Contribution à la recherche méthodologique d'établissement des bilans hydrologiques et hydrogéologiques régionaux et sub-régionaux

Yves Bajard

▶ **To cite this version:**

Yves Bajard. Contribution à la recherche méthodologique d'établissement des bilans hydrologiques et hydrogéologiques régionaux et sub-régionaux. Géologie appliquée. Universite Scientifique et Médicale de Grenoble, 1971. Français. NNT : . tel-00762383

HAL Id: tel-00762383
https://theses.hal.science/tel-00762383

Submitted on 7 Dec 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

205142
1971
106/1 double

Doctorat d'Etat
N° d'ordre

THESE

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de DOCTEUR ES-SCIENCES NATURELLES

par Yves BAJARD, Ingénieur Hydraulicien des Ecoles Nationales
Supérieures d'Ingénieurs de Grenoble

CONTRIBUTION A LA RECHERCHE METHODOLOGIQUE D'ETABLISSEMENT DES BILANS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES REGIONAUX ET SUB-REGIONAUX

Soutenue le 29 Juin 1971, devant la Commission d'examen:

Président: R.BARBIER, Professeur

Examinateurs: R.MICHEL, Professeur
G.VACHAUD, Chargé de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique

T.71 /916

TOME 1 : TEXTE

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

205142
1971
106/1

A Korshavn, petit port paisible du Nord de la Fionie, où j'ai pu commencer à rédiger dans le soleil nordique d'un mois d'août tranquille, au bord du Kattegat.

Avant d'aborder mon exposé, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé et conseillé dans mes recherches, is dans la mise au point de la méthode qui découlait de l'expérience effectuée en Thessalie.

Mes remerciements s'adressent en particulier :

Monsieur le Professeur R. BARBIER qui a dirigé mes recherches depuis l'origine ;

Monsieur le Professeur A. FALCONNIER, dont les encouragements m'ont été précieux durant l'exécution des levés géologiques et des reconnaissances ;

Monsieur le Professeur R. MICHEL qui a bien voulu s'intéresser à mes recherches et les commenter ;

Monsieur G. VACHAUD, Chargé de recherche au C.N.R.S., dont les conseils relatifs aux écoulements dans la ranche superficielle non saturée, située sous la surface du sol m'ont été très précieux ;

Monsieur le Professeur P. GIRAUD qui m'a patiemment guidé et conseillé tout au long de la préparation et de la édaction.

Je tiens à remercier aussi :

e Service des Etudes de Travaux Hydrauliques du Ministère des Travaux Publics du Royaume de Grèce ;

e Service des Améliorations Foncières du Ministère de l'Agriculture du Royaume de Grèce ;

'Electricité de Grèce ;

e Service Météorologique National du Royaume de Grèce ;

e Service des Recherches Forestières du Ministère de l'Agriculture du Royaume de Grèce ;

Institut de Géologie et de Subsurface d'Athènes, qui m'a donné libre accès aux études et aux résultats de mesures elatives à la Thessalie qui relevaient de leur autorité ;

Société ELECTRO-WATT, Ingénieurs-Conseils de Zurich, qui m'a permis d'utiliser les résultats des études de base des reconnaissances ayant abouti à l'étude préliminaire et de feasibilité de l'aménagement des plaines de Thessalie, our le compte du Ministère des Travaux Publics du Royaume de Grèce ;

Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques, Ingénieurs-Conseils, de Grenoble, qui m'a laissé libre ccès à sa documentation.

Mes remerciements vont aussi à mon ami, S. BLIMAN, Maître de Conférences à l'Université Scientifique et licale et à l'Institut National Polytechnique de Grenoble pour l'intérêt qu'il a pris à ma recherche et ses conseils le domaine de l'informatique.

Je voudrais aussi remercier tous ceux qui m'ont assisté pendant la préparation et l'élaboration de cette thèse, et articulier :

Messieurs AIRAULT, DEPOS, GAVARD, GOFAS, JÄCKLI, KALERGIS, KARITSINOS, KATSARAKIS, MANOS, MOUROUTIS, PATERAS, POTAGAS, THOMOS, WERENFELS, qui tous à un moment ou à un ont assisté et encouragé mes recherches à des titres divers.

Je mentionnerai aussi spécialement Madame TELMAT qui a eu la patience de déchiffrer mon manuscrit et de le e présentable.

Enfin, je remercie de tout cœur mon ami Bernard BOISSIER pour sa collaboration au travail géologique lors de de réelle en Thessalie, et surtout pour l'aide qu'il m'a gentiment apportée en relisant les épreuves de cette thèse.

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

INTRODUCTION

Le sujet de cette étude est une contribution à la recherche d'une méthode globale pour la détermination du bilan hydrologique et hydrogéologique d'une région ou d'une fraction de région en vue de son aménagement agricole, agro-industriel et humain. L'expression "méthode globale" implique que tous les facteurs agissant sur le bilan et dont l'action ne serait pas négligeable doivent être considérés. Cette étude, en principe très générale et multidisciplinaire est présentée en géologie et hydrogéologie pour des raisons qui apparaîtront clairement au cours de l'exposé.

DEFINITION DU BILAN

Le bilan hydrologique et hydrogéologique d'une aire définie et délimitée est par définition la somme algébrique pendant une période déterminée des quantités d'eau :

- qui entrent dans l'aire,
  - par précipitations,
  - par ruissellement,
  - par écoulements souterrains,
- qui y sont utilisées par l'homme,
  - pour l'irrigation,
  - pour l'industrie,
  - pour la consommation humaine et animale,
- qui sortent de cette aire,
  - par évaporation et évapotranspiration,
  - par rejet au réseau hydrographique,
  - par écoulements souterrains,
- qui représentent les échanges internes et la variation des réserves au cours de cette période.

Cette définition laisse déjà prévoir la nature et la multiplicité des facteurs qui agiront sur ce bilan :

- certains traduiront l'action des phénomènes naturels, d'ordre morphologique, hydrographique, géologique, hydrogéologique, agronomique, climatologique et hydrologique ;
- d'autres traduiront les conséquences de l'aménagement humain, et feront intervenir divers types d'ingénierie, qui s'appuieront d'ailleurs sur les phénomènes naturels et, dans une certaine mesure, les modifieront.

Cette définition montre aussi l'importance de la délimitation de l'aire d'application et de la période pour laquelle il faut établir le bilan.

Les facteurs agissants peuvent donc être très nombreux et le calcul risque de devenir inextricable si l'on n'en fait pas un choix raisonné. De plus, ces facteurs peuvent ne pas agir indépendamment des autres et nous risquons de nous heurter à des problèmes de comptabilité délicats à résoudre. En particulier, faute d'un choix préliminaire attentif entre les facteurs possibles, nous risquons de faire intervenir deux fois ou plus la même action sous des "étiquettes" différentes. On risque aussi, par simplifications abusives, de négliger une action importante, et donc de fausser tout le calcul. Il est donc nécessaire :

- de faire un examen très attentif des divers facteurs susceptibles d'agir,
- de ne négliger certains d'entre eux qu'après justification,
- et de n'effectuer d'éventuels groupements ou amalgames de facteurs qui pourraient se révéler commodes qu'après avoir soigneusement pesé les conséquences d'une telle opération.

Ceci impose une analyse des phénomènes physiques qui conditionnent le comportement de l'eau dans une aire donnée pendant une période adéquate déterminée.

DECOMPOSITION DE LA REGION - CHOIX D'UNE PERIODE DE BASE

Par conséquent, avant de pouvoir analyser le mécanisme du bilan élémentaire, il nous faut décomposer la région en éléments commodes pour l'exécution du calcul du bilan, et définir la période de base de ce calcul.

Se posent donc des problèmes préalables d'organisation de la région et du temps. Faute de trouver à ces problèmes des solutions commodes, l'étude du bilan hydrologique et hydrogéologique deviendra impossible.

SCHEMATISATION DE L'ETUDE REGIONALE

Mais ces problèmes préalables sont eux-mêmes pratiquement insolubles si l'on ne systématise pas l'étude d'aménagement régional. Cette dernière fait appel à des recherches et des applications techniques relevant de sciences et de disciplines très diverses. En fait, on peut distinguer deux groupes de disciplines intervenant dans une étude régionale :

- le groupe des disciplines physiques : géographie physique, géologie, hydrogéologie, agronomie, climatologie, hydrologie ;
- le groupe des disciplines humaines : géographie humaine, biologie, économie, sociologie, génie civil, rural et industriel, etc.

Ces deux groupes sont indépendants car toute action humaine a des conséquences sur le milieu naturel. Mais on peut maintenir cette distinction dans la conception d'une étude régionale destinée à définir un aménagement optimal, et dans laquelle on peut distinguer :

a - l'étude de l'organisation physique de la région, dont le squelette est la répartition des utilisations de l'eau disponible dans les différentes parties de la région.

b - l'étude agro-socio-économique des conséquences de cette répartition de l'eau dans la région, qui doit permettre de choisir l'aménagement optimal recherché.

Le bilan régional hydrologique et hydrogéologique se place alors dans la première partie de l'étude d'aménagement régional ainsi schématisé. On doit pouvoir alors, en principe, suivre à rebours le raisonnement précédent : ayant placé le bilan hydrologique et hydrogéologique dans le schéma d'une étude régionale on organise la région et choisit une période, puis on examine le mécanisme du bilan élémentaire et le mode de combinaison des bilans élémentaires permettant d'aboutir au bilan régional.

Mais ceci n'est pas si simple. En effet, l'étude agro-socio-économique doit déterminer l'aménagement optimal de la région économiquement et humainement parlant. Elle doit donc être basée sur une image physique de la région. Cette image physique n'est pas unique. Certains de ses aspects sont invariables, comme par exemple le relief (sauf modifications mineures négligeables à l'échelle d'une étude régionale), la géologie, la pédologie. D'autres sont variables paramétriquement, en fonction de choix techniques. Le principal élément variable de cette image physique de la région est l'organisation de l'eau. Selon que l'on construit tel barrage réservoir ou non, que l'on irrigue telle zone ou non, la répartition de l'eau sur la région sera différente. Car la décision de construire un barrage ou non, d'irriguer ou non aura des conséquences sur l'amont et sur l'aval du barrage ou de la zone considérée. Ces conséquences seront limitatives : si l'on veut être certain de stocker dans un barrage réservoir un volume d'eau déterminé, ou de disposer sur une aire donnée d'une quantité d'eau déterminée à un moment bien précis, il faut imposer des restrictions à la consommation d'eau à l'amont. Ceci est possible dans certaines limites. Et une eau consommée à l'amont ne se retrouve pas à l'aval.

Dans une étude régionale, on devra donc considérer plusieurs organisations de l'eau et rechercher pour chacune de ces organisations de l'eau, l'exploitation la plus intéressante humainement et économiquement.

A chacune de ces organisations de l'eau correspond un bilan hydrologique et hydrogéologique. Il sera donc nécessaire, pour une région donnée, de calculer le bilan plusieurs fois, ce qui n'est pas pour simplifier le problème.

PRIORITE DE L'ORGANISATION DE L'EAU

Placer l'organisation de l'eau à la charnière entre étude physique et étude agro-socio-économique est pourtant déjà une simplification relative : en effet, on pourrait aborder le problème sous l'angle agro-socio-économique et définir des types de cultures intéressantes. En second lieu on adopterait des répartitions paramétriques de ces cultures sur la région. On déduirait les organisations possibles de l'eau nécessaire pour chaque répartition paramétrique adoptée. A chaque répartition paramétrique des cultures correspondent plusieurs organisations de l'eau. Or nous verrons que l'organisation de l'eau est déterminée au moyen d'une simulation dynamique régionale, car les bilans régionaux se calculent par cumuls de bilans élémentaires. Cette simulation dynamique est beaucoup plus complexe que l'analyse linéaire de production qui forme le squelette de l'étude agro-socio-économique. Aborder le problème sous l'angle agro-socio-économique amènerait à plusieurs simulations dynamiques régionales pour chaque simulation linéaire agro-socio-économique. D'où une multiplication excessive des calculs de bilan sans que le nombre de calculs agro-socio-économiques soit nécessairement réduit.

Au contraire, si l'on aborde le problème sous l'angle physique, on recherche d'abord quelles sont les organisations de l'eau possibles à la limite dans la région. Puis on envisage un nombre réduit d'organisations de l'eau également réparties dans le domaine des organisations possibles. Et enfin, on recherche pour chacune de ces organisations de l'eau l'optimum agro-socio-économique au moyen de la simulation linéaire.

Cette seconde procédure comportera donc un nombre relativement faible de simulations dynamiques (complexes) et un grand nombre de simulations linéaires (plus simples), alors que la première comportait en tous cas un assez grand nombre de simulations linéaires et un nombre encore plus grand de simulations dynamiques. C'est pourquoi j'ai délibérément choisi d'aborder le problème sous l'angle physique.

NECESSITE D'EMPLOI DE L'ORDINATEUR

Même ainsi, le problème est d'une complexité telle qu'il n'est pas concevable de l'aborder sans avoir recours aux ordinateurs.

L'ordinateur est un outil relativement nouveau, complexe, et qui permet de mener à bien des calculs que l'on n'osait pas entreprendre il y a une dizaine d'années. Non qu'ils aient été impossibles théoriquement. Il y a longtemps que la réduction de problèmes analytiques complexes en équations différentielles puis en équations aux différences finies est passée dans les mœurs. Mais cette méthode achoppait sur un obstacle de taille : la multiplication des coefficients, des inconnues, des paramètres et donc des relations fondamentales de définition d'un problème amenait à des matrices de taille telle qu'il aurait fallu un temps démesuré pour les résoudre. L'ordinateur a permis, grâce à sa rapidité d'action et à sa capacité de combinaisons simultanées, de résoudre ces problèmes en des délais compatibles avec une application pratique pour un coût raisonnable. Grâce à lui, en effet, on peut prendre en compte un très grand nombre de données, les associer de multiples manières et comparer ensuite les conséquences de ces diverses associations ; et ceci dans des temps très courts. Avant l'ordinateur, cette possibilité n'existait pas. On était obligé de procéder à des simplifications quelquefois excessives, de limiter à l'extrême le nombre de variables, afin de pouvoir effectuer l'étude dans des délais compatibles avec sa finalité. Et ces simplifications étaient souvent préjudiciables à la valeur d'une étude complexe.

Mais attention, les ordinateurs n'ont rien amené de par eux-mêmes. Ils ont permis à l'homme de se libérer des charges qu'imposaient les méthodes de calcul anciennes et ont ouvert un nouveau champ d'application à ses pensées. Mais ils ne sont et ne seront jamais que des instruments de calcul, qui classent les données que l'on fournit, les ordonnent, les associent, les malaxent selon des instructions données, et restituent un nouvel arrangement de renseignements déduits des données. Ce nouvel arrangement ne vaut pas plus que les données initiales. Et les conclusions seront fausses si les prémisses le sont, comme dans tout raisonnement logique élémentaire. L'ordinateur ne peut ni inventer, ni décider.

Il m'a paru essentiel de rappeler ceci en introduction de mon étude. Cette conception raisonnable, démystifiée, de l'ordinateur, se répand peu à peu, mais nous sommes loin d'avoir éliminé la conception dangereuse qui s'exprime dans la dénomination de "cerveau électronique". Et ce non seulement pour des gens qui ne sont pas censés comprendre, mais aussi, ce qui est bien plus grave, pour des ingénieurs, des responsables, qui peuvent être amenés, de par leur position, à décider de l'avenir d'une région ; à lancer des programmes d'aménagement basés sur des études préliminaires, des avant-projets et des projets d'exécution où aura été invoqué à tort ou à raison, le dieu-ordinateur.

L'aménagement des territoires est un sujet d'actualité brûlante. L'accroissement des populations, la recherche pour ces populations plus nombreuses d'un niveau de vie plus élevé nous ont amenés à réfléchir de plus en plus intensément aux moyens de substituer à l'exploitation anarchique passée et actuelle une organisation raisonnable et susceptible de durer longtemps. Cette organisation, qui ne doit pas être confondue avec une planification serrée et arbitraire, même dotée de fusibles et de dispositifs de réorientation et d'ajustements, doit s'appliquer à tous les aspects de l'exploitation de la planète, et en particulier à l'aménagement hydro-agricole à l'échelle de la région.

Le cadre général dans lequel se place cette étude est par conséquent la recherche de l'utilisation optimale de l'ordinateur pour arriver à prévoir le meilleur aménagement possible d'une région donnée, au point de vue agricole et agro-industriel. Qui dit utilisation optimale ne dit pas recherche forcenée de la finesse pour l'amour de l'art. Il ne faut jamais perdre de vue l'aspect économique de l'affaire : la recherche doit engager des sommes compatibles avec la rentabilité espérée de l'aménagement. Et dans l'expression "rentabilité", il faut ajouter aux termes financiers habituels, des termes plus difficiles à chiffrer dans l'état actuel de nos connaissances et qui tiennent compte de l'adaptabilité des populations à l'aménagement projeté, de la stabilisation et des perspectives d'avenir que l'aménagement projeté peut amener pour les populations qu'il concerne.

Le problème est très vaste. Si l'on considère une région possédant ses caractéristiques géologiques, morphologiques, climatologiques et humaines, dans son cadre national et international, il y a fort peu de chances pour

que les hasards de l'Histoire aient amené cette région à un état d'exploitation actuel qui corresponde exactement à un optimum et se maintienne optimal dans l'avenir. En général, l'exploitation d'une province est une dilapidation de son potentiel pour des motifs divers et trop souvent anarchiques de rentabilité immédiate ou à très court terme, sans souci d'un avenir plus lointain, ni du point de vue de la rentabilité directe, ni de celui du sort lointain des populations éventuellement transplantées ou déséquilibrées du fait de cette exploitation à courte vue.

Il existe de très bonnes excuses à ceci : comment voulez-vous prévoir avec sécurité un avenir quelque peu lointain ? Et pourquoi donc se soucier de l'évolution équilibrée des populations, à long terme, alors que l'on a en général agi jusqu'ici par expédients et improvisations successives basées sur des informations insuffisantes relayées par ce que l'on appelle, avec une fierté mal placée, de "l'intuition" ? Et puis, une telle recherche élaborée coûterait cher....

Est-ce certain ? N'est-il pas possible d'utiliser rationnellement l'ordinateur pour arriver à une prévision des aménagements à réaliser qui ne doive pas être modifiée au prix d'ajustements démesurés ? Cela demande certes une préparation des données bien plus précise, bien plus réfléchie aussi, que par le passé. Mais c'est, je crois, très possible, économiquement parlant, et souhaitable.

Ceci exige que l'on reconsidère le problème posé depuis son origine en fonction de son traitement possible par l'ordinateur ; que l'on fasse table rase de toutes les hypothèses simplificatrices introduites jadis - et trop souvent oubliées maintenant - pour permettre d'arriver analytiquement à une solution approchée du problème ; que, en particulier, on n'élimine pas des données ou des facteurs sans être bien certain que leur rôle est négligeable dans les conditions de précisions nécessaires.

Autrement dit, la schématisation raisonnable d'un problème donné et sa programmation à l'ordinateur commence par un examen critique de tous les éléments agissant sur le phénomène étudié. Cet examen critique commence lui-même par un choix des éléments qui semblent susceptibles d'agir ou de devoir être pris en considération ; puis elle doit se poursuivre par un recensement des données expérimentales existantes qui se rattachent aux éléments choisis et une analyse de ces données ; après ces deux étapes préparatoires, une comparaison de leurs résultats permet de choisir les éléments utiles qu'il est possible de prendre en considération, soit directement, parce qu'ils résultent de mesures directes, soit indirectement, parce qu'ils peuvent être déduits de valeurs expérimentales. Ce cheminement permet déjà de se faire une idée de la précision maximale que l'on ne peut espérer dépasser, faute de données expérimentales suffisantes.

Ce processus méthodologique limite l'effort dans la suite des calculs et des opérations : il doit permettre de définir, à toutes les étapes, la précision avec laquelle on doit définir les données à introduire, et donc la sensibilité de la méthode.

Après, "il ne reste plus qu'à" utiliser les données de base en les introduisant dans le calcul avec la précision nécessaire et suffisante, et ce dans un programme logique convenable.

PRINCIPE DE L'ETUDE

Dans ce cadre philosophique d'action, je me suis attaché, dans la présente étude, à rechercher une méthode d'établissement de bilan hydrologique régional faisant intervenir tous les éléments et facteurs déterminables pratiquement et non négligeables, avec une précision suffisante pour que ce bilan puisse être utilisé sans être illusoire dans une étude d'aménagement, préliminaire, d'avant-projet, ou même de projet, et sans pour cela devoir mettre en jeu des efforts superflus. Cette recherche méthodologique suit sensiblement le cheminement inverse du raisonnement du début de cette introduction. La présente étude comprend donc deux grandes parties :

- une partie théorique, qui expose la recherche méthodologique proprement dite,
- et une seconde partie dans laquelle j'essaye d'appliquer les résultats de cette recherche à une région réelle, la Thessalie, dans le Nord de la Grèce.

