unités	Précipitations = écoulement + déficit d'écoulement		
10 ⁹ m ³ /an	520	225	295
mm	945	408	537
l/s.km ²	30	13	17

* Cette extrapolation qui a été effectuée à partir de bassins situés sur la totalité du territoire français pourrait conduire à une surestimation de l'écoulement car elle prend en compte des bilans de zones montagneuses alors que les zones extrapolées sont essentiellement des plaines et des régions côtières. C'est pourquoi, à titre de comparaison, une extrapolation a été faite à partir des bilans de fleuves côtiers. Le bilan général obtenu est légèrement inférieur au précédent mais les écarts, de l'ordre de 5 % ne semblent pas significatifs, compte tenu de la précision d'un tel bilan.

FIGURE 3

SYNTHESE DES BILANS MOYENS INTERANNUELS 1958-1967

Bassins	Superficiés km ²	module interannuel Q			précipitations moyennes interannuelles P			déficit d'écoulement moyen interannuel		
		Q 10 ⁶ m ³ /an	Q mm	Q l/s. km ²	P 10 ⁶ m ³ /an	P mm	P l/s. km ²	D 10 ⁶ m ³ /an	D mm	D l/s. km ²
<u>Bassins jaugés :</u>										
bassin de l'Adour	12 861	8 335	648	20,5	15 404	1 198	38,0	7 069	550	17,4
bassin de la Dordogne	17 150	10 205	595	18,9	19 943	1 163	36,9	9 738	568	18,0
bassins des fleuves côtiers Manche - Mer du Nord	11 736	3 335	284	9,0	9 108	776	24,6	5 773	492	15,6
bassins des fleuves côtiers Atlantique	15 949	5 691	357	11,3	13 532	848	26,9	7 841	491	15,6
bassins des fleuves côtiers Méditerranée	10 373	5 458	526	16,7	10 319	995	31,6	4 861	469	14,9
bassin de la Garonne	42 120	19 523	464	14,7	43 242	1 027	32,6	23 719	563	17,9
bassin de la Loire	98 926	25 381	257	8,1	82 695	836	26,5	57 314	579	18,4
bassins du Rhin et de la Meuse	22 439	9 362	417	13,2	21 509	959	30,4	12 147	542	17,2
bassin du Rhône	75 659	47 210	624	19,8	83 665	1 106	35,1	36 455	482	15,3
bassin de la Seine	52 710	12 266	233	7,4	40 806	774	24,5	28 540	541	17,1
<u>Total des bassins jaugés.....</u>	359 923	146 766	408	12,9	340 223	945	29,9	193 457	537	17,0
<u>extrapolation à la totalité</u>										
<u>du territoire français.....</u>	551 500	225 000	408	13	520 000	945	30	295 000	537	17

3.1.6. Synthèse cartographique : carte de l'écoulement total, moyen, interannuel (1958-1967)

Les bilans établis par bassins versants ont été utilisés pour dessiner une carte zonale de l'écoulement total moyen interannuel (1958-1967) exprimé en courbes isomodules.

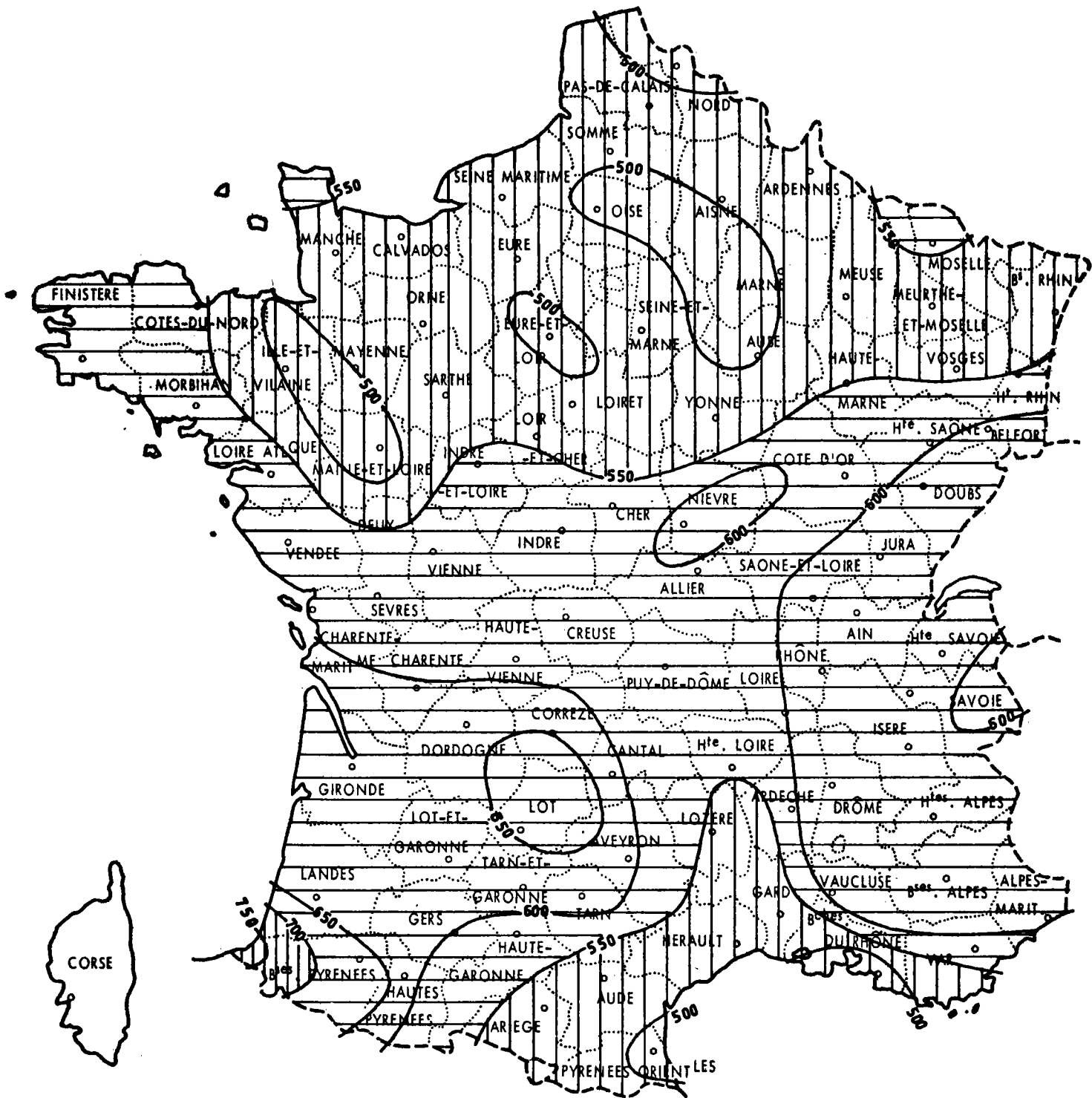
En première approximation, il a été admis que le déficit d'écoulement moyen est uniforme à l'intérieur de chaque bassin versant. Cette approximation, qui peut être discutée en région montagneuse, n'apporte pas d'erreur notable dans la majeure partie du territoire français où, ainsi que le montre la figure 4 (carte de l'évapotranspiration réelle - moyenne annuelle 1958-1967 - calculée par la formule mensuelle de TURC) l'évapotranspiration est généralement assez homogène. La zonalité de l'écoulement total est alors directement liée à celle des précipitations. Pour chaque bassin versant, une hauteur fixe de lame d'eau, égale au déficit d'écoulement calculé par le bilan, a été soustraite des données de la carte pluviométrique. On a ainsi obtenu, par bassin versant, une carte de la répartition de l'écoulement total, dont l'intégration permet de retrouver la valeur de l'écoulement total moyen interannuel (1958-1967) mesurée à l'exutoire du bassin.