Première partie théorique - Cadre d'étude du bilan

Dans la première partie, après avoir rappelé le principe de l'étude de bilan, j'examine d'abord son cadre.

Ceci m'amène à décrire le schéma type d'une étude régionale, qui se décompose en étude préliminaire, étude d'avant-projet, puis de projet d'exécution, avec éventuellement à chaque étape réduction de la zone d'application, et donc passage de la région à une de ses parties. En contrepoint de cet exposé de schéma type, j'indique la place du bilan hydrologique et hydrogéologique dans l'étude régionale. Reprenant l'examen du caractère répétitif des calculs du bilan, je tente de définir les paramètres, variables comportant un certain arbitraire pour chaque phase de l'étude régionale. Puis j'indique brièvement l'intérêt du bilan global hydrologique et hydrogéologique pour le réglage, l'adaptation et le contrôle de l'exploitation.

J'examine ensuite le problème du cadre chronologique du bilan et propose, pour des raisons de commodité, l'adoption d'un cycle global annuel pour l'établissement du bilan. Ce cycle global doit d'ailleurs être subdivisé en pas de temps élémentaires destinés à rendre compte des fluctuations saisonnières au cours de l'année, avec une finesse croissante d'une phase de l'étude à l'autre. Les pas de temps proposés sont le trimestre pour l'étude préliminaire, et le mois par la suite.

Ceci fait, j'aborde le problème de la subdivision de la région en éléments commodes pour le calcul du bilan. La subdivision proposée comporte deux étages :

- d'abord l'introduction d'une entité assez étendue et assez homogène pour être utilisée comme unité d'aménagement, et que j'appelle le bassin versant unitaire ou B. V. U.
- puis la subdivision des B. V. U. en aires élémentaires suffisamment réduites et homogènes pour qu'on puisse leur affecter une valeur représentative de chacun des facteurs utiles agissant sur le bilan et des termes du bilan.

J'essaye alors de définir les critères de délimitation des B. V. U., qui sont essentiellement morphologiques et les critères de délimitation des aires élémentaires, qui sont plus nettement géologiques et relatifs à la finalité de l'aire considérée, encore que la morphologie intervienne aussi. Ceci m'amène en particulier à envisager une systématisation de la géologie, basée sur le découpage du sous-sol en tranches successives nettement délimitées et affectées d'indices représentant implicitement les facteurs géologiques agissants. De manière analogue, une systématisation de la topographie se révèle indispensable pour l'établissement des frontières entre aires élémentaires. Enfin l'importance de la finalité des aires élémentaires est mise en évidence, du fait de la diversité des consommations spécifiques en eau correspondant à chaque finalité. Ayant donc défini séparément les divers critères possibles de découpage des B. V. U. en aires élémentaires, j'essaye de les combiner de manière commode. Ceci m'amène à procéder à une élimination parmi ces critères possibles, et à examiner comment on peut simplifier le tracé des frontières, afin d'éviter la prise en compte d'enclaves ou digitations trop petites pour qu'elles aient une influence sur le bilan de l'aire aval.

Mais tant que le mécanisme du bilan élémentaire n'a pas été étudié, ni cette élimination, ni la simplification subséquente ne peuvent être définies très précisément. Par conséquent, après avoir examiné la question de la méthode d'analyse et proposé l'emploi d'une méthode statistique et probabilitaire dans la plupart des cas (tous les calculs prospectifs en cours d'étude) et d'une méthode séquentielle pour les calculs de réglage du modèle de simulation et pour les utilisations du modèle en cours d'exploitation, j'aborde dans un second chapitre de la première partie, l'analyse de la mécanique du bilan élémentaire.

Le bilan élémentaire - Facteurs agissants

Je considère donc une aire élémentaire quelconque, d'ordre i, et établis un organigramme du bilan élémentaire de cette aire. Puis j'analyse la signification de cet organigramme et sa validité. Pour cela, je le décompose en plusieurs cheminements dont j'analyse les termes successivement.

Cette analyse débute par les termes des deux cheminements principaux, qui correspondent :

- au ruissellement superficiel,
- aux écoulements souterrains.

Ces termes se décomposent :

- en termes affluents, connus par définition dans un calcul cumulatif,
- en termes effluents, en principe les inconnues du problème,
- en termes internes.

J'examine alors avec plus de détail ces termes internes et tente :

- de les définir précisément pour une aire donnée et un pas de temps déterminé,
- de les relier aux autres termes du bilan,
- de définir les facteurs physiques qui agissent directement sur chacun de ces termes.

Ceci me permet de mettre en évidence l'importance prépondérante dans le bilan des échanges qui se produisent dans la tranche superficielle du terrain, comprise entre la surface du sol et la nappe phréatique. Je désigne ces échanges, pour les pas de temps définis au chapitre 1, sous le terme de rétention. Après avoir donné une définition rigoureuse de cette rétention, j'en analyse plus précisément le mécanisme et détermine les facteurs agissants. J'examine aussi, avec beaucoup de soin, les termes corollaires de ruissellement direct et d'infiltration directe, ainsi d'ailleurs que les autres termes internes des cheminements principaux (eaux superficielles, évaporation et infiltration des eaux de ruissellement, eaux souterraines, prélèvements et rejets dans les eaux superficielles et souterraines).

J'examine ensuite de manière analogue les cheminements secondaires :

- l'apport d'eau au sol, qui comprend les termes de précipitations, interception verticale et interception horizontale,

- les dotations artificielles : irrigation, élevage, besoins humains, agro-industries, autres industries.

Enfin, je propose que les trois derniers termes secondaires du bilan (évaporation, transpiration et constitution de matière) ne soient pas introduits dans le calcul, en raison de leur complexité et du fait qu'ils résultent d'autres termes déjà pris en compte.

Facteurs utiles

Ayant étudié les termes du bilan élémentaire et énuméré les facteurs agissant sur chacun d'eux, j'aborde, dans un troisième chapitre l'aspect plus pratique du problème du bilan élémentaire. Il est hors de question de mesurer tous les termes du bilan pour chaque aire élémentaire. Il faut donc rechercher des lois de correspondance entre facteurs agissants et termes du bilan, et appliquer ces lois pour les diverses aires élémentaires en supposant les facteurs agissants connus. Malheureusement, les facteurs agissants énumérés au chapitre 2 sont trop nombreux pour être utilisables pratiquement. De plus certains sont délicats, voire impossibles à déterminer expérimentalement. Il y a donc un problème intermédiaire de limitation du nombre des facteurs. Ces facteurs utiles doivent pouvoir être déterminés de manière commode. De plus, ils doivent représenter implicitement sans approximation excessive les facteurs agissants non pris en compte. J'examine donc successivement dans le chapitre 3 les facteurs utiles topographiques, géologiques, hydrogéologiques, agronomiques et climatologiques.

En ce qui concerne la topographie, j'ai finalement retenu comme facteurs utiles la pente moyenne, et la densité linéaire du réseau hydrographique. A cet endroit de l'exposé, j'étudie aussi le problème annexe du choix des échelles de travail selon la phase d'étude en cours.

En ce qui concerne la géologie, je reprend le problème de la subdivision du sous-sol en tranches successives :

- tranche superficielle,
- tranche phréatique,
- tranches profondes.

Je définis alors plus précisément les indices géologiques représentatifs de chacune de ces tranches et examine les méthodes de reconnaissance qu'il serait souhaitable de mettre en œuvre pour arriver à définir des échelles d'indices géologiques susceptibles de représenter, par un seul chiffre, des plages réduites et de taille sensiblement constante des diverses combinaisons possibles dans la région des facteurs géologiques agissants. Ceci m'amène à proposer une méthodologie assez précise pour les levés géologiques, les reconnaissances géophysiques et les mesures de contrôle et d'étalonnage in situ.

J'effectue ensuite un choix parmi les facteurs hydrogéologiques, ne retenant que le niveau piézométrique des nappes profondes et la qualité de l'eau.

Puis je simplifie au maximum le problème des facteurs agissants agronomiques, ne retenant qu'un facteur constant, "indice agronomique" agglomérant tous les caractères constants de la végétation et dont je laisse la définition détaillée aux spécialistes de la question.

J'aborde enfin le dernier genre de facteurs agissants, les facteurs climatologiques et propose de réduire leur nombre de 8 à 3 : indice climatique, quantité des précipitations et température de l'air.

Une récapitulation s'impose alors. A l'issue de cette tentative de simplification, il reste encore :

- 2 facteurs topographiques utiles constants,
- 1 facteur géologique utile constant par tranche de sous-sol individualisée (soit 2 au minimum),
- 1 facteur hydrogéologique utile variable, par tranche profonde individualisée,
- 1 facteur agronomique utile,
- 3 facteurs climatologiques utiles, dont un constant et 2 variables.

Ce nombre de facteurs est tout à fait compatible avec une automatisation du calcul, au moyen d'un ordinateur scientifique comportant des mémoires en assez grand nombre.

Méthodologie - Calculs de réglage

Pour terminer la première partie de cette étude, j'examine dans un quatrième chapitre la méthodologie du calcul de bilan, et en particulier les calculs de réglage. A cette occasion je propose un mode d'utilisation des mesures hydrogéologiques, mais réserve à l'essai d'application de la deuxième partie, une étude plus détaillée des mesures réellement nécessaires.

Deuxième partie - Essai d'application pratique

L'exposé de la méthode globale de calcul de bilan de la première partie est basé sur une expérience réelle effectuée dans le cadre d'une étude d'aménagement régional, effectuée en Thessalie, dans le Nord de la Grèce, de 1966 à 1968. Cependant, la méthodologie à laquelle je suis arrivé après trois ans de recherches

complémentaires diffère notablement de la méthode employée alors pour le calcul du bilan, encore qu'elle s'en inspire.

Il était intéressant, après l'élaboration logique de la méthode globale de reprendre la région en considération et de chercher à appliquer cette méthode globale à la Thessalie, en utilisant les données dont j'avais eu connaissance lors de l'étude réelle de 1966 - 1968 et celles que j'ai pu rassembler par la suite.

C'est là l'objet de la deuxième partie de la présente étude.

Cette seconde partie reprend donc en démarquage l'exposé théorique de la procédure méthodologique globale, après une brève présentation de la région et un exposé de l'esprit dans lequel cet essai d'application est tenté.

Définition des B. V. U.

En premier lieu, dans le chapitre 5 de l'étude je tente d'utiliser les données à disposition pour définir le découpage de la région en B. V. U. A cette occasion l'intérêt d'une analyse topographique systématique est mis en évidence.

Cette analyse porte sur deux points principaux :

- le recensement des sites de retenues envisageables,
- l'établissement d'une carte des pentes.

Après une esquisse de la méthode à suivre pour aboutir à une première élimination des sites de barrages impossibles techniquement ou sans intérêt économique, je reprends en considération les règles de découpage en B. V. U. proposées dans la première partie et les précise.

Définition des aires élémentaires

Puis, dans le chapitre 6, j'aborde le problème de la délimitation des aires élémentaires des B. V. U., et reprends point par point les critères définis dans la première partie. Ceci me permet de comparer point par point les reconnaissances effectuées réellement avec celles qu'il aurait fallu exécuter en principe pour disposer des données nécessaires et suffisantes à la délimitation correcte des aires élémentaires. En fin de chapitre j'examine de façon concrète les procédures de simplification admissibles dans le tracé des frontières entre aires élémentaires.

Caractérisation des aires élémentaires

Dans le chapitre 7, je fais une tentative critique de définition des facteurs utiles caractérisant les aires élémentaires, ce qui m'amène à compléter la comparaison entre les reconnaissances effectuées et les données à disposition lors de l'étude réelle d'une part et, les reconnaissances et mesures qui auraient dû être faites pour une application réellement correcte de la méthode globale de calcul du bilan d'autre part.

Tout au long des chapitres 5, 6 et 7, je tente de poursuivre l'essai, en dépit des lacunes dans les données, et de déterminer l'imprécision qui résulte des approximations nécessaires correspondantes.

Méthodologie - Calculs de réglage

Enfin, dans un huitième et dernier chapitre, je reprends en considération l'articulation du calcul de bilan à l'échelle du B. V. U. et de la région et examine les problèmes que posent les réglages du modèle de simulation.

Après avoir ainsi exposé le sujet de la présente étude et esquissé les grands traits de la procédure suivie, il me faut en exposer le détail.

PREMIERE PARTIE

LE BILAN HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE ; SES FACTEURS

Principe du bilan hydrologique et hydrogéologique

Sans eau, il n'est pas d'aménagement possible. On peut toujours envisager des cultures en terrasses sur des terrains en pente, l'emploi de fertilisants, la culture hydroponique en cas de sols siliceux ou le délavage de sols trop salés. On ne peut rien faire si l'on n'assure pas une alimentation en eau de la région à aménager.

Connaître pour chaque élément de la région les diverses possibilités d'approvisionnement en eau et les conséquences sur les autres éléments de la région, proches ou lointains, de l'attribution à un élément donné d'une certaine dotation en eau est primordial pour la détermination de l'aménagement optimal.

Le problème du bilan hydrologique et hydrogéologique est de déterminer quelles sont les diverses combinaisons possibles de dotations en eau attribuables à chaque élément de la région, telles que les besoins en eau minimums de chaque élément soient satisfaits et que des quantités d'eau supplémentaires soient données à un certain nombre de ces éléments, permettant ainsi de modifier l'état naturel de ces éléments particuliers, et de les aménager. La quantité totale d'eau existant dans une région ou susceptible d'y être amenée pendant une période donnée est à peu près constante. Un bilan hydrologique est une répartition de cette quantité totale disponible entre les éléments de la région, respectant un certain nombre de conditions de compatibilités qu'il faut définir.

Une première conséquence de cet énoncé est que pour une région donnée il peut y avoir plusieurs répartitions de la quantité totale d'eau disponible respectant les conditions de compatibilité, et donc plusieurs bilans hydrologiques et hydrogéologiques.

Une deuxième conséquence est qu'il faut décomposer la région en éléments qui seront caractérisés par des critères constants, à définir qualitativement et quantitativement.

Une troisième conséquence est que le calcul d'un bilan hydrologique et hydrogéologique se fera d'amont vers l'aval, par une méthode de cumul d'éléments "en boule de neige", avec vérification lors de chaque passage à un élément aval de conditions de compatibilité. Ceci impose l'introduction d'une notion d'ordre dans le classement des éléments, depuis O à l'extrême amont jusqu'à une valeur finie variable selon les régions, à l'extrême aval.

Enfin, pour une région donnée, il y aura un grand nombre de calculs de bilan, selon un même schéma d'action, qui différeront par l'attribution de valeurs différentes à certains paramètres attachés à chaque élément de la région.

Le calcul du bilan sera donc répétitif. Ceci justifie ce qui a été dit dans l'introduction au sujet de la nécessité d'emploi de l'ordinateur.

Ce calcul sera paramétrique et ceci sera défini plus précisément dans la première partie de cette étude.

Avant d'essayer d'appliquer pratiquement cette conception du bilan hydrologique et hydrogéologique à une région donnée - la Thessalie dans cette étude - il est nécessaire d'examiner les aspects théoriques du problème, et en particulier le cadre dans lequel on doit envisager les problèmes de bilan, au point de vue organique, géographique et chronologique. Il faut aussi étudier le mécanisme du bilan sur une aire de base quelconque, définir les termes pratiquement utilisables du bilan et leurs relations ; déterminer les facteurs agissants sur chacun de ces termes et rechercher ceux d'entre eux qui peuvent être déterminés pratiquement, et que nous appellerons les facteurs utiles ; étudier les paramètres ; rechercher un mode de détermination des termes du bilan, des facteurs utiles, des paramètres ; définir les conditions de compatibilité.

Bref, avant de tenter une application pratique il faut définir la méthode, et c'est l'objet de cette première partie.

CHAPITRE 1. - LE CADRE D'ETUDE DU BILAN

1.1. Le schéma-type d'étude régionale

1.1.1. L'étude préliminaire

Un aménagement régional dépend de plusieurs ensembles de conditions motrices ou limitatives, qui sont : le besoin économique et humain d'aménager cette région, la volonté politique de l'entreprendre, les possibilités physiques de le réaliser, et l'intérêt socio-économique qu'il peut présenter.

Le besoin économique et humain est déterminé par la population de la région, son niveau de vie, et ses tendances évolutives. Nous supposerons qu'il est un fait.

Nous considérerons aussi la volonté politique d'entreprendre l'aménagement comme un fait. Comme il se peut que cette volonté politique ne résulte pas d'un examen objectif du besoin d'aménager la région, il sera indispensable avant d'en entreprendre l'étude, puis la réalisation, de contrôler si le besoin économique et humain justifie la volonté politique.

Les possibilités d'aménagement sont déterminées par les caractéristiques physiques et humaines de la région (tendances évolutives de la population en particulier) et les conditions économiques locales nationales et internationales. Parmi les caractéristiques physiques de la région, les plus importantes sont l'existence d'eau, qualitativement et quantitativement, la disposition topographique des terrains et leur aptitude à la production agricole. Une fois que ces caractéristiques physiques sont connues, on peut toujours définir des combinaisons de cultures et d'agro-industries compatibles avec la population de la région, ses tendances évolutives, et les conditions économiques ; le cas échéant on peut définir aussi les mesures à prendre pour adapter souplement cette population aux aménagements proposés. Il est possible ainsi d'envisager une action éducative, d'entreprendre un remembrement, et de créer si besoin est des tendances à l'émigration ou à l'immigration. Ces conditions humaines et économiques de l'aménagement ne peuvent toutefois être définies qu'une fois les possibilités physiques de l'aménagement sont connues. Elles interviennent donc en second rang dans la détermination des aménagements possibles.

Enfin, on attribue à chaque aménagement possible un intérêt socio-économique, ce qui permet de faire un choix entre ces possibilités. Cette évaluation socio-économique intervient en troisième rang après les caractéristiques physiques de la région.

Ceci explique pourquoi dans cette étude, je me suis attaché spécialement au traitement des bases physiques naturelles jouant un rôle dans le bilan et ai séparé nettement cette procédure des études agro-socio-économiques, qui sont laissées de côté.

En résumé, l'étude d'un aménagement, que l'on suppose nécessaire et voulu, doit commencer par la recherche des réponses à trois questions, posées dans l'ordre suivant :

1° - Que peut-on faire physiquement ? Et ceci est l'objet de cette étude.
2° - Que peut-on faire humainement ?
3° - Quelle est, ou quelles sont la ou les solutions physiquement et humainement possibles qui sont les plus intéressantes, des points de vue social et économique ? Ces deux questions, nettement distinctes de la première, ne sont pas traitées dans cette étude.

La responsabilité de celui ou de ceux qui entreprennent une étude préliminaire est énorme. Une étude hâtive des éléments et facteurs déterminant la réponse à la première question peut entraîner l'élaboration, puis le choix, et enfin l'exécution d'aménagements qui se révèleront impossibles, ou encore déséquilibreront gravement l'équilibre écologique d'une région, voire même de plusieurs régions avoisinantes. Sans vouloir insister sur les catastrophes récentes en matière de barrages réservoirs, telles que Malpasset et Vajont, ni sur le grave déséquilibre biologique que la construction du barrage d'Assouan a causé, semble-t-il, dans la plaine du Nil à l'aval de l'ouvrage (appauvrissement des sols et en conséquence baisse des rendements) et dans toute la Méditerranée orientale (importante diminution des transports solides du Nil ayant eu pour résultat une modification très grave des conditions d'alimentation de la faune marine), il suffit d'imaginer la responsabilité de l'ingénieur qui conclut hâtivement à la possibilité d'irriguer une plaine au moyen d'eaux souterraines et dont les conclusions s'avèrent erronées, en cours d'aménagement ou plus probablement même après réalisation de l'aménagement, alors que tous les ouvrages ont été réalisés et que les structures de production sont en place.

Une étude préliminaire ne doit pas risquer d'être fausse. Ceci peut amener à un excès de précautions. On est tenté d'adopter des hypothèses délibérément pessimistes pour la détermination des possibilités physiques. Mais ceci n'est pas forcément une bonne solution. Une évaluation trop pessimiste des précipitations, par exemple, amènera à une sous-estimation des ressources en eaux souterraines et des volumes stockables dans les réservoirs artificiels topographiquement et géologiquement possibles. Par conséquent, pour irriguer une superficie donnée on aura recours à un barrage, alors que des puits d'exploitation d'eaux souterraines auraient été possibles, plus économiques et d'application plus souple. De manière similaire, le sous-dimensionnement conduira à projeter, puis construire plus de barrages que strictement nécessaire, même s'il ne s'avère pas possible d'avoir recours aux eaux souterraines.

Cette sous-estimation des précipitations peut donc avoir une grande importance sur l'intérêt économique d'un aménagement.

Des considérations analogues peuvent être faites au sujet de l'évaluation des possibilités topographiques et géologiques de stockage et d'alimentation d'eaux souterraines. Il ne faut donc pas céder à la tentation d'adopter des bases pessimistes et tenter d'évaluer les possibilités physiques d'aménagement le plus exactement possible dès l'étude préliminaire.

On peut en dire autant des conditions humaines de l'aménagement, mais ceci, nous l'avons vu, sort du cadre de cette étude.

A l'issue de l'étude préliminaire régionale, on doit donc avoir déterminé des images vraisemblables de divers aménagements possibles et sélectionné parmi ces images les plus intéressantes socio-économiquement parlant, entre lesquelles l'autorité politique responsable doit faire un choix.

L'étude préliminaire se termine donc par une proposition de choix entre quelques possibilités intéressantes d'aménagement de la région, chacune de ces possibilités étant décrite sous une forme schématique.

Cette présentation des possibilités d'aménagement régional est aussi précise que possible, mais il subsiste une certaine indétermination, un certain flou dans la description.

La rentabilité est probablement rapportée à une année moyenne ;
le programme d'utilisation de l'eau à une subdivision saisonnière de l'année ;
les descriptions techniques des ouvrages et aménagements à entreprendre sont nécessairement schématiques ;
et les évaluations de production et de coût assez approximatives.

Ce qui importe donc à ce point de l'étude d'aménagement régional est non seulement l'exactitude, mais encore la description des diverses possibilités d'aménagement selon les mêmes critères, de manière à ce qu'une première élimination des aménagements sans intérêt puisse être faite avec sécurité, et par la suite, que l'autorité politique responsable puisse faire un choix valable entre les quelques aménagements possibles qui n'ont pas été éliminés.

1.1.2. Le bilan hydrologique dans l'étude préliminaire

Dans l'étude préliminaire, les diverses cultures, les agro-industries qui peuvent en découler et l'évolution de la population sont des inconnues. Les consommations en eau correspondantes aussi. On pourrait imaginer, pour chaque calcul de bilan, de construire une image d'aménagement de chaque élément de la région, d'en déduire les besoins en eau, et de faire le calcul de bilan à ce moment-là.

Ce procédé a le défaut de multiplier le nombre de calculs de bilans sans réelle nécessité et d'obliger à imaginer des aménagements pour les éléments de la région dont les besoins en eau se révèlent excessifs et qui doivent être abandonnés parce que lors du calcul du bilan pour un élément d'ordre supérieur, quelquefois lointain, on ne satisfera plus aux conditions de compatibilité. Il est préférable, dans le calcul du bilan, de ne pas chercher à imaginer un aménagement pour chaque élément, lors de chaque calcul, mais de prendre la dotation en eau de l'élément comme paramètre, sans trop se préoccuper du détail de l'aménagement correspondant.

Comme à chaque dotation en eau il peut correspondre plusieurs aménagements techniques, un seul calcul de bilan pourra être utilisé pour plusieurs combinaisons de cultures et d'agro-industries. Si l'on avait pris les aménagements comme paramètres, il est extrêmement peu probable qu'à deux aménagements différents envisagés aurait correspondu une seule valeur des besoins en eau.

Il est ainsi bien clair que la seconde approche du problème amènera à un nombre bien moindre de calculs de bilan, ce qui est appréciable, même si l'on dispose d'un procédé de calcul répétitif à l'ordinateur.

Ceci permet pratiquement de commencer par des possibilités physiques de la région. De cette manière, l'étude préliminaire est commodément scindée en deux parties :

1° - Une partie hydrologique et hydrogéologique ne préjugeant pas des aménagements et amenant à un nombre limité de combinaisons physiquement possibles à l'échelle régionale de la répartition de l'eau sur chaque élément.

2° - Une partie agro-socio-économique au cours de laquelle pour chaque bilan possible on déterminera un certain nombre d'aménagements compatibles avec les conditions humaines et économiques et entre lesquels on choisira le plus intéressant ; et à l'issue de laquelle on pourra proposer un choix entre deux ou trois aménagements parmi les plus intéressants, et en déduire les ouvrages hydrauliques à réaliser.

A ce degré-là l'autorité politique doit choisir et le cadre d'aménagement de la région est déterminé.

L'étude préliminaire régionale comportera donc deux types de modèles mathématiques :

- hydrologiques et hydrogéologiques, qui seront des modèles de simulation,
- agro-socio-économiques, non traités ici.

Il faudra, dans les modèles hydrologiques et hydrogéologiques considérer la dotation en eau de chaque élément comme un paramètre. Mais est-il commode et justifié de considérer cette dotation comme un paramètre unique ? N'est-il pas préférable d'envisager plusieurs paramètres, différenciés selon leur finalité technique ? Les dotations en eau pour l'irrigation, l'élevage, l'agro-industrie, et la population ne sont pas indépendants les uns des autres. Celles pour l'industrie non agricole et la population non plus. Choisir une dotation unique reporte tous les problèmes d'utilisation de l'eau sur les modèles agro-socio-économiques, et ce n'est peut-être pas souhaitable. De plus, il est difficile de définir la limite supérieure de l'intervalle dans lequel on peut choisir les valeurs arbitraires d'un paramètre de dotation unique et non différenciée.

Ce point est examiné plus loin dans l'analyse du mécanisme du bilan hydrologique de l'élément de région.

1.1.3. Les phases ultérieures de l'étude régionale

Sur la base des conclusions de l'étude préliminaire, l'autorité politique responsable a choisi d'aménager la région selon une des images proposées et décidé d'un certain programme d'aménagement, telle ou telle fraction de la région devant être aménagée avant les autres. L'étude préliminaire est trop schématique pour que l'on puisse commencer l'exécution de l'aménagement sans autres études. Il faut préciser l'image choisie, revoir les limites de la subdivision régionale en éléments, reprendre en considération les bases techniques, humaines et économiques du problème, étudier de nouveau, avec une précision plus grande, les conditions physiques de la fraction de région dont l'aménagement a été décidé, et en quelque sorte faire un agrandissement de l'image, qui en fera apparaître plus de détails. Le flou doit diminuer, puis disparaître. Ceci se fait de manière usuelle en deux phases, l'avant-projet, puis le projet ; pour cette dernière phase, il se peut que le champ de l'image ait encore été réduit et la fraction de région, divisée à son tour en plusieurs sous-fractions devant être aménagées selon un programme chronologique déterminé, à la fin de l'avant-projet.

Chacune de ces phases d'étude doit amener à une image de la fraction de région considérée, articulée selon le même plan que pour l'étude préliminaire.

L'intérêt socio-économique de l'aménagement doit de nouveau être examiné, et pour ce un bilan hydrologique doit de nouveau être effectué.

Il y aura aussi, dans ces phases d'étude deux types de modèles, qui joueront un rôle de squelette pour l'image sub-régionale :

- hydrologique et hydrogéologique,
- agro-socio-économique.

Une idée séduisante serait de pouvoir réutiliser les modèles de l'étude préliminaire pour la suite de l'étude. Ceci est assez délicat et certainement risqué. On doit cependant pouvoir réutiliser des fragments de modèle hydrologique et hydrogéologique d'étude préliminaire. En tous les cas, certains programmes de calcul et le principe d'élaboration de modèle peuvent être les mêmes.

1.1.4. Le bilan hydrologique dans les phases ultérieures de l'étude

Dans le bilan hydrologique d'étude préliminaire correspondant à l'image choisie, on a défini des éléments de région et on a distingué parmi eux les éléments à aménager et ceux à laisser dans leur état actuel. On a aussi déterminé les conditions hydrologiques à l'aval de chaque élément.

Pour ne pas risquer de déséquilibrer le bilan régional et l'image de l'aménagement envisagé, il faut, lors de l'avant-projet et du projet, étudier avec plus de précision les ressources naturelles en eau de chaque élément et s'imposer les mêmes conditions aux limites ; c'est-à-dire, qu'il faut que les quantités d'eau arrivant à l'élément et en sortant soient celles qui ont été déterminées dans l'étude préliminaire. Ce procédé permet de compenser les erreurs, alors que ne pas l'utiliser risque d'amener, par cumul d'erreurs, à des bilans très différents des bilans préliminaires pour les éléments aval.

Par conséquent, les quantités d'eau disponibles pour chaque élément telles que déterminées lors de l'avant-projet ou du projet, seront probablement différentes de celles qui résultaient de l'étude préliminaire.

Si ces différences sont trop fortes, l'organisation agricole de l'élément, et l'organisation agro-industrielle de la région peuvent être remises en question. Il faut donc que cette différence soit assez faible pour que l'étude préliminaire ne puisse être contredite par les phases ultérieures.

Si donc ces différences sont suffisamment faibles, les bilans hydrologiques d'avant-projet et de projet se limiteront à des recherches d'ajustement des utilisations de l'eau dans chaque élément.

Ceci peut se faire de la manière suivante :

A l'image préliminaire adoptée pour la région correspondent pour chaque élément des dotations en eau, attribuées à une certaine répartition de cultures, élevages, agro-industries, besoins humains, etc. Dans l'étude d'avant-projet ou de projet, on a déterminé des ressources en eau propres à chaque élément, dans l'hypothèse d'aménagement adoptée. La somme des dotations et des ressources nouvellement déterminées doit amener à une nouvelle répartition de cultures, élevages, etc., assez peu différente de la précédente, à condition que l'on respecte les conditions d'entrée et de sortie de l'eau, établies lors de l'étude préliminaire. C'est à cet ajustement des répartitions que doit servir le bilan hydrologique lors de l'avant-projet et du projet. Les paramètres ne sont plus les dotations en eau, mais les surfaces de l'élement attribuables à telle ou telle culture de manière à utiliser au mieux les quantités d'eau disponibles et respecter les conditions aux limites de l'élément. Le bilan hydrologique sera donc encore répétitif et paramétrique lors des phases ultérieures de l'étude.

1.1.5. Rôle possible des modèles hydrologiques et hydrogéologiques en cours d'exploitation

Le projet d'une sous-fraction de région est terminé. L'aménagement a été réalisé en conséquence. Cette sous-fraction est organisée et en régime de croisière. Les modèles prévisionnels hydrologiques et hydrogéologiques pourraient donc être classés en archives et oubliés.

Mais la nature est capricieuse et les conditions économiques varient avec le temps. D'une année à l'autre les précipitations peuvent varier considérablement, et, par conséquent, les apports d'eau par ruissellement ou écoulement souterrain à un élément quelconque peuvent varier aussi.

Il y a forcément un certain retard entre le moment où la pluie se produit et celui où l'eau résultante est utilisée. On peut donc, en conséquence, à condition que le pas de temps de calcul du bilan soit assez petit, prévoir avec une certaine avance, à l'aide des modèles hydrologiques et hydrogéologiques, les quantités d'eau qui seront utilisables au moment de la croissance maximale de la végétation, c'est-à-dire, à la fin du printemps et au début de l'été, dans les régions méditerranéennes et tempérées de l'hémisphère nord, si l'on connaît l'état des stocks à la fin de décembre et les apports en janvier, février et mars, par exemple.

Ceci permet d'ajuster à temps les surfaces à attribuer à telle ou telle culture et/ou prévoir les nécessités éventuelles d'eau supplémentaire.

De même, en cas de modification des conditions économiques, les modèles hydrologiques et hydrogéologiques permettront de modifier à temps les types de production de chaque élément.

Les modèles hydrologiques et hydrogéologiques, (de même d'ailleurs que les modèles agro-socio-économiques) joueront donc un rôle de régulateur prévisionnel en cours d'exploitation, ce qui accroît encore leur intérêt.

Ceci est d'autant plus intéressant que l'on peut admettre raisonnablement que les modèles de régulation prévisionnelle en cours d'exploitation différeront peu des modèles de projet.

1. 2. Cadre chronologique du bilan hydrologique

1. 2. 1. Cycle global

La place du bilan hydrologique et hydrogéologique dans l'étude et l'exploitation d'un aménagement agricole régional étant définie, il faut examiner l'aspect chronologique de ce bilan. Le bilan hydrologique régional doit être une image synchrone du bilan agro-socio-économique.

Dans une étude régionale, on cherche à déterminer la rentabilité annuelle de tel ou tel aménagement. Le cycle global du bilan hydrologique et hydrogéologique doit donc être aussi l'année pour des raisons de simplicité pratique. Pourtant, l'hétérogénéité climatique fait que d'une année à l'autre le bilan hydrologique et hydrogéologique correspondant à un aménagement peut varier dans de larges proportions. On pourrait être tenté de choisir un cycle global plus grand. Le climat d'une région évolue de manière oscillatoire, selon une périodicité plus ou moins régulière ; il serait intéressant d'essayer d'adopter cette période d'oscillation comme cycle global du bilan. Mais cette période n'est jamais constante, et prendre un tel cycle amènerait à de grandes complications pour établir la rentabilité.

Il est donc préférable d'adopter un cycle global annuel pour l'établissement du bilan.

Les rotations de cultures à envisager pourront très commodément être prises en compte dans les modèles agro-socio-économiques, à l'aide de tels bilans hydrologiques annuels.

L'irrégularité climatique pourra aussi être introduite soit dans le cadre d'une analyse statistique, soit dans celui d'une analyse séquentielle reproduisant des suites chronologiques d'événements et tentant la prévision de leurs conséquences.

1. 2. 2. Pas de temps élémentaires. Nécessité. Principes de définition

Etablir un bilan annuel directement pourrait être envisagé, mais il serait alors très difficile, sinon impossible, de représenter les fluctuations des événements climatiques et de la croissance des plantes.

Il faut donc subdiviser l'année en éléments de temps et calculer les bilans hydrologiques d'un élément de surface de la région pour chacun de ces éléments de temps, puis en faire la somme, selon un processus de cumul "en boule de neige" analogue à celui qui a été esquissé ci-dessus pour l'articulation géographique du bilan, afin d'arriver au bilan global annuel.

Lors de l'avant-projet, puis du projet, et enfin de la régulation en cours d'explication, le cycle global perd progressivement de son importance, et le problème principal devient la recherche de prévision du bilan pour un certain pas de temps élémentaire en fonction des bilans des pas de temps élémentaires précédents.

Le pas de temps élémentaire doit donc être une fraction de l'année suffisamment petite pour permettre de représenter correctement les fluctuations des événements climatiques et de la croissance de la végétation dans l'année.

D'autre part, il ne doit pas être trop petit, pour ne pas imposer un trop grand nombre de calculs de bilans élémentaires et causer une complication excessive du calcul cumulatif dans le temps.

Il faut donc éliminer la journée de 24 heures et la décade comme pas de temps élémentaires quelle que soit la phase d'utilisation des modèles hydrologiques et hydrogéologiques, sauf peut-être pour la phase de régulation et de management en cours d'exploitation.

Chaque phase d'utilisation des modèles est caractérisée par une recherche de précision plus grande que la précédente. Ainsi, les données expérimentales à disposition lors du projet seront plus nombreuses et plus précises que lors de l'avant-projet.

D'autre part, la liberté de choix des paramètres sera de plus en plus réduite d'une phase à l'autre. Ceci nous permet d'envisager des pas de temps élémentaires plus courts pour le projet que pour l'avant-projet et pour l'avant-projet que pour l'étude préliminaire.

Pratiquement, la discontinuité dans l'étude se trouve entre l'étude préliminaire et l'avant-projet.

Il sera donc justifié et commode de n'envisager que deux pas élémentaires, l'un s'appliquant à l'étude préliminaire, et l'autre aux phases ultérieures de l'étude, ainsi d'ailleurs qu'à la phase de régulation et de management en cours d'exploitation.

1. 2. 3. Le pas de temps élémentaire pour l'étude préliminaire

Le problème de bilan hydrologique et hydrogéologique régional ou sub-régional peut se poser pour n'importe quel type de climats. Examinons donc quelle est la première image possible pour représenter les fluctuations climatiques, dont découlent d'ailleurs, avec un retard négligeable tant que le pas de temps n'est pas trop petit, les variations d'état de la végétation.

Dans les bandes de latitude moyenne, comprises entre 25° et 65° environ, les climats sont assez nettement subdivisés en quatre saisons égales qui peuvent être caractérisées par des valeurs représentatives des éléments du climat. Ceci est vrai pour les climats de type continental, océanique, méditerranéen, subtropical. Pour le climat aride ou désertique ceci n'est plus possible, car, en ce qui concerne les précipitations au moins, la division en saisons n'a plus de sens. Mais pour les températures et donc l'évaporation, cette subdivision peut encore être représentative.

Plus au Nord, les quatre saisons se manifestent toujours, mais leur durée dans l'année est inégale, l'hiver prenant de plus en plus d'importance. On doit pouvoir cependant attribuer des valeurs représentatives aux éléments du climat pour des pas de temps trimestriels. On peut faire des remarques analogues pour les climats tropicaux secs ou humides.

Le climat équatorial est si peu contrasté que la longueur du pas de temps peut être quelconque, et donc aussi bien le trimestre qu'une autre période.

La saison trimestrielle est donc la plus grande fraction de l'année qui permet de représenter les variations climatiques et de végétation au cours d'une année. La précision ne sera peut-être pas très grande, mais nous devons penser que dans la plupart des cas, les données climatiques à utiliser pour une étude préliminaire ne seront pas non plus très précises, ni très sélectives. Un pas de temps trimestriel saisonnier sera donc homogène avec les données normalement disponibles lors d'une étude préliminaire. Nous l'adopterons donc systématiquement.

1. 2. 4. Le pas de temps élémentaire pour les phases ultérieures d'utilisation des modèles hydrologiques et hydrogéologiques

Pour ces phases, il est vraisemblable qu'on disposera de résultats expérimentaux, climatiques et relatifs à la végétation et au cheminement de l'eau, plus nombreux, plus précis et mieux différenciés que pour l'étude préliminaire. D'autre part, la liberté de choix paramétrique sera réduite. On peut donc réduire la durée du pas de temps élémentaire.

Cependant, il ne faudra pas trop réduire cette durée pour que l'on puisse encore négliger le retard entre les événements climatiques et leurs conséquences sur la végétation.

Ceci amène à adopter le mois comme pas de temps élémentaire pour toutes les phases ultérieures d'utilisation des modèles hydrologiques et hydrogéologiques, y compris celle de régulation et management en cours d'exploitation, car si l'on choisit la décade dans ce dernier cas, le retard de la végétation sur les événements climatiques n'est plus négligeable.

1. 3. La subdivision de la région

1. 3. 1. La région, les bassins versants unitaires (B.V.U.) et les aires élémentaires

Le bilan hydrologique est défini pour un élément de surface, qui est le terme de la subdivision de la région. Chaque élément doit pouvoir être caractérisé par des valeurs représentatives des facteurs utiles, permettant ainsi de déterminer ces termes.

Avant d'aborder le problème du bilan élémentaire, il faut définir clairement la région et les critères de sa subdivision.

On peut définir une région selon de multiples critères : administratifs, ethnologiques, morphologiques, entre autres.

Pour une étude d'aménagement hydro-agricole, la morphologie est prépondérante, car c'est elle qui détermine le sens d'écoulement de l'eau. La géologie jouerait aussi un rôle important, car rien ne permet de dire que les écoulements souterrains vont dans le même sens que les écoulements superficiels. On pourrait envisager de subdiviser la région, non seulement selon le chevelu des crêtes de relief, mais en se basant aussi sur les limites des bassins versants géologiques. Mais si l'on voulait tenir compte de cet aspect de l'écoulement des eaux, il serait très difficile de définir une région. L'adoption de deux critères de découpage amènerait à de grandes complications dans la subdivision régionale, et vraisemblablement à des unités de taille disparate, ce qui serait très incommode pour le calcul du bilan. Nous verrons plus loin, au chapitre 2, comment tenir compte des écoulements souterrains qui ne se font pas dans le sens du ruissellement. J'ai donc retenu comme critère de subdivision de la région le chevelu des crêtes topographiques et ai adopté pour la région la définition suivante :

"Une région est une juxtaposition de bassins versants hydrographiques voisins, de tailles et natures diverses, mais déterminées, qui forme un tout géographique et humain".

Pour que cette définition soit complète, il faut y adjoindre celle des bassins versants hydrographiques constitutifs. L'idée vient immédiatement à l'esprit que ces bassins constitutifs pourraient être l'élément de surface à laquelle on pourrait appliquer directement la définition du bilan hydrologique et hydrogéologique. Mais alors il devrait être suffisamment petit pour être caractérisé par des valeurs représentatives des termes du bilan et des facteurs utiles pour les déterminer.

Une région peut s'étendre sur plusieurs milliers de kilomètres carrés. Pour qu'un élément de surface présente des caractères physiques de pente, géologie, végétation, climat, suffisamment peu variables sur son étendue pour que les termes du bilan et les facteurs utiles à leur détermination puissent être représentés par une valeur unique, il ne faut pas que sa surface dépasse quelques kilomètres carrés, sauf cas exceptionnels dans des régions désertiques, tabulaires, par exemple. Si ces éléments de surface étaient pris comme bassins versants constitutifs de la région, il serait délicat, sinon impossible, d'appliquer pratiquement la définition de la région donnée ci-dessus.

Les bassins versants constitutifs d'une région, et que j'appellerai dans la suite de cette étude bassins versants unitaires, et qui seront désignés par l'abréviation B. V. U., seront donc définis comme une aire relais, intermédiaire entre la région et l'élément de surface pour lequel sera calculé le bilan élémentaire et que j'appellerai dans la suite de cette étude : aires élémentaires.

1. 3. 2. Critères de définition des B.V.U.