Une carte d'ensemble intéressant la totalité du territoire français a été construite par extrapolation et lissage des cartes de l'écoulement des différents bassins.

Ce lissage a été effectué au 1/1 000 000 ; une réduction de la carte obtenue est présentée à la figure 5.

3.2. Débit moyen des nappes d'eau souterraine de la France

L'écoulement total évalué et cartographié selon les méthodes exposées ci-dessus a été fractionné en écoulement souterrain et écoulement de surface. Le principal facteur conditionnel de ce fractionnement est la lithologie, laquelle permet d'établir successivement une classification hydrogéologique, puis une carte spécifique du territoire français. On a considéré six classes différentes, pour chacune desquelles l'écoulement souterrain moyen peut être défini par une fraction de l'écoulement total moyen. En première approximation, il a été admis que pour une classe



de 400 à 550 de 550 à 700 de 700 à 850

CARTE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE - MOYENNE ANNUELLE 1958-1967 -
CALCULEE PAR LA FORMULE MENSUELLE DE TURC

Fig. 4-

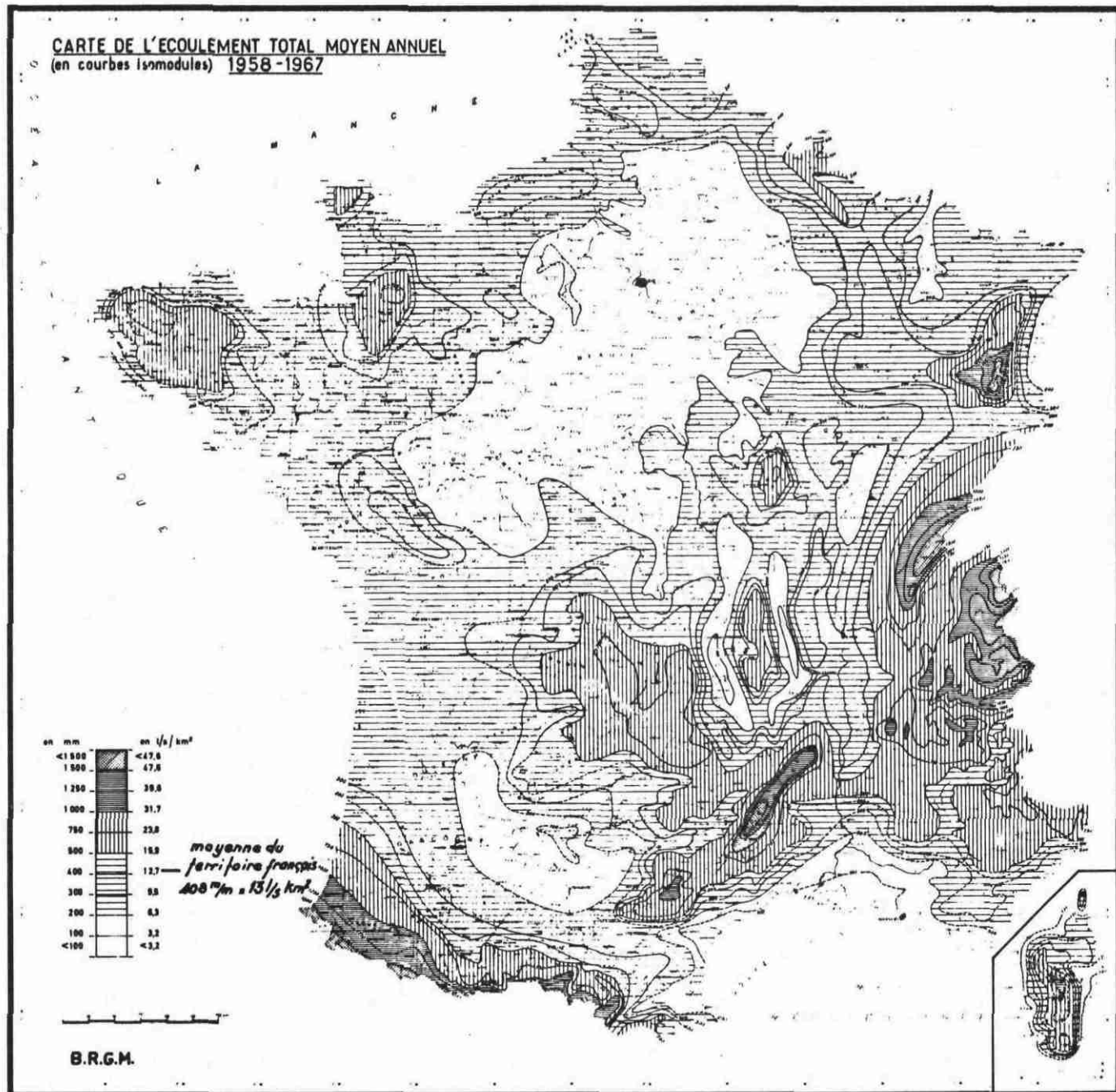


Fig. 5.

hydrogéologique déterminée, l'index, base du fractionnement de l'écoulement total en écoulement souterrain et de surface, est constant, quelle que soit la hauteur des précipitations. On sait toutefois que cette convention simplificatrice doit conduire à surestimer l'écoulement souterrain dans les domaines à fortes précipitations car la relation entre les hauteurs de pluie et les lames d'eau infiltrée n'est pas linéaire.