Un B. V. U. devra être un relais commode dans le calcul du bilan. Il faudra donc que l'on puisse les considérer comme des unités d'aménagement, pour lesquels on pourrait calculer des "bilans unitaires" qui, combinés de plusieurs manières différentes mais compatibles, donneraient des bilans régionaux possibles.

Les fractions de région, objet d'études d'avant-projet ou de projet seront constituées par des groupes de B. V. U. intérieurs à la région et qui formeront un tout géographique et humain.

Les B. V. U. doivent dont être suffisamment petits pour que les aménagements unitaires ne soient pas trop complexes et qu'il y ait au moins un, et de préférence plusieurs, dans chaque sous-fraction de région susceptible d'être un projet distinct d'aménagement hydro-agricole. Ils ne doivent cependant pas être trop petits pour que leurs aménagements ne puissent raisonnablement être distingués de ceux des B.V.U. voisins.

Le B.V.U. doit aussi être un bassin versant hydrographique, c'est-à-dire être limité par des lignes de crête se refermant sur un exutoire unique du réseau hydrographique, ou sur elles-mêmes, en cas de bassin fermé.

Sans préjuger du caractère d'une région particulière, ni du mode d'aménagement, on peut déjà définir des règles assez précises pour la définition des B. V. U.

- Un site de barrage dont la construction est proposée sera une limite aval pour un B. V. U. ou un groupe de B. V. U. En effet, on est obligé de calculer le bilan hydrologique et hydrogéologique du bassin versant du site du barrage et, prendre ce site comme point de fermeture aval d'un groupe de B. V. U. est commode.
- Une chaîne de montagnes séparant une plaine ou un plateau élevé de plaines situées à l'aval est une discontinuité dans la région. Le long d'un cours d'eau le premier resserrement à l'entrée de la traversée de cette chaîne de montagnes et le dernier resserrement à la sortie peuvent être des points de fermeture de groupes de B. V. U.
- Il est utile de distinguer entre bassins versants à prépondérance montagneuse et bassins versants de plaines. Autant que possible un B. V. U. doit être homogène. Cette règle en particulier est à appliquer avec souplesse et discernement. Pousser la différenciation entre bassin de plaine et bassin de montagne à leur limite logique risque fort d'amener à une multitude de B. V. U. de montagne de taille souvent minuscule et à un nombre réduit de B. V. U. de plaine.
- Pour subdiviser un B. V. U. de plaine de dimensions excessives, on peut admettre qu'un cours d'eau important dans une plaine peut être une limite de B. V. U. S'il est bordé par des canaux de drainage, les points de rejet au cours d'eau de ces canaux seront considérés comme limite aval de groupe de B. V. U.
- Pour donner un ordre d'idées, un B. V. U. de montagne doit avoir une dimension minimale de 5 km^2, ce qui correspond à un petit lac collinaire, et ne doit pas dépasser 200 à 300 km^2. En effet, au-delà de cette limite, l'hétérogénéité morphologique et géologique commune à toutes les régions montagneuses amènerait à une multiplication excessive du nombre d'aires élémentaires et le B. V. U. cesserait d'être un relais commode dans le calcul.
- Pour les B. V. U. de plaine, comme la morphologie et la géologie permettront de définir des aires élémentaires plus grandes que dans les montagnes, on pourra avoir des B. V. U. de surface bien supérieure et pouvant aller à 1000 km^2 sans qu'il y ait une complication du calcul supérieure à celle que l'on aurait pour un B. V. U. de montagne de 250 à 300 km^2.

Ces règles sont très qualitatives, mais elles permettent déjà de cerner le problème de la subdivision de la région. Elles ne sont pas à appliquer dans tous les cas avec rigueur, et il y a une question d'appréciation. De toute manière, on peut obtenir des résultats satisfaisants pour une même région au moyen de plusieurs subdivisions différentes en B. V. U. Il ne faut pas cependant que cette subdivision soit trop hâtivement effectuée, sous prétexte qu'elle n'est pas unique. En effet, à partir du moment où elle est faite, elle devient unique et invariable. Elle est le squelette de la structuration régionale. Ses qualités et ses défauts se répercuteront sur l'avenir de l'aménagement. Il faut donc bien étudier la personnalité de la région et appliquer les règles ci-dessus en conséquence pour effectuer la subdivision de la région en B. V. U.

1. 3. 3. Les aires élémentaires. Principe de découpage

Une fois la région subdivisée en B. V. U., il faut décomposer chacun d'entre eux, en aires élémentaires, qui, rappelons-le, doivent être assez petites pour qu'il soit possible de leur attribuer des valeurs représentatives des termes du bilan et des facteurs utiles à la détermination de ces derniers.

Quels sont les critères qui peuvent permettre de définir des aires élémentaires ?

Les termes du bilan représenteront l'eau qui y arrive, celle qui y est consommée, celle qui en sort, et celle qui y reste en réserve. En plus de leur finalité, ces termes seront caractérisés par leur origine et leur position. L'eau qui entre dans une aire élémentaire peut arriver soit par précipitations, soit par ruissellement, soit par écoulements souterrains. Elle peut en sortir par évaporation, par transpiration de la végétation, par ruissellement, ou par écoulements souterrains. Sur l'aire élémentaire elle-même, elle peut être consommée par la végétation naturelle, par les cultures, irriguées ou non, par l'élevage, l'industrie, agricole ou non, ou par la population. Elle peut provenir des réserves de la tranche superficielle de sol, de celles du sous-sol, ou de celles des eaux superficielles.

Les facteurs agissant sur ces termes du bilan relèveront de plusieurs disciplines :

- topographie,
- géologie et hydrogéologie,
- agronomie (végétation naturelle ou artificielle, élevage),
- climatologie,
- génie industriel (agro-industries et autres),
- hydraulique urbaine.

Certains de ces facteurs sont des caractéristiques indépendantes de l'aménagement. Ce sont les facteurs topographiques, géologiques, certains facteurs hydrogéologiques, et les facteurs climatologiques (avec une certaine approximation).

Certains facteurs agronomiques le sont aussi : ceux qui définissent la végétation naturelle destinée à le rester durant toute l'étude, et ceux qui définissent les cultures irriguées ou non, à partir de l'avant-projet. Les autres facteurs peuvent varier d'un aménagement à l'autre : ce sont les autres facteurs agronomiques, certains facteurs hydrogéologiques et les facteurs de génie industriel et d'hydraulique urbaine qui déterminent les dotations en eau nécessaires pour l'irrigation, l'industrie et la consommation humaine.

Le découpage en aires élémentaires doit rester le même pour tous les calculs de bilan correspondant à une phase d'utilisation des modèles hydrologiques et hydrogéologiques. Lors des phases ultérieures, on peut envisager des découpages différents, mais il sera commode de maintenir les limites des aires élémentaires de l'étude préliminaire et de subdiviser éventuellement ces aires élémentaires primaires en aires élémentaires secondaires pour l'avant-projet, et ces dernières en aires tertiaires pour le projet et le management en cours d'exploitation.

Les critères de découpage du B.V.U. doivent être choisis parmi les facteurs déterminants qui sont des caractères constants et pour des raisons de commodité.

Quels facteurs choisir, parmi ceux qui peuvent être des caractères de l'aire élémentaire indépendants de son aménagement, comme critères commodes de délimitation de cette aire élémentaire.

Les critères de découpage doivent faire partie des facteurs utiles, c'est-à-dire, parmi les facteurs agissants, de ceux qui peuvent être déterminés commodément, ou sont couramment mesurés. Ils doivent de plus être invariables avec le temps, ce qui élimine d'emblée les facteurs climatologiques et les facteurs hydrogéologiques, qui sont conditionnés par les apports d'eau et donc par le climat et les aménagements des aires élémentaires d'ordre inférieur. Les critères de découpage du B. V. U. en aires élémentaires doivent donc être choisis parmi les facteurs topographiques, géologiques et agronomiques.

Tous les facteurs utiles constants ne doivent pas être pris comme critères de découpage du B. V. U. Un choix s'impose. Pour les facteurs utiles constants non retenus comme critères de découpage, il faut cependant pouvoir déterminer une valeur représentative de chaque aire élémentaire.

1.3.4. Critères et caractéristiques morphologiques

Les facteurs morphologiques agissants sont nombreux. Certains sont topographiques (pente, altitude, exposition, réseau hydrographique, chevelu des lignes de crête), d'autres plus purement morphologiques (érosion, par exemple).

La plupart sont mesurables ou déterminables aisément et peuvent donc être classés parmi les facteurs utiles. Cependant il n'est pas nécessaire de tenir compte de chacun. L'érosion par exemple est déterminée par le climat, la nature du sol (qui ressort de la géologie), la végétation (qui ressort de l'agronomie), et la pente. Nous pourrons donc limiter le nombre des facteurs morphologiques utiles aux cinq facteurs topographiques suivants : la pente, l'altitude, l'exposition, le réseau hydrographique et le chevelu des lignes de crête.

Chacun des cinq pourrait être un critère commode de délimitation des aires élémentaires. Mais il est clair que l'emploi de tous ces critères amènerait à une subdivision d'une complication inextricable quelle que soit l'échelle de travail. Il y a donc un problème de choix.

La pente moyenne est utilisée couramment pour classer les terrains cultivables en classes de difficultés différentes de mise en exploitation, et elle est un facteur utile important dans la répartition des précipitations entre divers termes du bilan au contact du sol.

L'altitude joue un rôle dans le choix des types d'aménagement, et dans chaque cas il y a certainement une altitude limite au-dessus de laquelle aucun aménagement agricole n'est possible. Mais le rôle de l'altitude intervient plus dans le choix des cultures que dans le bilan lui-même : la même quantité d'eau disponible à deux altitudes différentes sera utilisée pour des cultures différentes. Mais, sauf au-dessus de la limite indiquée ci-dessus, et sauf si la pente est trop forte pour que le terrain soit raisonnablement aménagé, il sera possible de combiner un aménagement agricole quelle que soit l'altitude.

L'exposition joue un rôle analogue à l'altitude, car elle conditionne plus le type des cultures à choisir que les quantités d'eau du bilan. Il n'y a pas, en général, d'exposition pour laquelle la culture est impossible. On peut cependant penser que l'altitude limite d'aménagement variera selon l'exposition, ce qui rend plus délicate l'introduction de cette altitude limite.

Le réseau hydrographique qui est déjà un critère pour la subdivision des B. V. U., et le chevelu des lignes de crête sont aisément déterminables. Il ne faut, cependant, pas pousser trop loin dans le détail leur tracé et il est nécessaire d'étudier sur l'exemple les conditions limites de sensibilité. Il est alors naturel de considérer les cours d'eau et les lignes de crête d'importance non négligeable comme des frontières d'aires élémentaires.

Nous adopterons donc comme critères de découpage possible dans des conditions limites de sensibilité à étudier, la pente moyenne, le réseau hydrographique et le chevelu des lignes de crête.

Nous retiendrons d'autre part comme caractéristiques pouvant être utiles l'altitude moyenne et l'exposition.

Les méthodes et règles de détermination des valeurs représentatives des caractéristiques des aires élémentaires et le mode de détermination des relations entre ces caractéristiques et la répartition de l'eau à la surface du sol, sont examinés aux chapitres 3 et 4 ainsi que sur l'exemple thessalien (point 6.2).

1.3.5. Critères et caractéristiques géologiques et agronomiques

1.3.5.1. Les facteurs géologiques agissants

Les facteurs géologiques agissants sont nombreux et plus délicats à représenter que les facteurs morphologiques. Il est possible d'énumérer :

- composition et structure de la tranche superficielle et des couches sous-jacentes jusqu'à des profondeurs dépassant très largement la profondeur économique d'exploitation des eaux souterraines ;
- nature, texture, porosité, fissuration, perméabilité, sensibilité à l'eau des terrains (sols et roches) constituant la tranche superficielle et les couches sous-jacentes ; caractères chimiques et minéralogiques de la tranche superficielle, afin de déterminer leur aptitude éventuelle à la culture.

Ces facteurs sont trop nombreux pour être commodément utilisés en attribuant à chacun d'eux une valeur représentative pour chaque aire élémentaire. Il est impossible de les exprimer tous. Pourtant ils agissent et il faut pouvoir en tenir compte. D'autre part, il n'est ni commode, ni économique de tenter de tous les déterminer pour chaque aire élémentaire. Il vaut mieux essayer de les grouper et de ne retenir qu'un nombre limité de facteurs utiles.

Les facteurs géologiques agiront sur la répartition des précipitations en termes du bilan au contact du sol, sur la capacité de la tranche superficielle et des couches sous-jacentes d'absorber, puis de retenir de l'eau, de la transmettre à la végétation, à l'atmosphère, et aux couches voisines situées en dessous ou en dessus ou à côté. Ils agiront aussi sur la possibilité de fournir à la végétation les éléments chimiques et organiques nécessaires à sa croissance. Il s'agit là plutôt de pédologie que de géologie à proprement parler, mais la pédologie peut être considérée comme une branche de la géologie.

Les facteurs géologiques pratiquement déterminables sont au fond assez peu nombreux.

1.3.5.2. Caractérisation de la tranche superficielle

En premier lieu viennent la nature, la composition et la structure superficielles.

- La nature d'un terrain peut être caractérisée qualitativement d'abord, au moyen d'une description lithologique et/ou pédologique et du rattachement à une classification standard. Quelques essais granulométriques, mesures de la fissuration et du retrait des sols meubles ; quelques évaluations du degré de fissuration, de l'altération superficielle des roches ; quelques réactions chimiques standardisées peuvent être effectuées et permettre une classification plus fine des terrains superficiels. Des prélèvements à la tarière à main ou mécanique légère peuvent être effectués dans les sols meubles sur toute la tranche superficielle du sol. Dans les roches dures, une étude géologique de terrain permet dans la plupart des cas de déterminer la nature et la structure des terrains constituant la tranche superficielle.

Des essais d'absorption et de répartition de l'eau dans cette tranche superficielle peuvent être effectués et permettre de relier ces termes du bilan aux indices de classification des terrains constituants de la tranche superficielle du sol.

Tous ces essais sont assez coûteux et nécessitent un certain temps ; le coût et les délais peuvent être prohibitifs si l'on veut déterminer précisément la nature et la composition des terrains superficiels de chaque aire élémentaire. Il faut mettre au point des règles de correspondance valables au moins à l'échelle d'un groupe de B. V. U. entre les caractères descriptifs et rapidement déterminables, au besoin étayés par quelques essais rapides et peu coûteux effectués en grand nombre sur toutes les aires élémentaires et des essais plus élaborés effectués en un nombre réduit de points, nombre pouvant croître d'ailleurs d'une phase à l'autre de l'étude. On aboutit ainsi à attribuer aux terrains superficiels constituant chaque aire élémentaire, un indice de classification standard, déterminé avec une sécurité et une précision croissantes au fur et à mesure que l'on avance dans l'étude.

Il faut parallèlement effectuer des mesures de la répartition de l'eau et de la possibilité de cultiver la tranche superficielle en plusieurs endroits situés dans des terrains auxquels ont été attribués des indices de classification différents et essayer d'établir une correspondance entre ces indices et les termes de répartition de l'eau dans le sol. Le nombre de ces stations de mesures et essais de corrélation peut être croissant d'une phase de l'étude à l'autre. Il est à la rigueur possible que pour l'étude préliminaire on doive se contenter de comparer les indices de classification à des termes de répartition de l'eau mesurés dans d'autres régions plus ou moins analogues. Pour les phases ultérieures ceci sera inacceptable. Des mesures annexes, de résistivité du sol, par exemple, ou au moyen de sondes radioactives, peuvent être très utiles pour étayer les tentatives de corrélations.

- La connaissance de la composition et de la structure de la tranche superficielle, c'est-à-dire la localisation dans la tranche superficielle des volumes constituants appartenant à telle ou telle classe de terrains, résulte donc d'observations directes du sol et de l'interprétation des éventuels sondages à la tarière et mesures légères de résistivité, ou à l'aide de sondes radioactives.

Mais cette caractérisation n'est pas commode pour délimiter des aires élémentaires dans un B. V. U. car elle porte sur des volumes. Elle est pourtant très importante, car elle détermine la possibilité d'aménagement agricole de la surface. Il serait intéressant de définir un critère de subdivision du B. V. U. à l'aide de ces caractères, mais en les rapportant à la surface. Ceci est tout à fait possible : au lieu de conserver pour la tranche superficielle une caractérisation tridimensionnelle, par localisation de volumes affectés d'un indice de classification, on peut combiner (par exemple par pondération) les indices des sols successifs situés sur une même verticale, en tenant compte de leur épaisseur et éventuellement de leur position et obtenir un indice pondéré représentatif de la tranche superficielle de sol en ce point.

Ces indices pondérés ponctuels peuvent ensuite être groupés en valeurs représentatives d'une aire, en effectuant leur moyenne arithmétique, s'ils sont assez nombreux, ou par moyenne pondérée à l'aide d'une connaissance assez précise de la structure de la tranche superficielle de sol, ou encore en essayant d'établir des cartes d'iso-indices. Il est clair que si l'on dispose de moyens de reconnaissances permettant de caractériser directement l'indice géologique superficiel en un point, la procédure sera simplifiée.

Ceci sera examiné plus en détail aux chapitres 3 et 4 et sur l'exemple thessalien.

Voici donc définies les grandes lignes d'une action possible pour représenter la tranche superficielle par des indices représentatifs d'aires délimitées. Ces indices représentatifs de la tranche superficielle sur une aire délimitée sont des critères commodes de délimitation des aires élémentaires. Avant de décider de leur adoption, il nous faut encore examiner la géologie du sous-sol.

1.3.5.3. Caractérisation du sous-sol

Géologiquement le sous-sol, c'est-à-dire l'ensemble des terrains situés sous la tranche superficielle, est caractérisé par sa composition et sa structure, et par la nature de ses constituants.

- La nature d'une roche ou d'un terrain meuble appartenant au sous-sol est déterminable de la même manière que celle d'un terrain affleurant, avec quelques différences importantes :
  - il n'affleure pas dans l'aire considérée,
  - sa nature en profondeur peut être différente de celle que l'on peut éventuellement observer sur un affleurement plus ou moins lointain de la même formation.

Il faudra donc appuyer principalement cette détermination sur des reconnaissances par sondages profonds, encore plus coûteux et nécessitant encore plus de temps que les reconnaissances superficielles citées en 1.3.5.2. ci-dessus. Il faut cependant les déterminer, car c'est de leur connaissance que dépendra une prévision des cheminements possibles de l'eau dans le sous-sol, des communications avec la tranche superficielle, avec les roches adjacentes et finalement des possibilités de prélèvement d'eaux souterraines.

Il est possible de combiner des reconnaissances légères, rapides et relativement peu coûteuses effectuées sur toute la surface de la région à étudier, avec un nombre plus réduit de sondages mécaniques qui permettent de prélever des échantillons sur lesquels on peut déterminer la nature lithologique, évaluer la fissuration et les

éventuels caractères chimiques intéressants. Le long de ces sondages, on peut aussi déterminer des caractéristiques de perméabilité, porosité, au moyen d'essais de pompage ou d'injection d'eau et mesurer certains caractères physiques, telles que la résistivité du sol ou ses réactions à des rayonnements radioactifs, qui permettront une corrélation plus aisée avec les reconnaissances légères.

Ces reconnaissances légères, en général géophysiques, peuvent utiliser des procédés électriques (mesures de résistivité, par exemple), mécaniques (sismiques réflection ou réfraction) ou autres (magnétisme, gravimétrie). De cette manière, on peut aboutir à une connaissance de la nature des constituants du sous-sol de plus en plus précis au fur et à mesure de l'avancement de l'étude, en multipliant les sondages mécaniques qui permettent de faire la corrélation entre les résultats des reconnaissances légères et les caractéristiques des roches. On peut ainsi caractériser chaque roche constitutive du sous-sol, dans un groupe de B. V. U. déterminé (aucune règle de corrélation de ce type ne saurait avoir de valeur générale quantitative) par une valeur, qui peut être sa perméabilité, sa transmissivité ou un indice de classification qui peut être rattachée aux possibilités de mouvements et de rétention de l'eau au moyen de mesures directes effectuées en des stations de mesure réparties raisonnablement sur la région ou fraction de région à étudier selon un processus analogue à celui exposé au sujet de la tranche superficielle de sol.

- La composition et la structure du sous-sol peuvent être déterminées à l'aide des résultats des sondages mécaniques et reconnaissances légères, convenablement corrélées et appuyées sur les résultats d'une reconnaissance géologique de surface, comprenant éventuellement une interprétation photogéologique préliminaire.

Ici aussi, cette détermination pourra et devra être précisée au fur et à mesure de l'avancement de l'étude, grâce à des changements d'échelle et à la multiplication raisonnable des sondages mécaniques et stations de mesure directe des termes de répartition de l'eau dans le sous-sol.

- On arrive donc ici aussi à définir les limites dans le sous-sol de volumes de roches à chacun desquels peut être attribuée une valeur représentative des facteurs agissant sur la répartition de l'eau dans ces roches.

Ceci est une représentation utile et nécessaire pour déterminer les conditions dans lesquelles on pourra faire un puits d'exploitation des eaux souterraines et la production de ce puits. Mais il est clair que d'un point à un autre, les caractéristiques précises d'un puits seront différentes. Ce qui importe, dans un problème de bilan, plus que la connaissance précise des conditions d'exécution et d'exploitation de chaque puits envisageable, est une connaissance moyenne des possibilités pour une zone de produire telle ou telle quantité d'eau souterraine pendant une période déterminée, au moyen de prélèvements caractérisés par une densité déterminée de puits de profondeur moyenne définie, et avec un rabattement moyen connu. Il faut donc, en ce qui concerne la géologie, connaître la productibilité globale possible d'une certaine tranche de sous-sol, limitée par la profondeur maximale économiquement acceptable de puits d'exploitation, plutôt que le détail de la position et des caractères des aquifères en chaque point. Il faut donc déterminer pour chaque sondage mécanique exécuté un facteur utile caractéristique de la tranche de sous-sol considérée, que l'on pourra relier, d'une part aux mesures de répartition de l'eau dans le sous-sol et en particulier des productivités de puits d'essai, et d'autre part aux résultats des reconnaissances légères. Ceci peut se faire de manière analogue à celle décrite pour la tranche superficielle de sol en 1.3.5.2. ci-dessus, par pondération des valeurs caractéristiques des roches rencontrées dans les sondages mécaniques, en tenant compte de l'épaisseur et éventuellement de la position de ces roches.

On peut ensuite par corrélation avec les résultats de reconnaissances légères déterminer des aires caractérisables par une seule valeur du facteur utile caractéristique de la tranche utile du sous-sol, ou plus exactement par une "plage" d'étendue suffisamment réduite de valeurs de ce facteur utile, pour que l'on puisse attribuer de manière représentative à chacune de ces aires la valeur moyenne ou la médiane de cette plage.

Le détail de ce processus sera examiné plus loin aux chapitres 3 et 4 et sur l'exemple thessalien .

1.3.5.4. Choix des critères géologiques de délimitation de l'aire élémentaire et des caractéristiques géologiques utiles de cette aire. Elimination des facteurs agronomiques comme critères

Nous avons vu en 1.3.5.2. que l'on pouvait subdiviser la tranche superficielle en zones caractérisées par des indices représentatifs de la répartition de l'eau dans cette tranche et de la possibilité d'y aménager des cultures ou non. Nous les appellerons indices géologiques superficiels. Il y aura vraisemblablement plusieurs valeurs possibles pour ces indices, dans une échelle à définir pour chaque région.

Nous avons aussi esquissé en 1.3.5.3. les grandes lignes d'un mode de caractérisation du sous-sol au moyen d'indices géologiques du sous-sol. Les zones d'égal indice géologique superficiel et celles de mêmes indices géologiques du sous-sol ne coïncideront certainement pas. D'autre part, dans le cas d'un sous-sol complexe nous serons peut-être amenés à définir plusieurs tranches dans le sous-sol et à attribuer à chacune de ces tranches un indice géologique.

On pourrait cependant envisager d'adopter tous ces indices comme critères de découpage du B.V.U. en aires élémentaires. On risque alors d'aboutir à une subdivision en zones caractérisées par de mêmes valeurs d'indices géologiques qui serait excessivement fine. Il se pose donc ici aussi, comme pour les facteurs morphologiques un problème de choix et de sensibilité. Ceci ne peut être fait qu'après examen des autres critères envisageables pour la délimitation des aires élémentaires.

La végétation intervient dans le bilan de plusieurs manières : par la consommation d'eau qui est nécessaire à sa nutrition et sa croissance, et par son influence sur les précipitations (interception) et l'évaporation. Selon les espèces constituant la végétation, leur densité de plantation, leur âge, et la saison, cette intervention sur le bilan sera différente. Les facteurs agronomiques agissants ne sont donc pas tous indépendants du temps et il faudrait en toute rigueur ne pas les considérer comme critères possibles de découpage du B. V. U. Pourtant, certains éléments caractérisant la végétation sont constants, ou du moins peuvent être considérés comme constants à l'échelle du cycle global d'établissement du bilan. Ce sont :

- le type de végétation, qui peut être caractérisé par l'espèce, ou plus exactement, dans le cas des forêts, la répartition des essences constituantes, la densité de plantation ,
- l'âge moyen des plants (dans le cas des forêts, et de la végétation non annuelle (vergers, vignes, certaines plantes fourragères, etc.).

Est-il intéressant d'adopter un des facteurs agronomiques constants comme critère de découpage du B. V. U. ?

Un B. V. U. n'est pas forcément totalement aménageable. Il existe certainement des surfaces non cultivables ou boisables économiquement pour des raisons morphologiques ou géologiques. Il y a aussi des limitations dues aux ressources en eau, mais ceci est un aspect du problème du bilan hydrologique.

Nous avons vu en 1.1. que lors de l'étude préliminaire on n'essayait pas de définir la répartition des cultures sur les aires élémentaires à aménager, mais que l'on prenait comme paramètres les dotations en eau utilisables, pour la culture, pour l'élevage, l'industrie et la consommation humaine. Dans certains cas les dotations seront nulles pour certaines aires élémentaires, ce qui veut dire que liberté sera laissée aux agronomes, sociologues et économistes chargés des modèles agro-socio-économiques, de laisser ces aires dans leur état actuel ou de modifier cet état sans amener d'eau supplémentaire. Les frontières entre divers types de végétation ne seront donc constantes et indépendantes de l'aménagement que pour les aires élémentaires non aménageables, dont l'importance est nécessairement moindre dans le bilan que celle des aires élémentaires aménageables.

D'autre part, on ne peut pas considérer l'âge des plants constituant une végétation pérenne comme une stricte constante.

Il est donc préférable de ne pas retenir de critère agronomique pour la délimitation des aires élémentaires dans le cas de l'étude préliminaire. On déterminera si besoin est les consommations en eau de la végétation naturelle par composition pondérée des consommations des diverses végétations constitutives.

Nous reviendrons sur la manière de représenter la végétation d'une aire élémentaire lors de l'étude préliminaire après avoir étudié le mécanisme du bilan élémentaire, car connaître ce mécanisme est nécessaire pour déterminer la manière utile la plus simple de représenter la végétation, si cette représentation est nécessaire.

Dans le cas des phases ultérieures de l'étude, le problème peut être différent : en effet, les types des cultures sont déterminés sur l'ensemble des aires aménageables. Il n'est plus nécessaire que de préciser leur répartition. On pourrait donc introduire un nouveau critère de découpage du B. V. U. qui représenterait le type de végétation. Mais ceci obligerait à localiser sur chaque aire élémentaire primaire les surfaces consacrées à chaque culture envisagée, ce qui ne peut guère se faire raisonnablement sans qu'une étude plus détaillée de la tranche superficielle du sol ait été faite, de manière à distribuer les diverses cultures sur les sols les plus aptes à leur assurer une croissance correcte. Il risque donc d'y avoir double emploi, lors du découpage secondaire des aires élémentaires primaires, entre le critère géologique et l'éventuel critère agronomique.

D'autre part, l'emploi d'un critère agronomique risque d'imposer une localisation trop schématique des cultures, sans qu'il soit tenu compte des éventuelles limitations humaines et économiques.

Il est donc préférable, même dans le cas des phases ultérieures de l'étude, de ne pas introduire de critère agronomique de découpage secondaire. Le découpage secondaire se fera au moyen de critères géologiques plus précis. A chacune des aires élémentaires secondaires sera affectée au début de l'étude d'avant-projet une répartition de cultures tenant compte des qualités des sols et des limitations humaines et économiques, telle que la somme des diverses cultures attribuée aux aires secondaires constitutives d'une aire primaire aboutisse à la répartition des cultures sur l'aire primaire correspondant à l'aménagement choisi à l'issue de l'étude préliminaire. Le bilan sera alors calculé en tenant compte des données nouvelles sur les ressources naturelles en eau des aires secondaires, et les répartitions de cultures adaptées sur ces aires secondaires de manière à respecter les conditions aux limites des aires primaires, qui sont la constance des quantités d'eau entrant et sortant.

Un raisonnement analogue peut être fait pour le passage des aires secondaires aux aires tertiaires et je n'insisterai pas à ce sujet.

1.3.6. Critères de finalité

Nous pourrions arrêter là l'examen du mode de découpage du B. V. U. Mais un point mérite d'être étudié plus en détail : c'est la finalité des aires élémentaires.

Nous avons déjà vu que dans un B. V. U. il peut y avoir des aires non aménageables pour des raisons de pente trop forte ou d'impossibilité géologique ; et que, parmi les aires aménageables, certaines ne recevront pas de dotation supplémentaire. Il peut être commode pour la clarté du calcul de classer les aires élémentaires selon leur finalité. L'impossibilité d'aménager une aire est un de ces critères. Remarquons cependant qu'il y a d'autres raisons pour une aire élémentaire de n'être pas aménageable, au point de vue agricole, que des raisons de pente ou de géologie. Une aire élémentaire théoriquement aménageable ou non peut être occupée par une agglomération, un aménagement industriel ou une étendue d'eau de taille non négligeable. Ceci nous amène à introduire de nouveaux critères de découpage du B. V. U., que nous appellerons critères de finalité. Les agglomérations changeront du fait de l'aménagement. Les aménagements industriels et les étendues d'eau aussi. Le calcul du bilan sera probablement différent pour une aire couverte de végétation de celui d'une aire occupée par une agglomération, un aménagement industriel ou une étendue d'eau.

Il faut donc pouvoir, lors d'un calcul de bilan attribuer un but à chaque aire élémentaire du B. V. U. Cette attribution ne peut être faite au hasard.

La possibilité pour une aire d'être aménagée du point de vue agricole est définie par le fait que cette aire satisfait à des conditions topographiques et géologiques déterminées et n'est pas occupée par une étendue d'eau, une agglomération ou un aménagement industriel préexistant de superficie non négligeable.

Certaines aires sont occupées par des étendues d'eau, des agglomérations ou des aménagements industriels de superficie non négligeable dès l'origine de l'étude. Il faut donc les exclure des surfaces aménageables ou destinées à rester dans leur état naturel de végétation dans tous les cas, et les classer séparément.

Les agglomérations et aménagements industriels sont en général groupés et leurs consommations en eau seront déterminées par des méthodes analogues. Il est donc possible de les grouper, au moins lors de l'étude préliminaire. On peut, par contre, avoir intérêt à les différencier à partir de l'avant-projet. Il est normal de penser que les agglomérations non négligeables et les aménagements industriels qui leur sont annexés s'étendront du fait de l'aménagement et mordront sur des aires qui, autrement, seraient aménageables du point de vue agricole. Il est rationnel de prévoir autour de ces agglomérations une zone d'extension possible et de considérer la limite de cette zone comme une frontière d'aires élémentaires, dès le début de l'étude préliminaire. Ceci est pratiquement possible sans grandes difficultés, comme nous le verrons sur l'exemple. Il est d'ailleurs possible et utile de distinguer des limites d'extension intermédiaires envisageables des agglomérations urbaines.

Le long du réseau hydrographique, il est possible de créer des retenues artificielles de surface non négligeable. Il est possible et utile de délimiter dès l'étude préliminaire les limites des surfaces qui peuvent être occupées par ces retenues artificielles, et selon le cas d'aménagement considéré, de les attribuer, soit à l'aménagement agricole, soit à la retenue d'eau. Ces surfaces peuvent être déterminées plus précisément lors des phases ultérieures de l'étude.

Nous arrivons donc à la classification suivante pour les aires élémentaires :

- aires élémentaires de végétation naturelle (non aménageables)
  - définitivement,
  - pouvant devenir :
    - aire élémentaire hydrographique
    - aire élémentaire urbaine et industrielle
- aire élémentaire aménageable (sous-entendu du point de vue agricole)
  - ne pouvant être affectée à une autre finalité, mais non obligatoirement aménagée (en ce cas assimilée à une aire de végétation naturelle),
  - pouvant devenir :
    - aire élémentaire hydrographique
    - aire élémentaire urbaine et industrielle
- aires élémentaires hydrographiques
  - l'étant dès l'origine de l'étude (naturelles)
  - le devenant et provenant (artificielles)
    - des aires élémentaires de végétation naturelle
    - des aires élémentaires aménageables
- aires élémentaires urbaines et industrielles, qui sont scindées en aires élémentaires urbaines et en aires élémentaires industrielles à partir de l'avant-projet et qui peuvent;
  - l'être dès l'origine de l'étude,

  - le devenir et provenir :
    - des aires élémentaires de végétation naturelle
    - des aires élémentaires aménageables.

1.3.7. Choix des critères de délimitation des aires élémentaires

Dans les paragraphes précédents, nous avons défini un certain nombre de facteurs qu'il serait intéressant de considérer comme des critères de délimitation des aires élémentaires en raison de leur action sur le bilan.

L'emploi simultané de tous ces facteurs comme critères de délimitation risque fort d'amener à une subdivision déséquilibrée, c'est-à-dire comportant des aires élémentaires très grandes à l'amont immédiat d'aires élémentaires minuscules, et d'une finesse excessive, c'est-à-dire comportant un nombre d'aires élémentaires dépassant largement les possibilités économiques d'utilisation d'un ordinateur puissant. De plus, il y aura vraisemblablement des interférences entre le tracé des limites entre zones caractérisées par des valeurs moyennes, différentes des critères. Ceci est évident pour les classes de pente et les indices géologiques superficiels, qui ne sont pas absolument indépendants l'un de l'autre : par exemple, les faibles pentes correspondent assez fréquemment à des terrains meubles, de plus en plus fins lorsque la pente décroît.

Il faut donc faire un choix et rechercher la limite d'approximation et de simplification acceptable dans cette délimitation.

Cette recherche comporte deux aspects :

1° - une élimination parmi les critères possibles, de ceux qui ont une action non contrastée sur les termes du bilan ;

2° - une élimination, par la suite, des irrégularités de tracé (indentation, digitation, enclaves), dont la prise en compte n'aurait pas des conséquences sensibles sur les termes du bilan.

1.3.7.1. Elimination de critères

La solution la plus commode, apparemment, mais qui n'est peut-être pas la plus significative, serait de ne retenir comme critère de découpage, que le chevelu des crêtes, comme pour les B. V. U. Il faudrait alors attribuer à chaque aire élémentaire des valeurs représentatives pour tous les facteurs (moyennes pondérées par exemple), déterminées en fonction de la répartition sur cette aire de surfaces caractérisées par des valeurs définies dans des échelles de valeurs possibles de ces divers facteurs. Or ces valeurs possibles sont déjà des moyennes ou des médianes représentatives d'intervalles réduits de variation de ces facteurs. Il faut donc réduire autant que possible cette procèdure de pondération.

L'influence de la pente moyenne sur les termes du bilan est progressive et continue. On peut donc concevoir aisément que la caractérisation d'une aire élémentaire par pondération de classes de pentes sera valable. On peut donc laisser de côté la pente moyenne comme critère de délimitation des aires élémentaires.

Parmi les autres critères morphologiques, l'altitude, l'exposition et d'ailleurs aussi la pente moyenne, jouent un rôle dans la définition de la frontière entre zones aménageables et zones non aménageables. Ces critères sont donc reliés au critère de finalité.

Le réseau hydrographique joue un rôle non négligeable et il pourrait être intéressant de le retenir comme critère de délimitation des aires élémentaires. Cependant la complexité du chevelu du réseau hydrographique sera telle, en toute généralité, que ce facteur risque d'être un critère peu commode et il faudra en limiter l'emploi. Dans certains cas et en particulier dans les plaines il pourra éventuellement constituer une frontière commode pour réduire les dimensions d'une trop grande surface caractérisées par des valeurs constantes des autres critères de délimitation. Il ne devra cependant être utilisé que s'il s'avère vraiment nécessaire.

En ce qui concerne les critères géologiques possibles, la pondération de deux indices géologiques superficiels n'aura aucune signification physique, à cause des discontinuités d'effet de ces indices sur les différents termes de bilan. Ceci est particulièrement clair si l'on songe que la pondération des indices représentatifs d'un karst et d'une argile d'une part, risque fort de s'exprimer par le même chiffre qu'une pondération d'éléments très différents, granite et sable, par exemple, d'autre part.

Par contre, l'influence des indices géologiques du sous-sol porte non plus sur le choix du mode d'aménagement, mais sur la quantité d'eau que l'on peut en extraire éventuellement. Leur influence est donc moindre et on peut admettre de les représenter valablement, soit par une moyenne pondérée, soit, par exemple, dans le cas où l'on aurait affaire sur une même aire élémentaire à deux indices très différents, à une expression explicite de la répartition des indices sur l'aire considérée. D'autre part, leur détermination est nécessairement plus approximative que celle des indices superficiels. Il est donc raisonnable de ne pas les retenir comme critères de délimitation des aires élémentaires.

Le critère de finalité permet de déterminer le type de dotations artificielles à attribuer éventuellement aux aires. Il est donc nécessaire de le retenir comme critère de délimitation des aires élémentaires. En ce qui

concerne la différenciation entre aires aménageables et aires de végétation naturelle, ceci est évident. La possibilité technico-économique d'aménagement agricole d'une zone donnée est déterminée par certains facteurs physiques, variables d'une région à l'autre en fonction de l'économie, et qui sont de natures diverses. Certains sont topographiques:

- au-delà d'une certaine altitude dans un cas d'exposition donné, la végétation est telle que sa mise en exploitation n'est plus rentable ;
- indépendamment de l'altitude et de l'exposition, le relief peut devenir trop violent pour que l'aménagement agricole soit rentable. Il y a donc une notion de pente limite d'aménagement. D'autres facteurs sont géologiques : certaines roches, par exemple les calcaires massifs en climat méditerranéen sont impropres à toute mise en exploitation agricole.

On pourrait aussi penser à des facteurs hydrogéologiques agronomiques et climatologiques, mais ceux-ci sont variables avec le temps et il serait peu commode de les prendre en considération.

Pour les aires hydrographiques, on peut se poser le problème de la taille et négliger celles qui sont trop petites pour que leur prise en compte ait sur le calcul une influence appréciable.

En ce qui concerne les aires urbaines et industrielles, c'est-à-dire les agglomérations non exclusivement agricoles, la surface joue un moindre rôle car on peut avoir des consommations très importantes sur des surfaces réduites, à cause de l'industrie en particulier. Les limites inférieures de 3 km^2 ou 10 km^2 ne sont pas valables en ce cas. Et il faut individualiser ces aires car les agglomérer aux aires aménageables ou de végétation naturelle adjacentes fausserait notablement le calcul de simulation. A la rigueur, on pourrait les ramener à un point, dans le cas d'agglomérations trop réduites, mais ceci ne peut être généralisé.

La décision doit être prise dans chaque cas concret.

En conclusion, pour la délimitation des aires élémentaires, les critères à retenir seront les suivants :

Critères morphologiques

- chevelu des crêtes
- éventuellement réseau hydrographique pour des raisons de commodité.

Critères géologiques

- indice géologique superficiel.

Critère de finalité

qui comprend en particulier les segments des lignes de niveau et limites entre zones de pentes moyennes différentes qui participent à la frontière entre zones aménageables et de végétation naturelle.

1.3.7.2. Nécessité d'une simplification des tracés de frontière

La superposition de ces diverses frontières risque fort, malgré l'essai de simplification ci-dessus, d'amener à une subdivision excessivement fine comportant un trop grand nombre d'aires élémentaires et où la définition de l'ordre des aires sera trop complexe. Il faut donc essayer de schématiser ces frontières. Cela peut se faire en utilisant un chevelu des crêtes aussi peu dense que possible, compte tenu des intersections entre frontières de zones caractérisées par l'indice géologique superficiel et le critère de finalité.

Mais ceci ne suffit peut-être pas et il faut aussi tenter de simplifier, dans les limites raisonnables, le tracé des frontières entre zones. Ceci impose que l'on néglige certaines zones de surface trop réduite, certaines indentations mineures des frontières.

On peut admettre, si l'on ne veut pas compromettre excessivement la précision du calcul de bilan, que, dans les superpositions des tracés des diverses zones d'indices géologiques superficiels ou de finalités distinctes, toute zone de superficie inférieure à un certain pourcentage de celle de la zone qui l'englobe peut lui être assimilée. On peut aussi de manière semblable, admettre que toute indentation, digitation ou enclave allongée dont la plus petite dimension est inférieure à une certaine limite (par exemple à la moitié de l'arête d'un carré de superficie égale au pourcentage limite défini ci-dessus de la surface minimale admissible des aires élémentaires) peut être selon sa situation et sa nature, soit négligée et assimilée à la surface qui l'entoure, soit ramenée à une ligne frontière entre deux aires élémentaires. Ces limites sont à définir dans chaque cas et varieront, dans une même région, d'une phase de l'étude à l'autre, en fonction de l'échelle topographique de travail. Ceci est examiné sur l'exemple thessalien (point 6.8.1.).