Une carte du débit moyen (1958-1967) des nappes d'eau souterraine de la France a été obtenue par combinaison de la carte de l'écoulement total moyen interannuel et de la carte de classification hydrogéologique du territoire [5].

Cette carte permet d'estimer, par bassin versant, par aquifère, ou par région la valeur moyenne de l'alimentation naturelle des nappes d'eau souterraine. Celle-ci est, presque généralement dans les domaines de plaines, voisine de 5 l/s.km² pour des formations calcaires, crayeuses ou sableuses. Les valeurs les plus élevées sont atteintes dans les régions montagneuses (pluviométrie importante) calcaires (grande perméabilité) : 30 à 40 l/s.km² dans le haut Jura, et les massifs calcaires des Pyrénées ou des Alpes.

4. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE RENEUVABLES A ECHELLE REGIONALE

A l'échelle d'une région, c'est-à-dire en considérant un territoire de l'ordre du millier de km², composé d'un ou de plusieurs bassins versants jaugés, l'évaluation des ressources en eau souterraine renouvelables est réalisable par voie automatique.

Un exemple concret des différentes étapes du travail est présenté pour une région française ; la Franche-Comté, qui a été traitée à l'échelle du 1/200 000, sur une période de 5 ans (1964-1968).

Cette région se décompose principalement en trois bassins versants (voir figure 6) :

- le bassin versant de l'Ain (superficie jaugée : 3 630 km²)
 - le bassin versant du Doubs (superficie jaugée : 6 350 km²)
 - le bassin versant de la Haute-Saône (superficie jaugée : 5 782 km²)
- qui ont été traités individuellement.

Les données de base utilisées pour chaque bassin sont les suivantes :

- surface du bassin
- débit moyen interannuel (QT), de la période de référence (p) mesuré à l'exutoire du bassin versant
- carte en isohyètes des précipitations moyennes interannuelles (P), de la période (p), sur l'ensemble du bassin (1), (voir figure 7)
- carte de zonalité de l'évapotranspiration réelle moyenne interannuelle (ETR), de la période (p), sur l'ensemble du bassin versant (2), (voir figure 8)

(1) Pour la région Franche-Comté, 72 stations pluviométriques soit l'ensemble du réseau d'observation exploité pendant la période d'étude, ont été utilisées.

(2) En théorie n'importe quelle méthode de calcul d'un indice d'évapotranspiration réelle à partir des données climatologiques mesurées ponctuellement peut être utilisée. En général, les valeurs de l'évapotranspiration réelle moyenne interannuelle les mieux significatives sont obtenues par calcul sur "pas de temps" mensuel, soit à partir de la hauteur des précipitations et de la température par la méthode de THORNTHWAITE, soit à partir de la hauteur des précipitations, de la température et de l'insolation par la méthode de TURC mensuelle. Dans ces cas, les calculs doivent être faits mensuellement pour chacune des années réelles successives de la période choisie et la moyenne interannuelle ne doit être effectuée qu'à partir des valeurs annuelles de l'évapotranspiration réelle obtenues. Ces calculs peuvent être faits automatiquement grâce à un programme de calcul établi au B.R.G.M. Pour la région Franche-Comté, on a utilisé la méthode de TURC mensuelle.