1.4. La méthode d'analyse

1.4.1. Méthodes d'analyse possibles

Dans le cadre de la subdivision, d'une part du cycle annuel d'établissement du bilan en pas de temps élémentaire, d'autre part du découpage de la région en B. V. U. et des B. V. U. en aires élémentaires, le bilan hydrologique et hydrogéologique sera établi par une méthode de cumul de bilans élémentaires dans l'espace et dans le temps. On attribuera pour chaque pas de temps à chaque aire élémentaire des valeurs représentatives :

- de ses caractères physiques constants tels que la classe de pente, l'altitude, l'exposition, les indices géologiques, etc. ;
- de caractères physiques variables selon le pas de temps, tels que les facteurs utiles climatologiques, hydrogéologiques et agronomiques ;
- des utilisations de l'eau par l'homme et qui interviendront sous forme de dotations directement paramétriques lors de l'étude préliminaire, et de dotations déduites d'aménagements paramétriques à partir de l'avant-projet.

Pour déterminer les valeurs représentatives des caractères physiques des aires élémentaires variables selon le pas de temps, on a le choix entre deux méthodes d'analyse et de traitement des valeurs expérimentales ponctuelles.

La première est la classique analyse statistique. On recherche la valeur moyenne de chaque série de mesures effectuées, et si nécessaire, les écarts-types, variances et fréquences probables d'occurrence des valeurs moyennes, extrêmes, et différant de la moyenne de plus ou moins l'écart-type.

La seconde est plus en accord avec la conception de modèle de simulation. Elle consiste à reconstituer les phénomènes sur la période passée, la plus longue possible et à obtenir ainsi une représentation aussi fidèle que possible des états passés et actuels de la région ; puis à projeter ces phénomènes sur l'avenir, par introduction de séquences possibles d'événements.

1.4.2. Choix de la méthode pour les calculs prospectifs

Il serait tentant de chercher à établir une simulation séquentielle des événements pour les calculs prospectifs de bilan de l'étude préliminaire. Cette méthode est à première vue plus séduisante, mais si l'on examine ses modalités d'application, on voit que ce n'est pas si simple (voir point 7.5 et chapitre 8, dans la 2e partie).

Lors de la collecte des résultats de mesure, pour une étude préliminaire ou même un avant-projet, on constate qu'il existe des lacunes importantes dans les séries chronologiques expérimentales, et si l'on veut utiliser la méthode d'analyse séquentielle, on est ramené au choix suivant :

- essayer de reconstituer des séries chronologiques complètes sur l'ensemble de la période d'observation effective la plus longue d'un facteur utile ;
- limiter la tentative de simulation séquentielle à une ou plusieurs périodes plus brèves, dont en particulier la période récente, pour lesquelles on dispose de plus de résultats ponctuels de mesures pour un plus grand nombre de facteurs utiles et de termes du bilan.

Dans le premier cas, on est amené à introduire des valeurs synthétiques aléatoires, pour combler les lacunes, c'est-à-dire des valeurs choisies en appliquant des lois de correspondances statistiques valables pour des distributions gaussiennes et en utilisant les tables de hasard. Cette procédure introduit de très grands risques d'erreurs, d'autant plus grands que les lacunes sont plus longues.

Dans le second cas, on ne peut plus prendre en considération certaines observations utiles effectuées dans le passé et peut-être interrompues pour des raisons souvent étrangères à la technique.

D'ailleurs lors de l'étude préliminaire on cherche à représenter des états d'exploitation moyens, ou correspondant à des probabilités d'occurrence donnée, selon le degré de régulation interannuelle des réserves d'eaux souterraines. Pour cela, il vaut mieux utiliser la méthode statistique assortie d'une étude probabilitaire. Cette méthode peut se décrire schématiquement comme suit :

a) détermination des valeurs moyennes des facteurs utiles et des termes du bilan mesurés, ainsi que des extrêmes et les écarts-types correspondants ;

b) détermination de la probabilité d'occurrence de la moyenne, des extrêmes et des valeurs intermédiaires ;

c) évaluation des volumes des réservoirs artificiels à prévoir si l'on veut être certain de disposer de telle ou telle proportion de la moyenne pendant une proportion acceptable du temps brut total ;

d) comparaison agro-socio-économique de plusieurs éventualités de constitutions de réserves, sur la base des bilans correspondants, établis en tenant compte des conséquences de l'aménagement des réserves superficielles sur les eaux souterraines.

Le schéma opérationnel est le même pour l'avant-projet et le projet, avec la différence que l'on peut disposer des résultats de mesures de plus de facteurs agissants et de termes du bilan et donc déterminer des relations plus correctes entre facteurs utiles et termes du bilan.

1.4.3. Choix de la méthode pour les calculs de réglage (voir point 7.5. et chapitre 8 dans la 2e partie)

Ici se pose un problème secondaire : par quelle méthode analytique de détermination et de traitement des valeurs ponctuelles peut-on déterminer puis ajuster les relations entre facteurs utiles et termes du bilan ?

On peut envisager d'utiliser la méthode statistique, puisque c'est elle qui a été retenue pour les calculs prospectifs du bilan devant servir de base à l'étude agro-socio-économique. Mais est-ce la meilleure solution ?

On dispose dans le cas général de mesures de la quantité totale des précipitations sur un grand nombre d'années en plusieurs stations, dispersées sur la région. Ensuite les résultats de mesures les plus abondants concernent la température de l'air, puis les mesures de débit des cours d'eau, et enfin, on peut disposer de quelques mesures non forcément synchrones du débit de certaines sources, de l'humidité de l'air, de l'agitation atmosphérique, de la température du sol, et même, d'intensité des précipitations, de différenciation entre neige, pluie et précipitations occultes, d'interception verticale et horizontale, d'absorption par le sol, d'évaporation, de transpiration, de répartition de l'eau dans le sol, etc.

Le problème est de chercher des relations entre tous ces termes. Dans ces relations il interviendra certainement d'autres éléments et facteurs que les résultats expérimentaux cités ci-dessus. Mais quels que soient ces éléments et facteurs, il faut que les résultats de mesures soient comparables entre eux, c'est-à-dire qu'ils soient représentatifs d'une même période.

On est tenté, à ce moment-là, d'utiliser la méthode séquentielle. Est-ce possible ?

On pourrait rechercher les pas de temps élémentaires pour lesquels un grand nombre et si possible tous les facteurs climatologiques, hydrogéologiques et agronomiques utiles ont été mesurés et établir les interrelations pour ces pas de temps.

Ceci suppose qu'à une époque donnée, on a décidé de mesurer tous ces facteurs utiles pour rechercher les inter-relations. Ce n'est pratiquement jamais le cas lors d'une étude préliminaire, si l'on entreprend cette dernière sans effectuer de mesures hydro-climatologiques complémentaires adaptées à la méthode. Les mesures de facteurs utiles sont dispersées dans le temps, au hasard d'études partielles qui ont pu aboutir ou non à des aménagements locaux et il ne faut pas compter trouver pour un ou plusieurs pas de temps élémentaires des ensembles assez complets de résultats de mesures, sauf peut-être dans le cas de relations directes, entre deux ou trois facteurs utiles, indépendamment des autres facteurs, et sur une surface réduite.

Alors la méthode séquentielle n'est pas forcément utilisable et il faudrait revenir à la méthode statistique. Mais alors la valeur des calculs de réglage devient très discutable et il vaut mieux procéder durant les reconnaissances à toutes les mesures utiles à un calcul de réglage correct. Nous examinerons ce point plus loin, sur l'exemple thessalien.

Dans le cas de l'avant-projet, puis du projet, on peut disposer de tous les facteurs utiles en un certain nombre de points significatifs parce qu'on l'a voulu. Utiliser la méthode séquentielle pour déterminer les relations entre les différents facteurs utiles sur une étendue déterminée devient plus aisé, ce qui permet de contrôler et, éventuellement de préciser les relations déterminées lors de l'étude préliminaire. On peut alors appliquer ces relations de manière générale aux valeurs statistiques considérées pour les calculs prospectifs du bilan. Ce choix est justifié, car les relations d'interdépendance sont plus précisément établies, donc plus sûres.

En conclusion, pour les trois phases de l'étude on devra utiliser la méthode statistique pour les calculs prospectifs du bilan, mais pour les calculs de réglage on aura avantage à utiliser la méthode séquentielle.

1.4.4. Choix de la méthode dans le cas des calculs d'orientation et de contrôle de l'exploitation

Enfin, dans le cas de l'utilisation des modèles hydrologiques et hydrogéologiques pour le management en cours d'exploitation, et dans les calculs prospectifs de management qui peuvent être exécutés lors du projet et même dès l'avant-projet, le problème n'est plus d'obtenir l'image d'un fonctionnement annuel moyen, mais de prévoir quel sera le comportement de la région aménagée selon un plan défini, durant un pas de temps donné dans un futur très proche. Les valeurs des facteurs utiles étant connues pour une série de pas de temps élémentaires passés, de manière continue jusqu'au moment présent.

La méthode séquentielle est ici préférable à la méthode statistique.

On suppose connu l'état des réserves au moment origine de l'intervalle chronologique durant lequel les facteurs utiles ont été déterminés pour chaque pas de temps. Dans le cas où ces réserves ne sont pas connues, l'étude statistique a permis de déterminer un certain nombre de valeurs possibles pour les réserves et on peut effectuer des calculs séquentiels en partant tour à tour de chacun de ces états des réserves. Un certain nombre de ces états devraient normalement s'éliminer pour des raisons d'incompatibilité avec les valeurs expérimentales des facteurs utiles dans les pas de temps de l'intervalle où des mesures ont été faites, ce qui permet probablement de limiter à un ou deux le nombre des états possibles des réserves à l'origine du calcul.

Cette première élimination effectuée par recherche des incompatibilités dans le temps passé récent, on peut supposer, dans les pas de temps élémentaires futurs immédiats, pour les facteurs utiles des valeurs arbitraires choisies dans l'éventail des valeurs possibles déterminées lors de l'étude statistique et auxquelles sont affectées des probabilités d'occurrence.

On arrive alors à simuler des situations futures possibles, ayant une probabilité connue d'occurrence. Ceci permet à l'autorité politique responsable, ou plus précisément à l'agence technique de gestion à laquelle l'autorité politique a vraisemblablement délégué ses pouvoirs, de prévoir les conséquences de telle ou telle possibilité hydrologique et hydrogéologique sur la production future immédiate et d'adapter l'action en conséquence.

Il est évident que plus on cherche à prolonger ce calcul séquentiel dans l'avenir, plus l'incertitude devient grande. Raisonnablement, il vaut mieux ne pas chercher à prévoir plus loin que deux ou trois pas de temps élémentaires en avant.

Malgré cette limitation, un tel calcul prévisionnel à court terme sera pratiquement très utile. En effet, il permettra entre autres de prévoir les productions d'été et d'automne dès la fin de l'hiver, et donc de programmer la transformation et la vente de ces productions.

1.4.5. L'homogénéisation des données dans le cas de l'analyse statistique

L'analyse séquentielle ne sera donc utilisée qu'à partir du moment où l'on disposera de séries complètes de valeurs expérimentales (ou directement déduites de valeurs expérimentales accessoires) des facteurs utiles pendant une durée satisfaisante (au minimum un an, mais si possible deux, trois et plus). Dans toute l'étude l'analyse statistique jouera un rôle plus important que l'analyse séquentielle.

Or, nous avons vu que lors de l'étude préliminaire, nous disposerons, dans la majorité des cas, de valeurs déduites de résultats expérimentaux pour un certain nombre de facteurs utiles durant des périodes différentes pour chacun de ces facteurs, et que pour de nombreux facteurs utiles non mesurés, nous devrions nous contenter d'évaluations analogiques basées sur les valeurs des facteurs utiles mesurés.

Pour qu'une utilisation statistique raisonnable de ces données soit possible, il est indispensable de les homogénéiser, c'est-à-dire de les rapporter à une même période de validité. L'homogénéisation portera sur des résultats expérimentaux ponctuels, qu'il faudra éventuellement utiliser pour les rapporter à des surfaces.

Les données expérimentales dont on disposera dans le cas général sont énumérées en 1.4.3. Cette liste assez complexe permet de prévoir que l'homogénéisation sera assez délicate.

Il faudra donc homogénéiser les valeurs de précipitations mesurées en diverses stations durant des périodes non identiques, puis homogénéiser entre elles les valeurs des températures de l'air et les rendre homogènes avec les précipitations. Le problème sera ensuite de déterminer des valeurs homogènes pour les autres facteurs.

Le principe d'action est simple. On doit rendre homogènes deux suites chronologiques discontinues de résultats expérimentaux relatifs, soit au même facteur en deux points différents, soit à deux facteurs différents, en deux points différents. Il faut donc rechercher la relation de correspondance éventuelle entre ces deux séries ou types de série pendant les fractions des intervalles de mesure commune au deux séries et extrapoler cette relation à une période globale de référence. L'action se décompose en plusieurs temps.

1° - Rassemblement et classement chronologique des données expérimentales rapportées si possible aux pas de temps élémentaires.

2° - Sélection de la série expérimentale la plus complète sur la période la plus longue possible, et adoption de cette période comme période de base de référence. Il est probable que cette série expérimentale de base sera une série de mesures de précipitations en une station, qui sera la station de base.

3° - Sélection des deux ou trois séries expérimentales les plus complètes sur les périodes les plus longues possible après la série de base et adoption de ces séries et ces stations comme bases secondaires. Il s'agira vraisemblablement aussi de mesures de précipitations.

4° - Recherche des relations de correspondance entre séries de la station de base et des bases secondaires, (détermination des fractions communes des intervalles de mesure, report sur un diagramme des points d'abscisses égales aux valeurs expérimentales de la station de base et d'ordonnées égales aux valeurs expéri-

mentales de la base secondaire considérée, détermination de la relation éventuelle telle que les points expérimentaux soient répartis selon une distribution gaussienne de part et d'autre de la courbe de correspondance).

5° - Détermination des valeurs statistiques homogènes correspondant à la station de base et aux bases secondaires.

6° - Reprise du cheminement 1° à 5° par les autres stations de mesure en les rapportant, soit directement à la station de base, soit à la base secondaire la plus proche.

Ce processus est classique pour les valeurs annuelles des précipitations et des températures. (GRISOLLET, GUILMET et ARLERY, 1962). Nous examinerons comment l'adapter aux valeurs représentatives des divers facteurs utiles pour les pas de temps élémentaires du calcul du bilan lors de l'étude de chacun de ces facteurs utiles.

CHAPITRE 2 - LE BILAN HYDROLOGIQUE ELEMENTAIRE

2.1. L'organigramme du bilan élémentaire

Le bilan hydrologique régional ou sub-régional sera obtenu par cumul en boule de neige de bilans de B. V. U. eux-mêmes résultant du cumul de bilans d'aires élémentaires. Le problème est donc ramené à l'étude du bilan de l'aire élémentaire.

Bien que nous ayons vu au chapitre 1 qu'il existait plusieurs types d'aires élémentaires, il est tentant de chercher à obtenir une représentation unique du bilan élémentaire, valable pour tous les types d'aires et dont certains termes prendront, en fonction du type d'aire, la valeur zéro.

De la définition du bilan (voir l'introduction) et d'une analyse qualitative des phénomènes, j'ai déduit l'organigramme du bilan élémentaire, de l'aire élémentaire d'ordre i, indiqué dans le tableau 2.1. Chaque rectangle de cet organigramme représente un terme du bilan. Ces termes interviennent à des degrés divers et ne sont peut-être pas tous utiles pour le calcul. Ils sont de plus indépendants et il est indispensable d'analyser cet organigramme.

2.2. Les termes des deux cheminements principaux

Sur l'organigramme on distingue immédiatement deux cheminements principaux, qui correspondent :

1° - au ruissellement superficiel,

2° - aux écoulements souterrains.

Il y a aussi des termes d'échange entre ces deux cheminements.

2.2.1. Termes affluents des deux cheminements principaux

En raison de la méthode de cumul des bilans élémentaires, les termes affluents des deux cheminements principaux sont supposés connus : ils sont la somme des termes affluents correspondants des aires élémentaires d'ordre i-1 adjacents à l'aire d'ordre i considérée. Ceci est évident pour le ruissellement superficiel. Pour les écoulements souterrains, comme rien n'interdit à ces écoulements d'aller dans un sens différent de l'écoulement superficiel, il est possible que certains termes effluents des aires élémentaires d'ordre i-1 soient négatifs. Ceci est un point délicat que seule une bonne connaissance des conditions géologiques et hydrogéologiques aux limites des aires élémentaires peut régler.

Mais nous considèrerons que quels que soient leurs signes, les termes effluents des aires élémentaires adjacentes d'ordre i-1 sont connus, car ils sont les résultats du pas d'ordre i-1 du cumul. En les groupant, on obtient les termes affluents à l'aire d'ordre i.

Ces termes affluents sont caractérisés par leurs quantités durant le pas de temps considéré et leurs points d'injection (pour le ruissellement) ou segments d'injection (pour les écoulements souterrains), à la frontière de l'aire élémentaire.

Ces termes affluents existent pour tous les types d'aires.

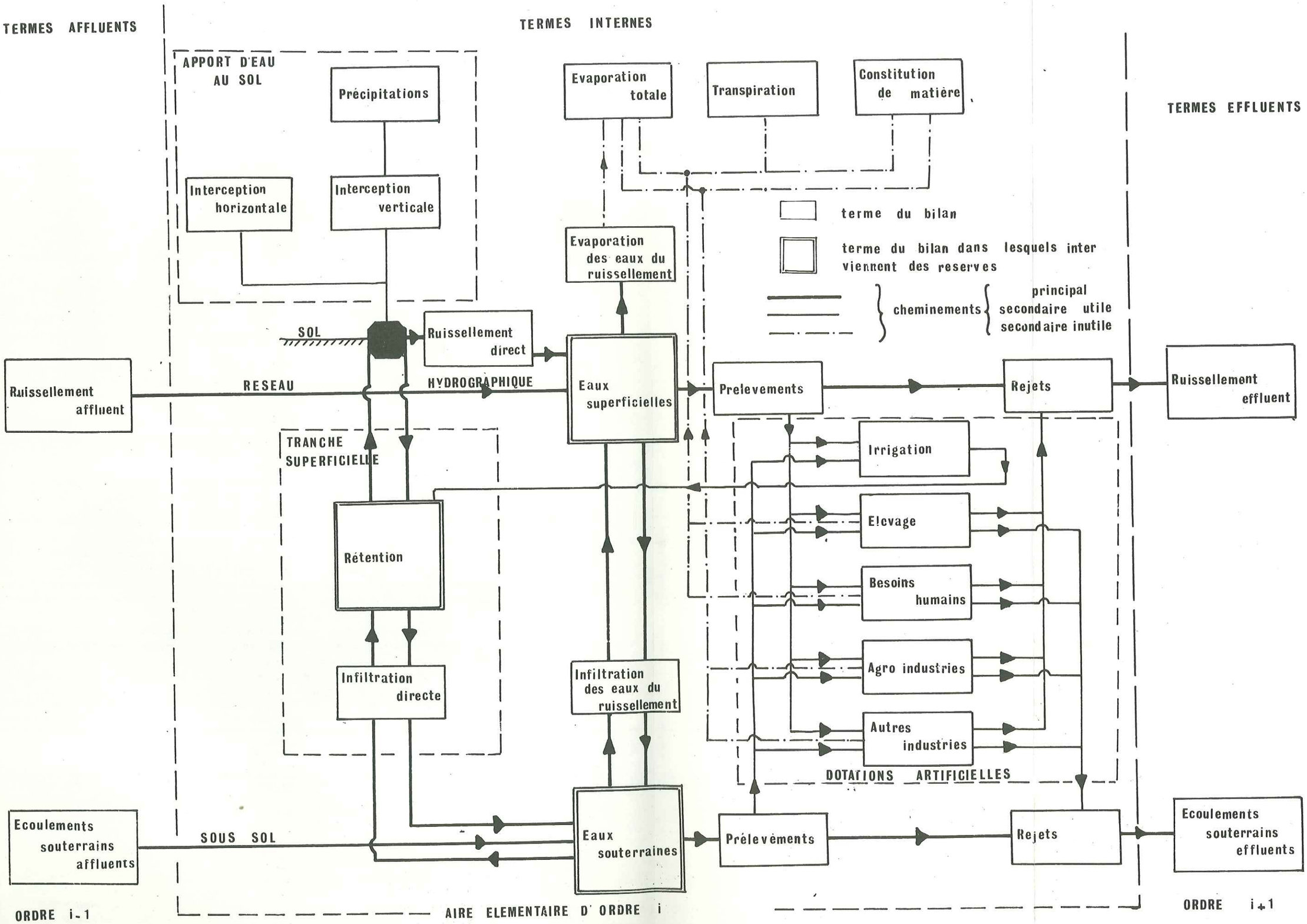
2.2.2. Termes effluents des deux cheminements principaux

La méthode de calcul par cumul impose que ces deux termes soient les inconnues lors du pas d'ordre i du calcul. Il faut donc déterminer les quantités effluentes et leurs points ou segments de sortie, en fonction des termes affluents et des termes internes et contrôler que ces termes effluents satisfont à certaines conditions de compatibilité (ou contrainte) à l'aval.

2.2.3. Termes internes des deux cheminements principaux. Schéma de leur mode d'évaluation

Ce sont les termes qui font directement partie de ces cheminements principaux à l'intérieur de l'aire élémentaire d'ordre i, et les termes d'échange entre ces deux cheminements, puisqu'ils ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Si ces termes principaux internes peuvent être déterminés sans avoir recours aux deux cheminements principaux, le problème du bilan de l'aire élémentaire d'ordre i est résolu.

TABLEAU 2.1 : Organigramme du bilan élémentaire



Il nous faut donc examiner plus en détail ces termes principaux internes et en particulier rechercher les autres termes du bilan et les facteurs physiques qui agissent sur eux. Il faudra ensuite étudier les autres termes du bilan, que nous appellerons termes secondaires, et en éliminer ceux qui sont inutiles. Pour les termes secondaires utiles; il faudra rechercher les facteurs physiques agissant de même manière que pour les termes principaux internes. Ceci fait, une sélection entre les facteurs agissants devra être faite, en fonction de l'importance de leur action, de leur indépendance d'autres facteurs, et de leurs possibilités pratiques d'évaluation. Il faudra alors rechercher des relations entre ces facteurs utiles sélectionnés et les termes du bilan à déterminer. Si cette procédure se révèle pratiquement possible, le problème du bilan sera résolu.

Il y a dans l'articulation des termes principaux internes selon les deux cheminements principaux de l'organigramme, un certain nombre de simplifications qu'il me faut justifier.

D'abord, j'ai considéré les termes Eaux Superficielles et Eaux Souterraines comme le total des eaux de surface ou souterraines disponibles durant le pas de temps dans l'aire élémentaire, avant utilisation. Or il y a utilisation, et donc prélèvement, tout au long du pas de temps, en même temps qu'il y a apport d'eau. La schématisation de l'organigramme ne rend pas compte de la simultanéité de ces deux actions. Mais cette schématisation est indispensable, car autrement le problème est inextricable. Elle n'introduit pas d'erreur excessive, et ceci d'autant moins que l'aire élémentaire est plus petite et le pas de temps plus court.

Ensuite, j'ai simplifié certains aspects du circuit de l'eau. Ainsi, j'ai évité de faire apparaître une relation directe entre les eaux superficielles et la rétention ; cette relation est souvent une réalité physique, au voisinage des cours d'eau. Mais on peut admettre que cette relation directe passe, ne fût-ce que pendant un temps très bref et sur des distances très courtes, par l'infiltration descendante du ruissellement, les eaux souterraines, puis l'infiltration directe remontante.

De même, je n'ai pas individualisé une évaporation du ruissellement direct. Cette évaporation fait partie de l'évaporation directe depuis le sol, que j'ai considérée comme une conséquence de la rétention. Il y a là une approximation acceptable, si l'on considère que le ruissellement direct n'a lieu que pendant une fraction souvent faible du pas de temps élémentaire.

2.2.4. Le mécanisme de la répartition de l'eau au contact du sol et dans la tranche superficielle

C'est la partie la plus complexe du circuit de l'eau.

L'eau atteignant le sol se répartit en ruissellement direct, qui aboutit au réseau hydrographique, et en rétention, qui communique avec les écoulements souterrains par l'infiltration directe.

2.2.4.1. Le ruissellement direct

Ce phénomène est très simple : l'eau coule à la surface du sol, ce qui est un spectacle ordinaire. Il s'applique à tous les types d'aires élémentaires, sauf aux aires hydrographiques.

Le ruissellement direct sur une aire élémentaire durant un pas de temps donné est la fraction de la quantité d'eau qui atteint le sol, la somme algébrique des précipitations, de l'interception verticale et horizontale et de la dotation pour l'irrigation et qui atteint le réseau hydrographique.

La fraction d'une quantité d'eau déterminée qui ruisselle directement, varie en fonction de certains facteurs agissants, topographiques, géologiques, hydrogéologiques et agronomiques.

Facteurs topographiques

1° - Le ruissellement direct sera d'autant plus fort que la distance entre point d'impact de l'eau tombée et le réseau hydrographique sera plus grande. La densité du réseau hydrographique sera donc un facteur agissant sur le ruissellement direct.

2° - Pour une qualité du sol et une végétation données, c'est-à-dire pour une résistance du sol à l'écoulement donnée, la tendance à l'écoulement variera avec la vitesse de ruissellement et donc avec la pente du sol. La pente sera donc un second facteur agissant.

Facteurs géologiques et hydrogéologiques

Pour une pente de sol et une végétation données, le ruissellement direct sera d'autant plus fort que le sol sera moins irrégulier, moins grossier, moins fissuré et que la teneur en eau du sol sera plus forte. Les facteurs géologiques susceptibles d'agir sont nombreux, et plutôt que de tous les énumérer, j'ai préféré les grouper sous une expression globale : "nature et disposition des terrains superficiels".

Le facteur hydrogéologique agissant sera la teneur en eau des terrains superficiels.

Facteurs agronomiques

Pour une pente et une nature de sol données, le ruissellement sera d'autant plus fort que la végétation, ne s'y opposera moins, c'est-à-dire qu'elle se composera d'espèces végétales moins touffues, plantées selon une densité plus faible, et dans un état de croissance (âge ou état saisonnier) qui amènera la végétation à un minimum de résistance au ruissellement.

Les facteurs agronomiques agissants sont donc :

- le type de végétation,
- la densité de la végétation,
- l'âge de cette végétation,
- la saison.

2.2.4.2. La rétention

La rétention dans une aire élémentaire durant un pas de temps donné représente la variation des réserves d'eau contenues dans la tranche superficielle de l'aire élémentaire durant ce pas de temps.

Elle n'existe pas dans le cas des aires hydrographiques.

Justification de la définition

Cette définition donnée dans le tableau 2.2.3. est différente de celle donnée par les manuels d'hydrogéologie (CASTANY, 1963, SCHOELLER, 1962, TODD, 1967). La rétention est déterminée par des phénomènes complexes, variables dans le temps à l'intérieur d'un même pas de temps, et dans l'espace sur une même aire élémentaire. Il sera très difficile, sinon impossible, de les distinguer les uns des autres dans le bilan, en raison de leur simultanéité occasionnelle et de leurs occurrences anarchiques.

Je n'ai pas maintenu la distinction entre les eaux pelliculaires, capillaires, gravifiques, hygroscopiques, zéolithiques, de rétention, angulaires ou cunéiformes (CASTANY, SCHOELLER). Ces expressions se recouvrent les unes les autres, et dans un même pas de temps, une molécule changera probablement plusieurs fois de dénomination selon la nomenclature ci-dessus. J'ai uniquement considéré l'eau non liée aux minéraux et aux grains constituant le sol, c'est-à-dire l'eau qui est susceptible de se déplacer dans le sol.

La rétention est liée à la notion de tranche superficielle qui peut être définie comme suit :

la tranche superficielle est la tranche comprise entre le niveau du sol et le niveau minimal possible de la nappe phréatique. Cette dernière est le lieu des points de la zone saturée du sous-sol où la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique. La tranche superficielle est une caractéristique de l'aire élémentaire. Elle n'est pas subdivisée en zone de saturation, frange capillaire, zone de rétention et zone d'évapotranspiration (CASTANY - 1963, TODD - 1967). En effet, la position des surfaces limitant ces diverses zones variera au cours d'un même pas de temps et d'ailleurs, on peut se demander si ces notions de tranches séparées par des niveaux définis correspondent à des réalités physiques.

La plupart des auteurs cités examinent la rétention sous un angle "microscopique" de relation entre grains constitutifs du sol et eau interstitielle et ce, de manière instantanée, sans introduire les fluctuations résultant de la durée du phénomène.

Je n'ai pas essayé de définir des équations représentant les transferts d'eau dans la tranche superficielle car ceci a été fait d'autre part (VACHAUD 1968). Une telle tentative impose tant de limitations et d'hypothèses simplificatrices que les applications possibles sont réduites, dans des problèmes de bilan régional et une procédure expérimentale sera préférable à une expression analytique.

Cependant, VACHAUD, dans sa conclusion, expose très clairement le problème : "Il est en premier lieu évident que la zone du sol non saturée, comprise entre la surface d'une nappe et la surface du sol, n'est pas, comme on l'a longtemps laissé entendre, une zone où l'eau s'est figée dans le sol ; c'est au contraire une zone de transferts permanents. Ces transferts sont conditionnés par des gradients de succion, de potentiel chimique, de température, de potentiel électrique. Ils sont loin d'être négligeables, car ils représentent la plus grande partie de l'alimentation en eau des plantes, et le plus souvent, le seul mode de recharge des nappes. Ces transferts interviennent enfin d'une façon très importante sur l'hydrodynamique des nappes souterraines, et il nous semble difficile de dissocier l'écoulement dans la zone saturée, décrit par l'équation de Laplace, de l'écoulement dans la zone non saturée".

Cette citation permet de comprendre pourquoi les définitions de la rétention données dans les manuels ne sont pas utilisables pratiquement dans un calcul de bilan. La complexité des phénomènes de rétention a amené généralement à ne pas la prendre en compte dans les calculs de bilan et à introduire une notion d'évapotranspiration réelle ou de déficit d'écoulement (en particulier L. TURC, 1954). Mais, outre que cette notion néglige l'eau de constitution de la matière, les bilans qui l'utilisent sont impropres d'après

TURC lui-même, à la prise en compte séparée du ruissellement, des eaux souterraines, et des prélèvements artificiels dans les bassins versants.

L'évapotranspiration potentielle est par définition une toute autre chose, et elle ne peut être utilisée pour des problèmes de bilan que pour la détermination des dotations agricoles nécessaires. D'autre part, l'évaporation et la transpiration n'interviennent qu'en troisième rang dans le bilan élémentaire, et proviennent de tant de termes que leur détermination sera impossible pratiquement.

D'où la nécessité du concept de rétention selon la définition ci-dessus.

Analyse du phénomène

Le mécanisme de la rétention a été décrit en détail par SCHOELLER (1962). L'analyse ci-dessous s'inspire de cette description. Elle s'en écarte cependant de façon notable. En effet, j'ai considéré les phénomènes sous l'angle des gradients tendant à faire varier la teneur en eau dans la tranche superficielle, sans retenir la notion de niveau pour les phénomènes qui se produisent dans la zone non saturée.

La rétention est la variation des stocks dans la tranche superficielle durant un pas de temps donné. Son bilan se traduira par des échanges aux frontières, c'est-à-dire à la surface du sol et à la surface inférieure de la tranche superficielle. On peut considérer ces échanges durant un pas de temps comme l'expression des conditions aux limites de variations de la répartition de l'eau dans la tranche superficielle durant ce pas de temps.

Les forces qui poussent l'eau absorbée vers le bas, dans la tranche superficielle à partir de la surface du sol sont :

- la pesanteur,
- la capillarité - si elle est notable dans le sol considéré - qui attire l'eau du plus humide vers le plus sec.

Les forces qui agissent sur les échanges entre l'eau souterraine et la tranche superficielle sont :

- la capillarité, dans les mêmes conditions que ci-dessus,
- la succion radiculaire de la végétation,
- la pesanteur, qui agit dans un sens opposé aux deux précédentes.

Il existe aussi des forces de freinage de l'alimentation descendante dans la tranche superficielle. Ce sont :

- le frottement de l'eau contre le terrain traversé,
- la contrepression de l'air contenu dans les terrains et sa tendance à s'échapper vers le haut.

Il peut, de plus, se produire des mouvements de direction générale indéterminée, causés par des phénomènes thermiques ou chimiques.

On peut ramener le mécanisme de la rétention à 5 schémas cas principaux (tableau 2.2.4.2.) Il peut évidemment se produire des cas intermédiaires. En particulier, lors du passage des cas 1.1. ou 2.1. au cas 2.3., les tendances descendantes de l'infiltration se poursuivent pendant un certain temps. Il y a alors une redistribution importante par drainage gravitaire.

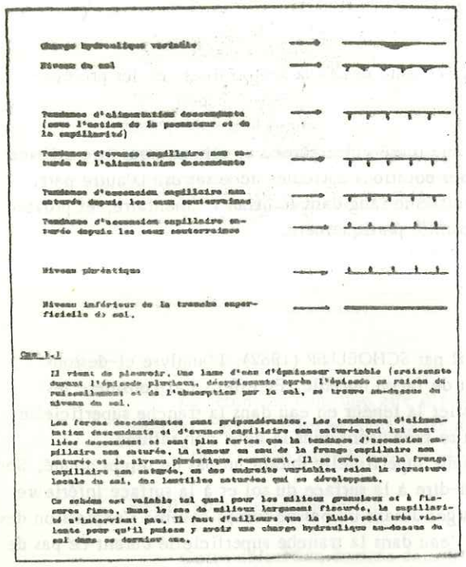
Ces cinq schémas représentent des événements de durée généralement réduite par rapport au pas de temps élémentaire. Ils peuvent se produire plusieurs fois avec des intensités diverses durant un pas de temps élémentaire quelconque (DAIANT et VACHAUD 1971). Ils ne sont donc utiles que pour une bonne compréhension qualitative du mécanisme de la rétention, et une recherche des facteurs agissants.

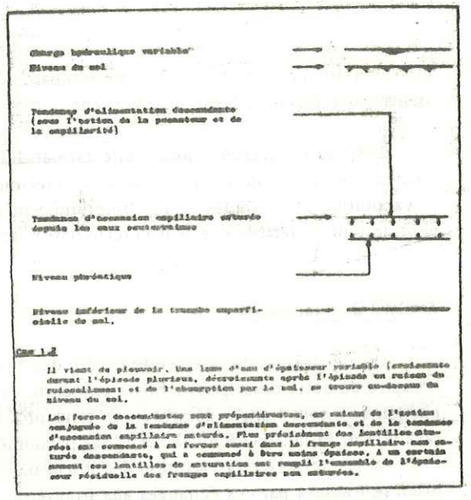
Dans ces schémas, je n'ai pas indiqué la succion radiculaire des plantes. Ceci pour des raisons de clarté. La succion radiculaire est une force négative dans le phénomène de rétention. Elle variera selon la saison et l'âge de la végétation, selon aussi les disponibilités en eau offertes aux racines ; car les plantes peuvent adapter leur prélèvement aux disponibilités et survivre, jusqu'à un certain niveau des disponibilités auquel correspond un flétrissement, puis la mort.

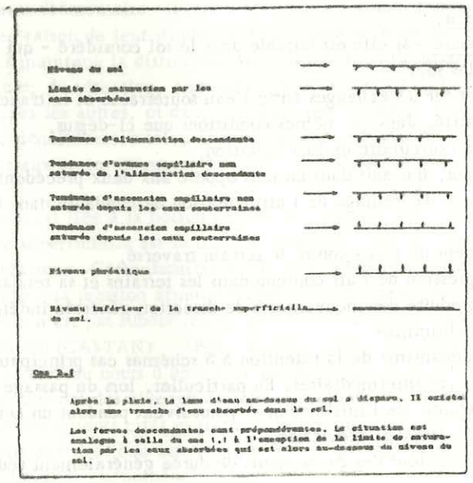
La succion radiculaire peut se produire en dessous de la tranche superficielle du sol (pour les phréatophytes). Il est préférable cependant de ne pas séparer cette succion radiculaire profonde de la rétention, pour des raisons de commodités de calcul. En effet, cette eau de succion radiculaire provenant des écoulements souterrains se comporte de manière analogue à l'eau d'ascension capillaire prélevée elle aussi sur les écoulements souterrains. Le mouvement est le même. Seuls les cheminements et la nature des forces de succion sont différentes.

Examinons maintenant les facteurs agissant sur la rétention. La rétention durant un pas de temps donné est prélevée sur la quantité d'eau atteignant le sol (somme des précipitations, des interceptions et de la dotation pour irrigation) qui ne ruisselle pas directement et de son intensité.

Les facteurs étaient d'origine topographique, géologique, hydrogéologique, agronomique et climatologique.







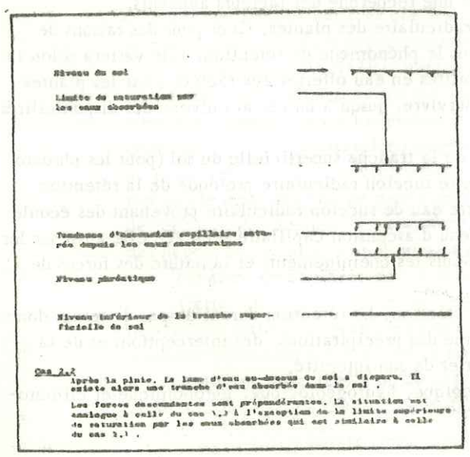
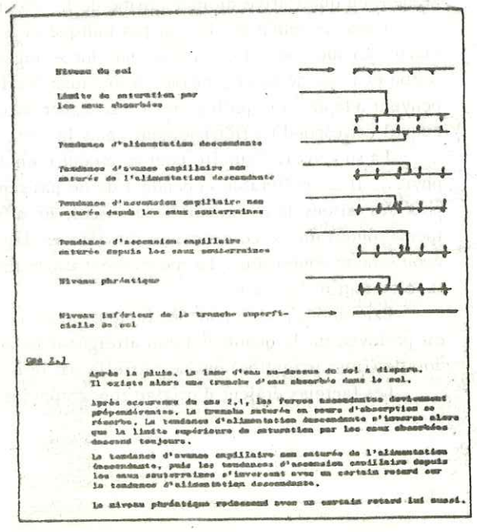


Tableau 2 - 2 - 4 - 2



Facteurs topographiques

Ce sont les mêmes que ceux qui agissent sur le ruissellement direct étant donnée la complémentarité des deux termes, au moment où l'eau météorique atteint le sol. Retenons donc pour mémoire :

- la densité du réseau hydrographique
- la pente du terrain.

Facteurs géologiques

L'absorption d'eau par le sol, et donc l'alimentation verticale descendante de la rétention, variera en raison inverse de la rugosité et de la fissuration du sol. Elle variera aussi en fonction de la granulométrie et de la compacité du sol constituant la tranche superficielle, s'il s'agit d'un sol meuble. Dans le cas d'un sol rocheux, les facteurs agissants seront la densité et la dimension des fissures. Une analyse plus fine du phénomène conduit à introduire le concept de courbe de succion pour caractériser la tranche superficielle. Cette courbe de succion est déterminable expérimentalement en laboratoire et représente de façon globale l'aptitude d'un sol à retenir l'eau interstitielle.

Nous désignerons les facteurs géologiques agissants, en attendant l'examen critique et le choix des facteurs utiles (chapitre 3), par l'expression globale suivante :

La nature et la disposition des terrains constituant la tranche superficielle.

Cette expression est la même que celle qui avait été adoptée pour le ruissellement direct, mais elle est étendue à l'ensemble de la tranche superficielle, et non plus limitée à la surface.

Facteurs hydrogéologiques

La rétention sur une aire élémentaire sera d'autant plus grande que la quantité d'eau retenue dans la tranche superficielle au début du pas de temps sera plus importante, c'est-à-dire que la teneur en eau de la partie non saturée sera plus grande, et la nappe sera plus proche de la surface du sol.

Il y a donc deux facteurs hydrogéologiques, qui sont la teneur en eau de la partie non saturée de la tranche superficielle du sol et la position de la nappe phréatique.

Facteurs agronomiques

La rétention dans une aire élémentaire, pendant un pas de temps donné, varie en fonction de la succion radiculaire, quelle que soit l'utilisation que les plantes font de cette eau après la succion (transpiration, constitution de matière). La végétation agit donc sur la rétention, car elle détermine le gradient de succion radiculaire.

Les facteurs agronomiques agissants seront donc, comme pour le ruissellement :

- le type de végétation (espèce),
- la densité de la végétation,
- l'âge de cette végétation.

Facteurs climatologiques

De manière analogue à ce qui a été dit pour la végétation et la succion radiculaire, le pouvoir évaporant de l'atmosphère conditionne le gradient d'ascension capillaire dans la tranche superficielle du sol. Les facteurs climatologiques agissants seront donc ceux qui permettent de définir le pouvoir évaporant de l'atmosphère, c'est-à-dire principalement :

- la température de l'air,
- l'humidité de l'air,
- l'agitation de l'atmosphère.

2.2.4.3. L'infiltration directe

L'infiltration directe dans une aire élémentaire, durant un pas de temps donné désigne les échanges entre les eaux souterraines et la rétention. Elle comprend donc des échanges descendants qui sont la transmission aux eaux souterraines de la fraction des eaux atteignant le sol, absorbée par la tranche superficielle et qui n'y est pas retenue. Elle comprend d'autre part des échanges ascendants qui traduisent la participation de la nappe phréatique à l'alimentation de la rétention.

L'infiltration directe durant un pas de temps déterminé aura donc probablement lieu tour à tour dans un sens vertical ascendant ou descendant (pour tout ce qui concerne la rétention et l'infiltration directe, on peut négliger les échanges latéraux aux frontières de l'aire élémentaire, car l'épaisseur de la tranche superficielle est négligeable par rapport à l'étendue de l'aire élémentaire).