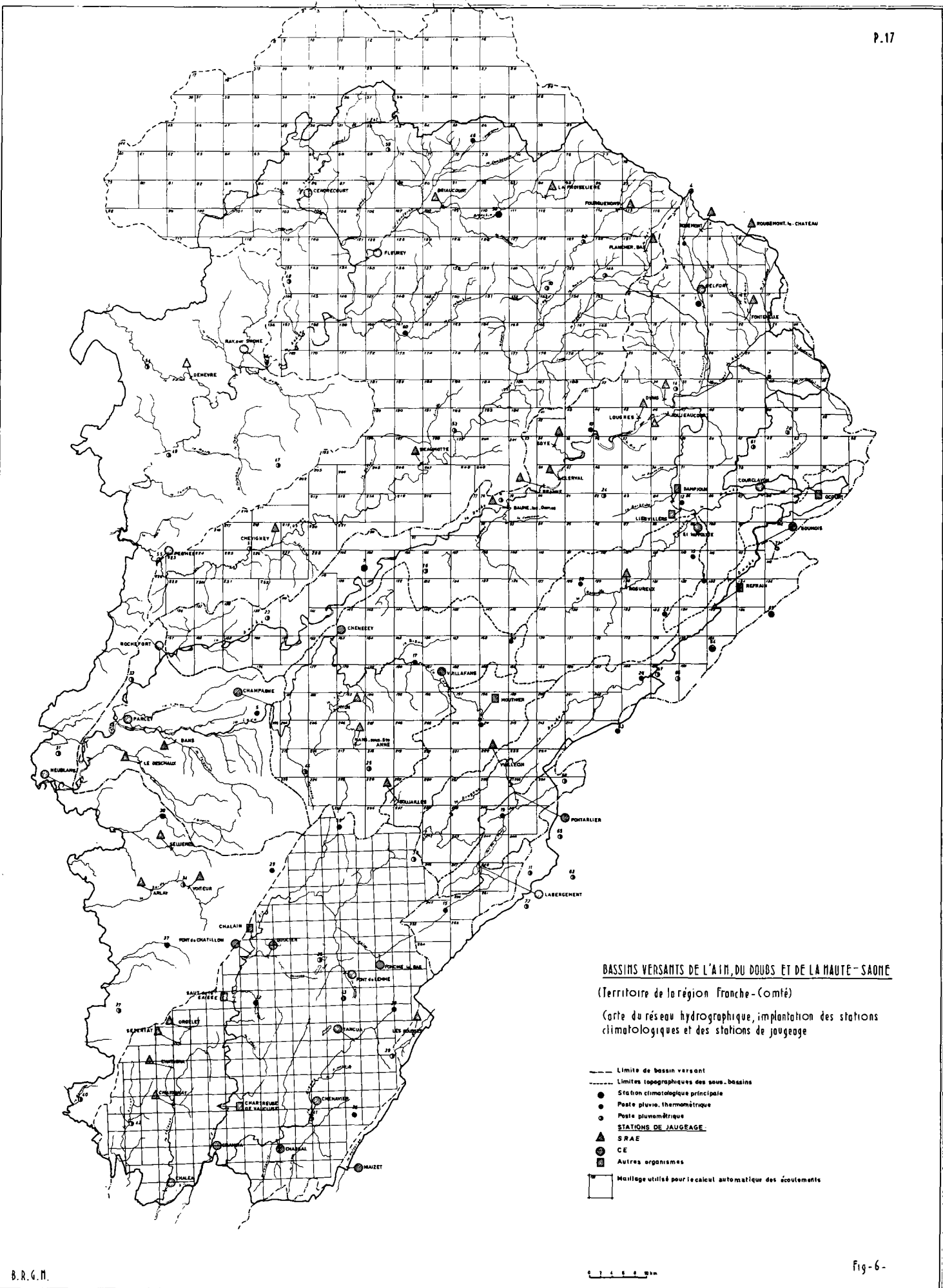
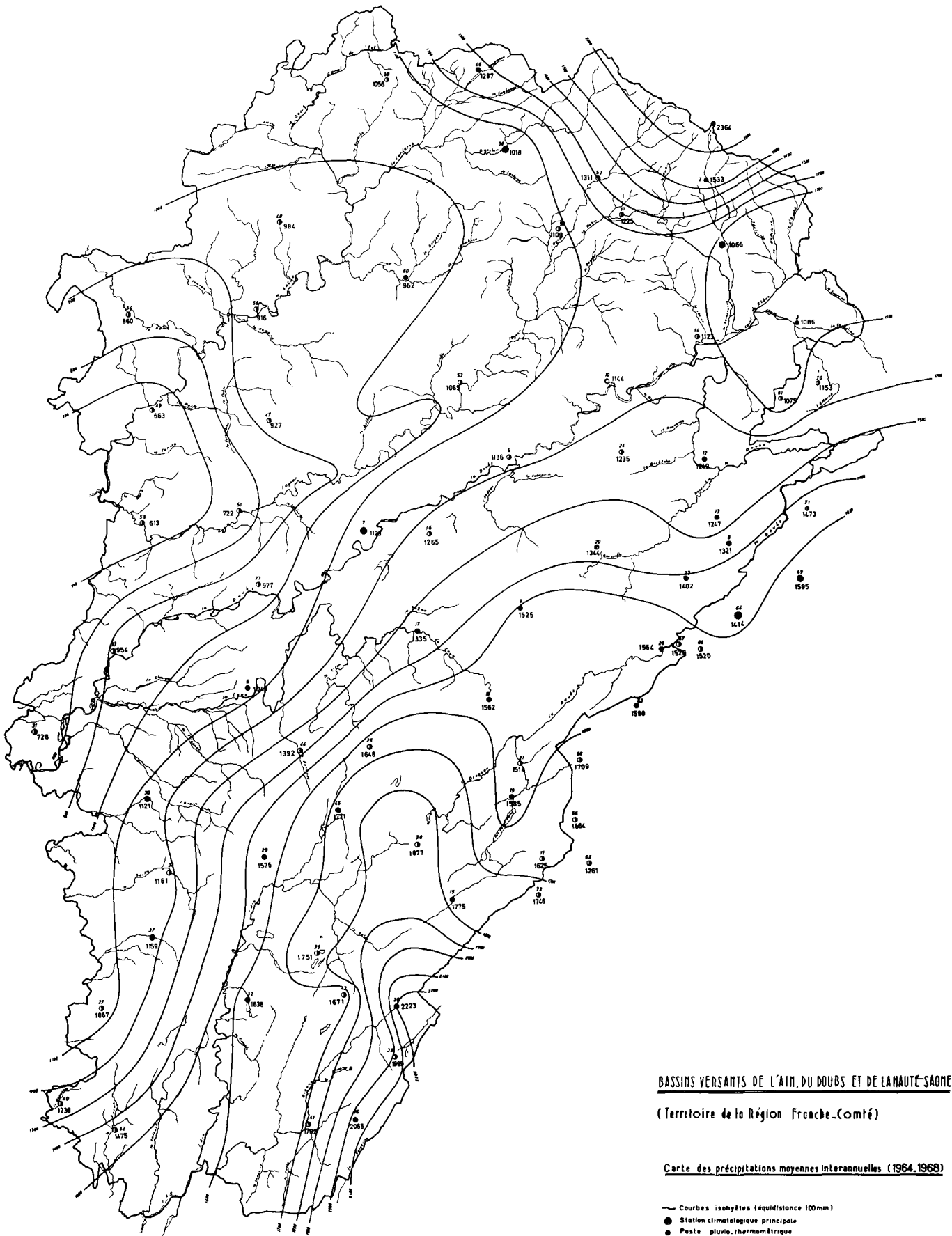


Fig-6-



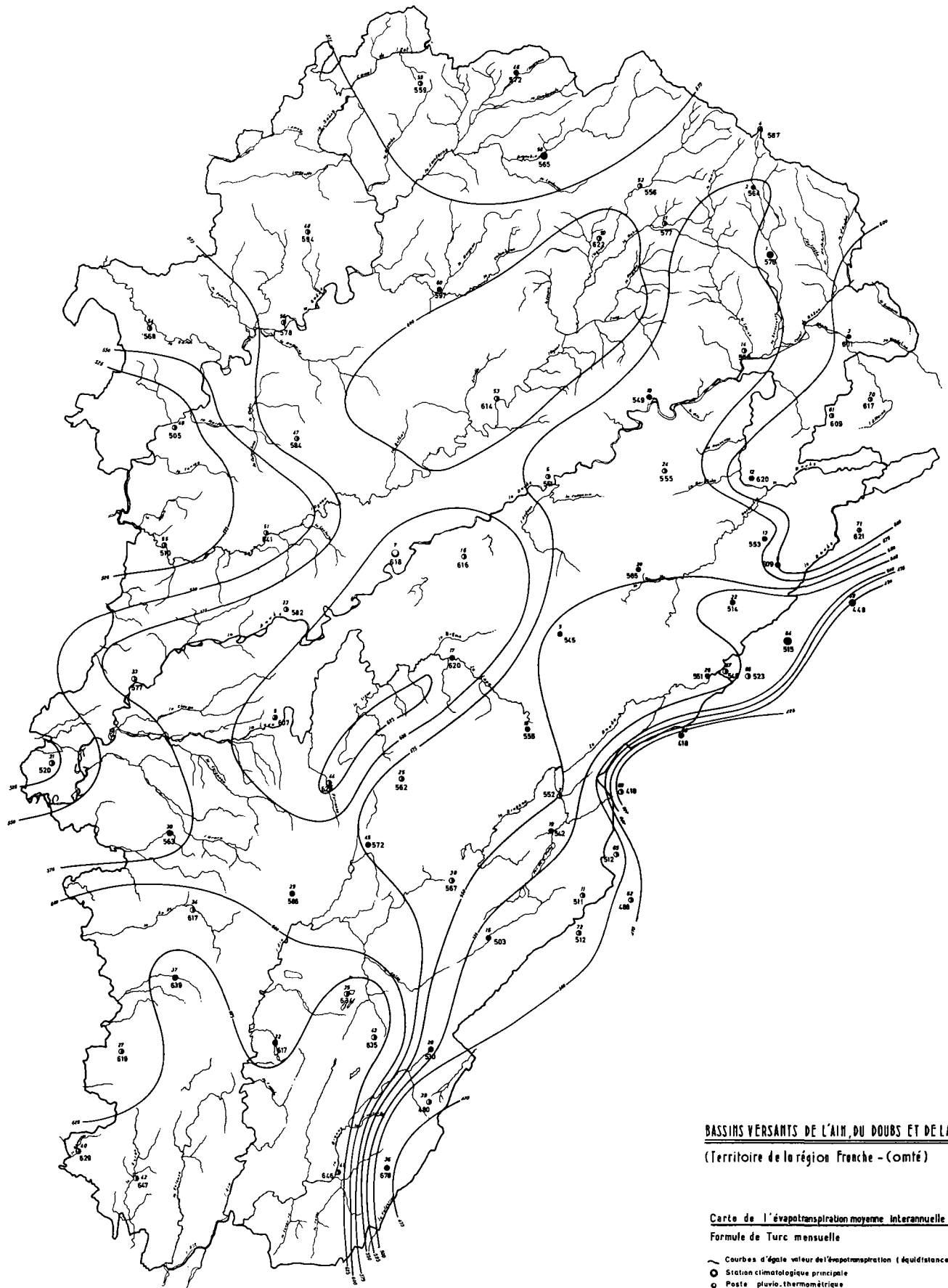
BASSINS VERSANTS DE L'AIN, DU DOUBS ET DE LA HAUTE-SAÔNE

(Territoire de la Région Franche-Comté)

Carte des précipitations moyennes interannuelles (1964-1968)

- Courbes isohyètes (écart 100mm)
- Station climatologique principale
- Poste pluviométrique
- Poste pluviométrique



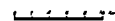


BASSINS VERSANTS DE L'AIN, DU DOUBS ET DE LA HAUTE-SAÔNE
 (Territoire de la région Franche - Comté)

Carte de l'évapotranspiration moyenne Interannuelle (1964-1968)

Formule de Turc mensuelle

- Courbes d'égale valeur d'évapotranspiration (écart de 25mm)
- Station climatologique principale
- Poste pluvio-thermométrique
- Poste pluviométrique



- carte de classification hydrogéologique du bassin appliquée à la détermination de l'écoulement souterrain moyen et donnant les rapports ES : écoulement souterrain/écoulement total, établis à partir de critères lithologiques et détalonnages sur des analyses d'hydrogrammes de bassins représentatifs assez homogènes (voir figure 9).

Ces données de base étant acquises, on opère une discrétisation arbitraire du bassin en mailles régulières, d'égale superficie - 25 km² pour les bassins du Doubs et de la Haute-Saône, 9 km² pour le bassin de l'Ain - la taille des mailles choisie étant fonction de la densité des observations disponibles et de leur variabilité spatiale (voir figure 6).

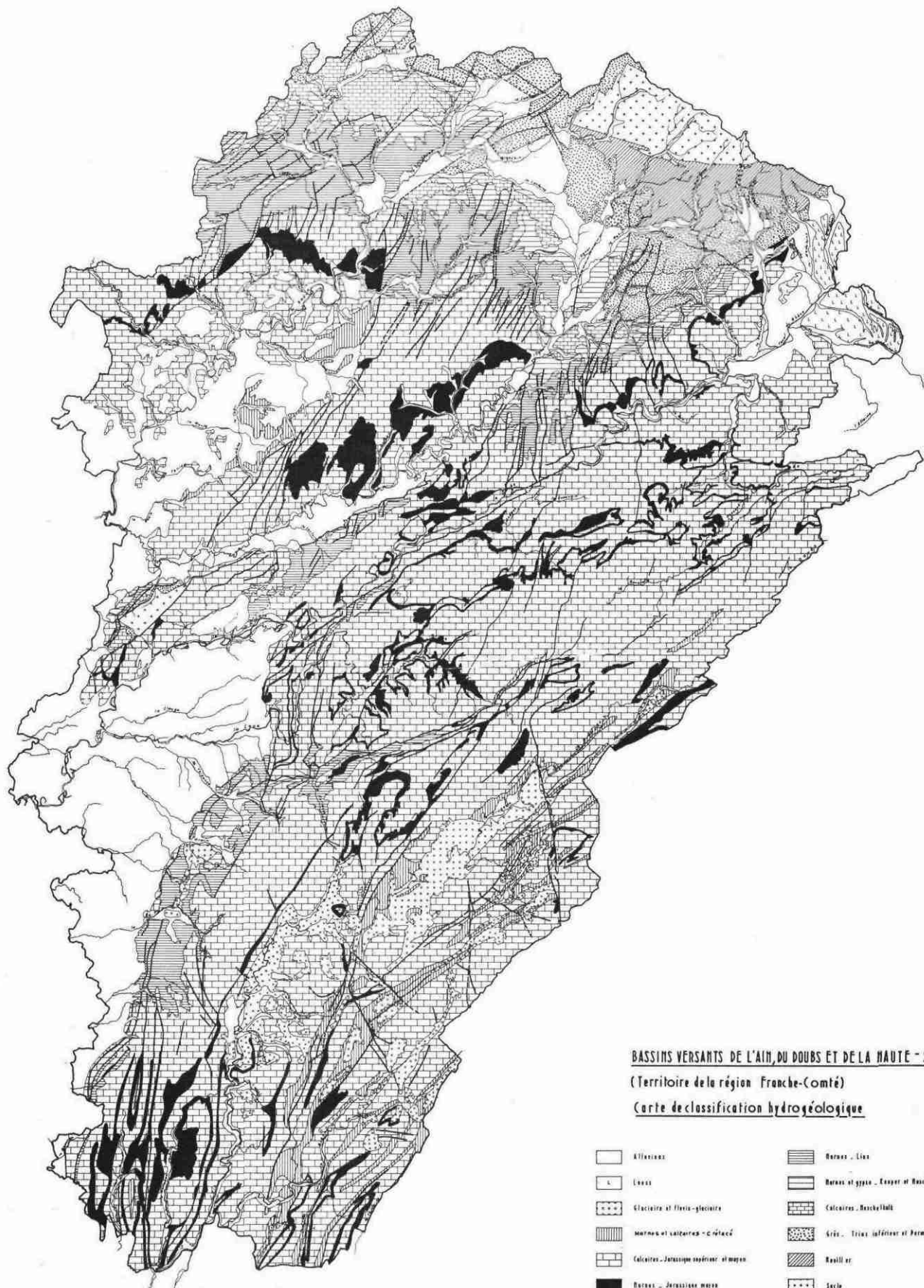
Le calcul de l'écoulement total, par maille, est alors réalisable par voie automatique, selon les étapes suivantes :

- 1°) Calcul de la lame d'eau précipitée moyenne interannuelle (en mm) PT sur l'ensemble du bassin versant par moyenne des lames d'eau précipitées sur chaque maille.
- 2°) Calcul du déficit d'écoulement moyen interannuel (en mm) ETT sur l'ensemble du bassin versant par moyenne des déficits d'écoulement relatifs à chaque maille.
- 3°) Comparaison de la différence PT - QT (précipitations moyennes interannuelles - débit moyen interannuel mesuré à l'exutoire) avec ETT (déficit d'écoulement total moyen interannuel calculé) et calcul d'un coefficient de correction C :














$$C = (PT - QT) / ETT$$
 puis calage des "bilans" unitaires de chaque maille sur le débit d'écoulement total du bassin par application du coefficient de correction C à ETR de chaque maille (1).
- 4°) Calcul de l'écoulement total unitaire maille par maille (en mm) par différence entre la lame d'eau précipitée et la hauteur d'évapotranspiration réelle corrigée.

(1) Ce facteur de correction, qui peut être interprété comme un correctif régional et moyen annuel à la formule utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, est de :

- 0,96 pour les bassins de la Haute-Saône et de l'Ognon
- 0,93 pour les bassins du Doubs et de la Loue
- 0,83 pour le bassin de l'Ain



BASSINS VERSANTS DE L'AIN, DU DOUBS ET DE LA HAUTE - SAONE
 (Territoire de la région Franche-Comté)
 Carte de classification hydrogéologique

- | | |
|---|--|
|  Alluvions |  Bauxite - Lias |
|  Lias |  Bauxite et gypse - Eocène et Basalbois |
|  Glaciaire et fluvi-glaciaire |  Calcaires - Basalbois |
|  Marnes et calcaires - Crétacé |  Grès - Trias (sulfureux et Permien) |
|  Calcaires - Jurassique supérieur et moyen |  Neolithique |
|  Bauxite - Jurassique moyen |  Sable |
| |  Faille |

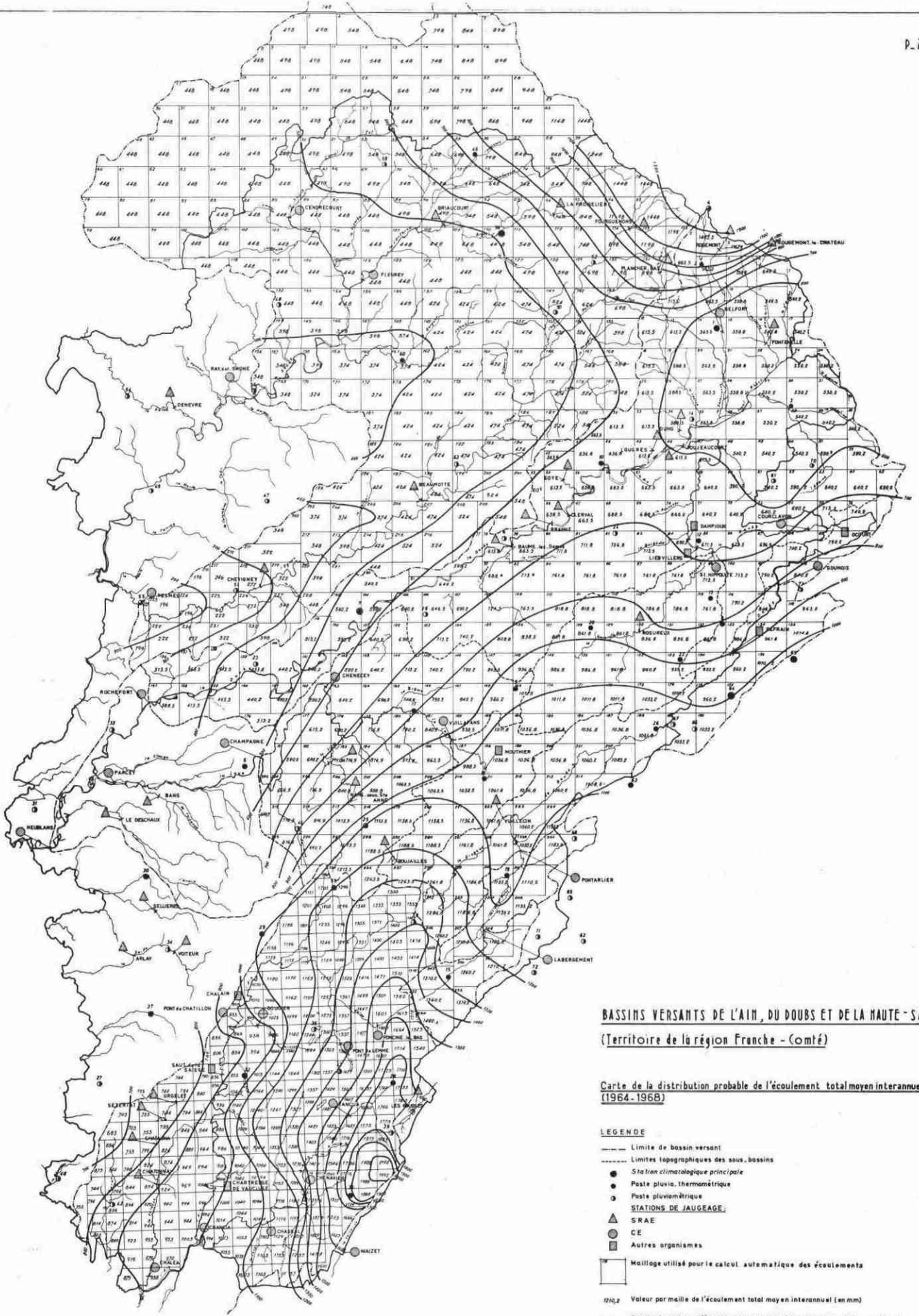
La carte de l'écoulement total obtenue pour la région Franche-Comté est présentée à la figure 10. Les valeurs de l'écoulement souterrain par maille sont ensuite automatiquement obtenues par application des coefficients de partage ES aux valeurs de l'écoulement total puis le calcul de l'écoulement souterrain total du bassin versant est effectué par sommation des écoulements souterrains de chaque maille.

La carte de l'écoulement souterrain (1) ainsi réalisée pour la région Franche-Comté est présentée à la figure 11. Les valeurs de l'écoulement souterrain sont exprimées en mm et varient (par classes de 100 mm) de 0 pour les régions imperméables à plus de 1 500 mm pour les régions calcaires du haut Jura.

Outre les valeurs par maille de l'écoulement total et souterrain, les éléments du bilan hydrologique global de chaque bassin sont obtenus automatiquement. Ainsi, à titre d'exemple le bilan du bassin du Doubs (6 350 km²) est le suivant :

Unités	Précipitations =	Ecoulement total			+ Déficit d'écoulement
		écoulement souterrain	+ écoulement superficiel	= écoulement total	
10 ⁶ m ³ /an	8 484	4 220	866	5 086	3 398
mm	1 336	665	136	801	535
l/s.km ²	42,4	21,1	4,3	25,4	17,0

(1) Il est important de souligner que le débit souterrain calculé pour chaque maille a la signification de l'alimentation spécifique moyenne probable des nappes souterraines dans la maille, par infiltration des précipitations, indépendamment de tout apport pouvant provenir d'une autre maille (transfert souterrain, ou infiltration d'eau de surface importée).

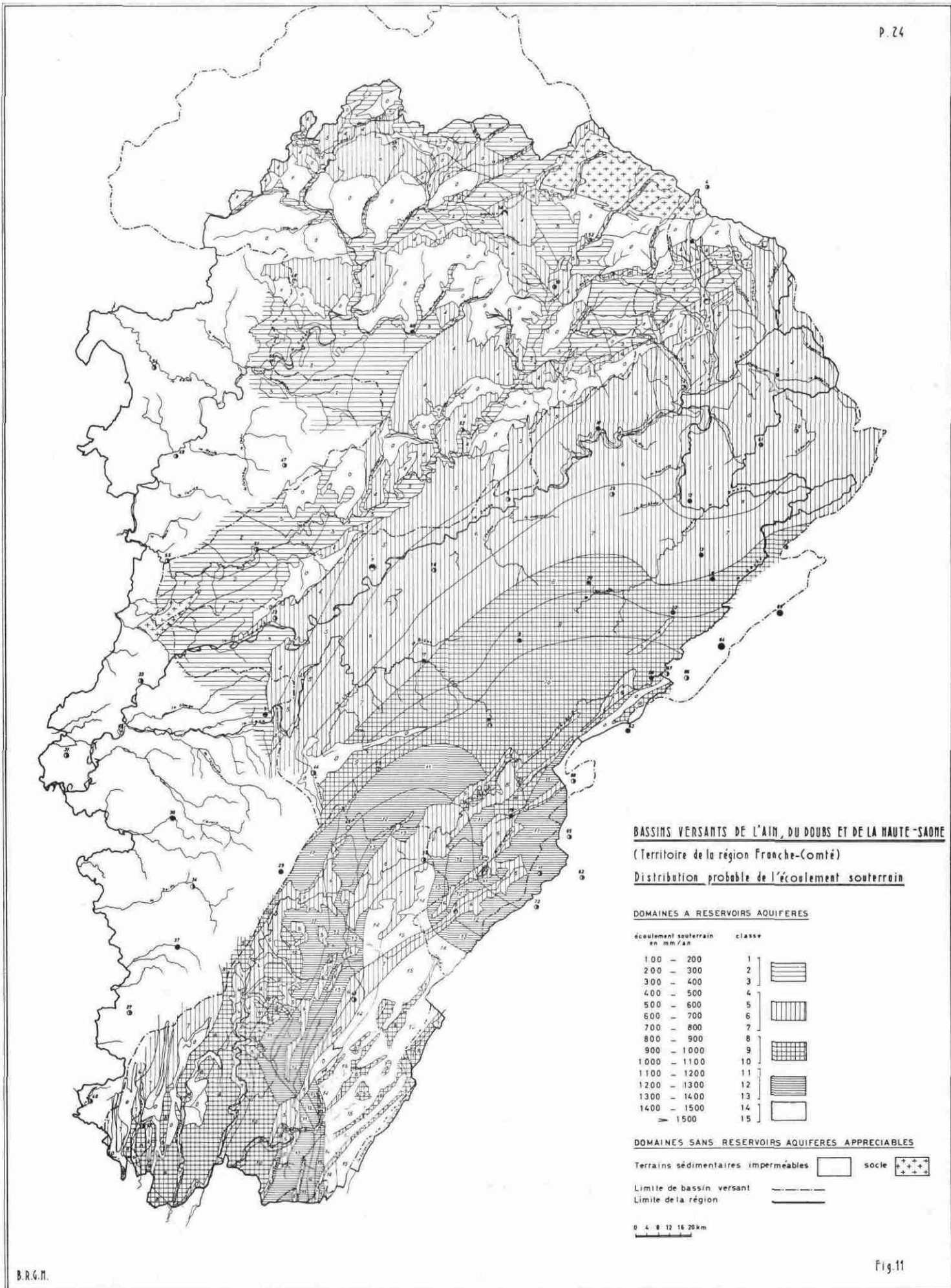


**BASSINS VERSANTS DE L'AIN, DU DOUBS ET DE LA HAUTE-SAÔNE
(Territoire de la région Franche - Comté)**

Carte de la distribution probable de l'écoulement total moyen interannuel
(1964-1968)

LEGENDE

- Limite de bassin versant
- Limites topographiques des sous-bassins
- Station climatique principale
- Poste pluvio-thermométrique
- Poste pluviométrique
- STATIONS DE JAUGAGE:**
- ▲ SRAE
- CE
- Autres organismes
- Maillage utilisé pour le calcul automatique des écoulements
- 120,2 Valeur par maille de l'écoulement total moyen interannuel (en mm)
- Courbe isovalleur d'écoulement total moyen interannuel (équidistance 100mm)



BASSINS VERSANTS DE L'AIN, DU DOUBS ET DE LA HAUTE-SAONE
(Territoire de la région Franche-Comté)

Distribution probable de l'écoulement souterrain

DOMAINES A RESERVOIRS AQUIFERES

écoulement souterrain en mm/an	classe	
1 00 - 200	1	[diagonal lines]
2 00 - 300	2	
3 00 - 400	3	
4 00 - 500	4	
5 00 - 600	5	[vertical lines]
6 00 - 700	6	
7 00 - 800	7	[horizontal lines]
8 00 - 900	8	
9 00 - 10 00	9	[cross-hatch]
10 00 - 11 00	10	[diagonal lines]
11 00 - 12 00	11	[diagonal lines]
12 00 - 13 00	12	[diagonal lines]
13 00 - 14 00	13	[diagonal lines]
14 00 - 15 00	14	[diagonal lines]
> 1500	15	[white]

DOMAINES SANS RESERVOIRS AQUIFERES APPRECIABLES

Terrains sédimentaires imperméables [white box] socle [cross-hatch box]

Limite de bassin versant [dashed line]
Limite de la région [solid line]

0 4 8 12 16 20 km

5. CONCLUSION

Les cartes présentées : cartes de l'écoulement total et cartes du débit moyen des nappes d'eau souterraine, en fonction des échelles auxquelles ont été réalisées (nationale, régionale) permettent d'obtenir une représentation générale, plus ou moins précise, de la répartition géographique des éléments du bilan de l'eau.

Elles ne sont cependant pas destinées à fournir des informations ponctuelles : les modules spécifiques d'écoulement indiqués, sous forme de classes volontairement assez larges, n'ont qu'une valeur de moyenne statistique, se rapprochant d'autant plus de la réalité que l'on considérera un domaine plus grand.

A partir de la carte de l'écoulement souterrain, une évaluation globale du débit des principales nappes souterraines du territoire étudié est en principe possible.

Ce débit ne doit pas être assimilé aux ressources en eau souterraine : celles-ci sont limitées en pratique par les possibilités techniques et économiques d'exploitation, liées aux capacités productrices des ouvrages, et par les effets locaux ou régionaux des captages sur les débits des cours d'eau (puisque'un débit minimal doit être conservé dans ces derniers). Dans certains cas, au contraire, les débits exploitables sont supérieurs aux débits d'alimentation naturelle lorsque les captages provoquent un surcroît d'alimentation par appel non préjudiciable aux rivières.

6. BIBLIOGRAPHIE (Ordre chronologique)

- [1] - DELAROZIERE-BOUILLIN O., MARGAT J. (1969)
Etude sommaire de la distribution des ressources en eau souterraine de la France. Rapport n° 1. Esquisse d'une méthode simplifiée pour évaluer et cartographier la distribution de l'écoulement souterrain et des réserves.
Rapport intérieur B.R.G.M., Fr.
- [2] - CASTANY G. (1970)
Méthode d'évaluation rapide des ressources en eau d'une région.
Rapport intérieur B.R.G.M., Fr.
- [3] - CASTANY G., MARGAT J., ALBINET M., DELAROZIERE-BOUILLIN O. (1970)
Evaluation rapide des ressources en eau d'une région.
Conv. int. Acque Sotterane, Palermo 1970, pp. 1-22, 20 fig.
- [4] - DELAROZIERE-BOUILLIN O. (1970)
Etude sommaire de la distribution des ressources en eau souterraine de la France. Rapport n° 2. Notice explicative de la carte du débit moyen des nappes d'eau souterraine de la France.
Rapport intérieur B.R.G.M., Fr.
- [5] - CASTANY G., DELAROZIERE-BOUILLIN O., MARGAT J. (1970)
Carte du débit moyen des nappes d'eau souterraine de la France - échelle 1/1 000 000.
B.R.G.M., Fr.
- [6] - DELAROZIERE-BOUILLIN O., LABORDE J.P., MARGAT J. (1971)
Calcul automatique de la distribution spatiale des modules d'écoulement total et d'écoulement souterrain dans un bassin versant - Programme FLØC.
Rapport intérieur B.R.G.M., Fr.
- [7] - COLLIN J.J., DELAROZIERE-BOUILLIN O. (1972)
Examen du réseau hydrométrique du Service régional de l'aménagement des eaux de Franche-Comté en fonction des critères hydrogéologiques de planification.
Rapport intérieur B.R.G.M., Fr.