Cette définition de l'infiltration directe est différente des définitions classiques de l'infiltration. Ces dernières impliquent en effet qu'il s'agit d'un mouvement vertical descendant de l'eau. Dans la définition actuelle, le sens descendant n'est pas obligatoire. A l'échelle des pas de temps adoptés, ceci me paraît justifié, car les échanges entre eaux souterraines et rétention se feront dans les deux sens. Il est commode de les désigner par un terme unique dans lequel le sens des échanges est laissé libre. L'infiltration directe n'a pas de signification pour les aires hydrographiques.

Les facteurs agissants directs sont d'ordre géologique et hydrogéologique.

Facteurs géologiques

L'infiltration directe descendante variera avec l'aptitude de la tranche superficielle à se drainer et la transmissivité de la tranche phréatique (tranche du sous-sol occupée par la nappe phréatique située au-dessous du niveau minimal que le sommet de cette nappe peut atteindre).

L'infiltration directe ascendante variera avec les possibilités d'ascension capillaire dans la tranche superficielle.

Les facteurs géologiques agissant directement seront donc les mêmes que ceux qui agissent sur la rétention. Ils se rapportent non seulement à la tranche superficielle, mais encore à la tranche phréatique. Pour le moment, je les désignerai par l'expression "nature et disposition des terrains" constituant ces deux tranches.

Facteurs hydrogéologiques

Il y en a deux, comme pour la rétention, et pour les mêmes raisons :
- la teneur en eau de la partie non saturée de la tranche superficielle,
- la position de la nappe phréatique.

2.2.5. La constitution des eaux superficielles

Le terme "eaux superficielles" désigne la variation des stocks d'eau de ruissellement durant le pas de temps dans l'aire élémentaire. Il joue dans le réseau hydrographique un rôle analogue à celui de la rétention dans la tranche superficielle. Il est lié aux termes suivants : ruissellement direct, évaporation des eaux de ruissellement, infiltration des eaux de ruissellement, prélèvements et rejets dans les eaux de ruissellement, ruissellement, effluent.

Le ruissellement direct a été examiné en 2.2.4.1. ci-dessus. Les prélèvements et rejets sont étudiés en même temps pour les écoulements de surface et les écoulements souterrains en 2.2.7. ci-dessous. Examinons les deux autres termes internes avant de chercher à définir les facteurs physiques agissant sur les eaux superficielles.

Ces termes ont une signification pour tous les types d'aires.

2.2.5.1. Evaporation des eaux de ruissellement

L'évaporation des eaux de ruissellement dans une aire élémentaire durant un pas de temps donné désigne la quantité d'eau qui se perd par évaporation à partir du réseau hydrographique. Ceci est le seul terme d'évaporation dans le bilan qui soit étudié expérimentalement et déterminable au moyen de lois physiques pratiquement formulées en toute généralité (ALBERTSON 1955).

La fraction d'une même quantité d'eau constitutive des écoulements superficiels qui s'évaporera dépend de facteurs agissants d'ordre topographique et climatologique.

Facteurs topographiques

Sur une aire élémentaire donnée, l'évaporation des eaux de ruissellement varie en fonction de la surface d'eaux libres dans l'aire. Nous retiendrons donc un facteur topographique

L'étendue du réseau hydrographique

Facteurs climatologiques

Ici comme pour la rétention, c'est le pouvoir évaporant de l'atmosphère qui joue. Les facteurs climatologiques agissants seront donc :
- la température de l'air
- l'humidité de l'air
- l'agitation de l'atmosphère

2.2.5.2. L'infiltration des eaux de ruissellement

L'infiltration des eaux de ruissellement dans une aire élémentaire durant un pas de temps donné désigne la quantité d'eau qui est échangée entre le réseau hydrographique et la nappe phréatique.

Ce terme relie les eaux superficielles et les eaux souterraines. Il joue un rôle à la frontière entre le réseau hydrographique et la tranche phréatique. De manière analogue à l'infiltration directe, l'infiltration des eaux de ruissellement durant un pas de temps déterminé comprendra en un même endroit des échanges dans les deux sens :
- perte du ruissellement vers les eaux souterraines (infiltrations proprement dites),
- apport aux eaux superficielles depuis les eaux souterraines (résurgences ou suintements).

De plus, dans une même aire élémentaire, les échanges peuvent avoir lieu simultanément dans les deux sens en des endroits différents de l'aire.

L'infiltration des eaux de ruissellement dépend de facteurs physiques caractérisant la tranche phréatique au voisinage du réseau hydrographique et la frontière entre la tranche phréatique et le réseau hydrographique. Ces facteurs agissants directs sont d'ordre topographique, géologique et hydrogéologique.

Facteurs topographiques

L'infiltration des eaux de ruissellement sera fonction de la surface des fonds de lit du réseau hydrographique et donc de :
- l'étendue du réseau hydrographique

Facteurs géologiques

L'infiltration des eaux de ruissellement, quel que soit son sens, sera fonction de l'aptitude de la tranche phréatique, au voisinage, et même assez loin, du réseau hydrographique, à permettre des circulations d'eau. Les facteurs géologiques agissant directement seront donc encore désignés ici, en attendant l'examen critique et le choix des facteurs utiles, par l'expression :

Nature et disposition des terrains constituant la tranche phréatique.

Facteurs hydrogéologiques

Le sens et l'intensité de l'infiltration des eaux de ruissellement seront fonction de la position de la nappe phréatique au voisinage du réseau hydrographique, par rapport au niveau de l'eau dans ce réseau hydrographique.

2.2.5.3. Les eaux superficielles

Ce terme est conditionné par des facteurs agissant directement d'ordre topographique. Les eaux superficielles à disposition sur une aire élémentaire durant un pas de temps déterminé seront d'autant plus importantes :
- que le réseau hydrographique sera plus étendu
- et que la pente longitudinale du réseau hydrographique sera plus faible, et donc l'écoulement plus lent.

2.2.6. La constitution des eaux souterraines

Le terme eaux souterraines dans une aire élémentaire durant un pas de temps donné désigne la variation des réserves d'eaux souterraines durant ce pas de temps.

Il joue dans le sous-sol un rôle analogue à celui de la rétention dans la tranche superficielle. En fait, on peut le considérer comme la somme des variations de réserves dans les diverses tranches constituant le

sous-sol (tranche phréatique et tranches superficielles). Il est lié aux termes suivants : infiltration directe, infiltration de ruissellement, écoulements souterrains affluents, prélèvements et rejets dans les eaux souterraines, écoulements souterrains effluents.

Les deux premiers de ces termes ont été étudiés en 2.2.4.3. et 2.2.5.2. Les écoulements souterrains affluents et effluents sont traités en 2.2.1. et 2.2.2. Les prélèvements et rejets sont étudiés en 2.2.7. ci-dessous. A part l'infiltration directe, qui n'a pas de signification dans les aires hydrographiques, ces termes sont définissables pour tous les types d'aire.

Les eaux souterraines dépendent d'un certain nombre de facteurs physiques agissant directement sans passer par l'intermédiaire d'autres termes du bilan. Ces termes sont d'ordre géologique et hydrogéologique.

Facteurs géologiques

Toutes autres conditions et facteurs égaux par ailleurs, les eaux souterraines disponibles sont fonction du volume de pores et de fissures du sous-sol. Pour évaluer le terme "eaux souterraines", il est donc nécessaire de connaître la nature géologique et la disposition des terrains constituant la tranche phréatique et les tranches sous-jacentes, que nous désignerons sous le nom de tranches profondes.

Facteurs hydrogéologiques

De même, les eaux souterraines disponibles seront d'autant plus abondantes qu'elles seront caractérisée par :

- un plus haut niveau phréatique,
- un plus haut niveau des nappes libres profondes,
- une plus forte artésianité ou sub-artésianité des nappes captives.

Nous retiendrons donc comme facteurs hydrogéologiques :

- le niveau des différentes nappes libres
- la charge hydrostatique des différentes nappes captives.

2.2.7. Les prélèvements et les rejets

Ces termes, pour une aire élémentaire et un pas de temps donné forment le total des quantités d'eau prélevées et rejetées en raison de l'utilisation de l'eau par l'homme. Ils sont situés à l'aval des cheminements principaux. Nous avons vu dans le tableau 2.2.3. qu'ils agissent directement sur les termes d'eaux superficielles et souterraines à l'amont. Ils sont liés par ailleurs aux termes secondaires de dotations artificielles.

Leurs répartitions entre eaux superficielles et eaux souterraines dépendent de facteurs agissant directement, qui font intervenir la notion d'intérêt du prélèvement ou du rejet. Examinons-les.

2.2.7.1. Prélèvements et rejets dans le ruissellement

Ces facteurs sont d'ordre topographique.

Il sera d'autant plus intéressant de prélever de l'eau dans le ruissellement que la distance entre point de prélèvement possible et surface d'utilisation sera plus faible que la dénivellation (positive si le niveau des surfaces d'utilisation est inférieur au niveau de prélèvement) sera plus importante, et que le terrain sera moins accidenté. Les relations sont analogues en ce qui concerne le rejet, à l'exception du fait que la dénivellation agit en sens opposé.

Nous retiendrons donc comme facteurs topographiques agissants :

- la distance d'adduction
- la pente du terrain entre points de prélèvement et d'utilisation.

2.2.7.2. Prélèvements et rejets dans les eaux souterraines

Ces facteurs sont d'ordre topographique, géologique et hydrogéologique.

Facteurs topographiques

Un prélèvement dans les eaux souterraines sera d'autant plus intéressant que la distance entre point de prélèvement et surface d'utilisation sera plus faible, que la dénivellation entre point de prélèvement et surface d'utilisation sera plus forte, et le terrain moins accidenté. Les relations sont analogues pour les

rejets, sauf que la dénivellation agira en sens opposé.

Comme pour les prélèvements dans le ruissellement, nous retiendrons comme facteurs topographiques agissants :

- la distance d'adduction,
- la pente du terrain entre points de prélèvement et d'utilisation.

Facteurs géologiques

Un prélèvement ou un rejet sera d'autant plus intéressant qu'il sera possible d'atteindre la (ou les) couche (s) perméable (s), productrice (s) ou receptrice (s), à une profondeur plus faible, et que ces couches seront susceptibles de fournir ou de recevoir l'eau plus aisément, et donc qu'elles auront un pourcentage de vides plus grand.

Nous désignerons donc encore ici les facteurs géologiques agissants par l'expression : "nature et disposition des terrains constituants" de la tranche phréatique et des tranches profondes, comme pour le terme d'eaux souterraines.

Facteurs hydrogéologiques

L'intérêt d'un prélèvement ou d'un rejet variera avec le niveau des nappes libres ou la charge hydrostatique des nappes captives dans lesquelles on veut prélever ou rejeter l'eau. Il variera aussi avec la qualité des eaux, c'est-à-dire leur composition chimique et bactériologique. Il faut insister ici sur le risque de contamination des eaux souterraines par des rejets inconsidérés, surtout à partir de l'industrie, car si la nature dispose, dans une certaine mesure, de moyens de purification bactériologique, elle est à peu près désarmée devant la contamination chimique.

Nous retiendrons donc comme facteurs hydrogéologiques agissants :

- le niveau des nappes libres
- la charge hydrostatique des nappes captives
- la composition chimique et bactériologique des eaux.

2.3. L'apport d'eau au sol

Dans l'analyse des termes des deux cheminements principaux, j'ai supposé que la fraction des eaux atteignant le sol était connue. Or, elle est le résultat de la combinaison de 4 termes du bilan : précipitations, interception verticale et interception horizontale, dotation artificielle pour irrigation. J'ai jugé préférable de séparer la dotation pour irrigation des trois autres termes, car il peut être choisi assez arbitrairement. Nous désignerons alors la combinaison de ces trois termes sous le nom de cheminement secondaire d'apport d'eau au sol.

Les inconnues de ce cheminement sont :

1° - la quantité d'eau arrivant au sol d'une aire élémentaire durant un pas de temps donné ;

2° - la manière d'arriver de cette eau (localisation, intensité...).

2.3.1. L'interception verticale

L'interception verticale dans une aire élémentaire donnée durant un pas de temps donné désigne la quantité d'eau fonction de précipitations, qui n'atteint pas le sol, c'est-à-dire qui peut être emmagasinée par le feuillage de la végétation durant les épisodes pluvieux, qui s'évapore durant les épisodes pluvieux et qui ne tombe pas sur le sol, soit en gouttes, soit en s'écoulant le long des tiges (stem-flow)

Ce terme a une signification pour tous les types d'aires sauf les aires hydrographiques. Il est soustractif : la végétation empêche une certaine partie des précipitations d'atteindre le sol. Le phénomène a été étudié par de nombreux auteurs, et en particulier MORTON (1919), WILM et NIEDERHOF (1941), KITTREDGE (1948), EIDMAN (1959), DELFS et al. (1958) PEREIRA (1952) et PENMAN (1963). Sans entrer dans une analyse détaillée des ouvrages et communications de ces auteurs, il est possible de définir les facteurs physiques agissant sur l'interception verticale. Ils sont d'ordre agronomique et climatologique.

Facteurs agronomiques

L'interception verticale varie selon l'espèce végétale interceptante, car la foliation est différente et la rugosité des tiges ou des troncs aussi, ce qui amène la capacité d'emmagasinement par les feuilles et le

stem-flow (1) à être différents. Elle varie aussi selon l'âge de la végétation, pour les arbres, les arbustes et les plantes pérennes, et selon la saison, car selon l'identité de ce dernier facteur, le stade de foliation est différent (c'est évident pour les arbres feuillus, mais vrai aussi pour les autres types de végétation pérenne ; c'est aussi évident pour les cultures et végétations saisonnières). Elle varie aussi, évidemment selon la densité de la végétation.

Nous retiendrons donc ces 4 facteurs comme facteurs agronomiques agissants.

Facteurs climatologiques

L'interception verticale varie en fonction des précipitations et du pouvoir évaporant de l'atmosphère durant les épisodes pluvieux et immédiatement après. Le pourcentage d'interception verticale décroît lorsque la quantité totale précipitée croît, depuis 100 % environ pour les averses ne suffisant pas à saturer la capacité de stockage de la végétation, jusqu'à une valeur quasi constante, variant de 10 à 40 % selon les caractéristiques de la végétation (dans le cas d'une couverture forestière). L'interception des précipitations mensuelles ou saisonnières varie en fonction de la distribution des précipitations (intensité, type) (KITTREDGE 1948).

Le stem-flow varie de 1 à 16 % et croît avec l'intensité et la quantité des précipitations (KITTREDGE 1948). D'après PENMAN, qui cite des expériences de ROWE et HENDRIX (1951), l'interception serait du même ordre, qu'il s'agisse de neige ou de pluie ; ceci n'est cependant pas certain de manière générale, et nous pouvons retenir comme facteurs agissants représentatifs des précipitations :

- quantité de pluie,
- intensité de chute de la pluie,
- quantité de neige,
- intensité de chute de la neige.

L'évaporation durant et immédiatement après l'épisode pluvieux est caractérisée, comme déjà dit au sujet de la rétention par :

- les températures de l'air,
- l'humidité de l'air,
- l'agitation de l'atmosphère.

2.3.2. L'interception horizontale

L'interception horizontale dans une aire élémentaire pendant un pas de temps donné est la quantité d'eau capturée (condensation) par la végétation dans le brouillard et les nuages en altitude et qui atteint le sol, soit en gouttes, soit en s'écoulant le long des tiges. Ce terme a une signification pour tous les types d'aires sauf les aires hydrographiques. Il est additif et pourrait aussi bien être considéré comme un terme affluent, ainsi d'ailleurs que les précipitations. La végétation et le sol nu provoquent le dépôt d'une partie de l'eau des nuages ou du brouillard, qui est ainsi interceptée et vient s'ajouter aux précipitations. Le phénomène a été étudié par de nombreux auteurs, et en particulier KITTREDGE (1948) et PENMAN (1963).

Ici aussi, comme pour l'interception verticale, il est possible de définir les facteurs physiques agissants. Ils sont d'ordre agronomique et climatologique.

Facteurs agronomiques

L'interception horizontale croît avec la hauteur des arbres et la projection sur un plan vertical de la surface du feuillage. Elle varie aussi en fonction du rapport des surfaces du feuillage et du sol, et avec la densité de la végétation. Ceci nous amène à retenir comme facteurs agissants les 4 facteurs déjà cités pour l'interception verticale:

- espèce végétale interceptante,
- âge de la végétation,
- saison,
- densité de la végétation.

Facteurs climatologiques

L'interception horizontale est fonction de la nébulosité, et du sens et de l'intensité du vent, et nous retiendrons ces deux facteurs comme facteurs agissants.

---

(1) - Ce terme désigne l'écoulement le long des tiges des plantes.

2.3.3. Les précipitations

De l'analyse des interceptions verticale et horizontale, on peut déduire quelles sont les grandeurs caractérisant les précipitations qui sont utiles pour le calcul du bilan. Ce sont :

- la quantité de pluie (et de grêle),
- l'intensité de chute de la pluie (et de la grêle),
- la quantité de neige,
- l'intensité de chute de la neige.

On pourrait être tenté d'y ajouter le moment de fonte de la neige, qui joue un grand rôle dans la répartition des eaux atteignant le sol en ruissellement et absorption par le sol ; mais cette caractéristique climatique relève plus de la température de l'air que des précipitations proprement dites.

2.4. Les dotations artificielles

La connaissance de ces termes est indispensable pour que l'on puisse évaluer les prélèvements et les rejets, dans les eaux de surface et souterraines. Il faut d'autre part connaître la dotation pour irrigation si l'on veut évaluer la rétention. Les facteurs agissant sur ces termes sont de nature fondamentalement différente des termes examinés ci-dessus, car ils traduisent directement l'intervention de l'homme dans la région. Ils sont en fait les vraies inconnues du problème, car c'est leur connaissance qui permettra de projeter un aménagement. Pourtant, si nous essayons de les considérer comme des inconnues, dans les cheminements du bilan, le problème est insoluble. Ceci amène à les considérer plutôt comme des paramètres, qui doivent être choisis avec un certain arbitraire dans des intervalles limités par zéro (ou un minimum plausible) et une valeur maximale concevable.

Le problème pour ces dotations artificielles n'est donc plus de déterminer les facteurs physiques agissants, mais de définir les limites des intervalles dans lesquels on peut choisir des dotations arbitraires, et d'étudier les interdépendances éventuelles entre dotations de natures diverses. Ensuite, interviennent des conditions de compatibilité, aux limites de l'aire élémentaire d'abord, puis plus bas, dans la procédure cumulative du calcul. Ceci permettra, en cours de calcul, d'éliminer un certain nombre d'ensembles de dotations et de ne retenir que ceux qui sont possibles. C'est entre ceux-ci qu'il faudra alors faire un choix agro-socio-économique.

Les intervalles dans lesquels on peut choisir arbitrairement les dotations, seront de plus en plus étroits au fur et à mesure que l'on avancera dans l'étude. Lors de l'étude préliminaire où rien n'est défini dans l'aménagement à étudier, lors des phases ultérieures de l'étude par contre, le problème est d'ajuster les prévisions résultant de l'étude préliminaire à la connaissance plus précise des possibilités hydrologiques et hydrogéologiques de la région. Lors de l'étude préliminaire, on devra donc attribuer des dotations paramétriques aux aires élémentaires et chercher à respecter les conditions de compatibilité dans le calcul cumulatif du bilan.

Le processus pour l'avant-projet et le projet est inverse. Les cultures, les élevages et les agro-industries de transformation sont définis. Pour chaque aire élémentaire, une répartition a été déterminée, à laquelle correspond la dotation optimale choisie pour l'irrigation, l'élevage, l'agro-industrie, etc.. Il ne doit plus être question alors de changer le choix des types de cultures, d'élevages et d'agro-industries. Par contre, on peut changer leur répartition sur l'aire élémentaire, en fonction des connaissances plus précises des possibilités hydrologiques et hydrogéologiques. Ceci doit se faire de manière à ce que les conditions d'écoulement aux frontières de chaque B. V. U. restent identiques à celles qui avaient été déterminées lors de l'étude préliminaire. Ainsi, on ne déséquilibrera pas le bilan d'avant-projet par rapport au bilan d'étude préliminaire, ce qui est indispensable si l'on veut que l'étude agro-socio-économique reste valable. Cette condition impose déjà une grande précision dans le calcul du bilan de l'étude préliminaire.

Le problème des dotations arbitraires est donc limité à la phase d'étude préliminaire. J'ai rassemblé dans le tableau 2.4. les conditions de détermination des limites des intervalles de valeurs plausibles pour les termes d'utilisation humaine lors de l'étude préliminaire.

Il n'y a en réalité que deux choix arbitraires :

1° - celui de la dotation pour irrigation. Les intervalles de valeurs plausibles pour la dotation d'élevage dépendent de la valeur adoptée pour l'irrigation ; puis l'intervalle de dotations agro-industriel dépend des deux dotations choisies pour l'irrigation et l'élevage. De même la dotation pour besoins humains dans les aires agricoles et de végétation naturelle ;

2° - celui de la dotation pour les autres industries.

La dotation pour les besoins humains dans les aires urbaines et industrielles dépend de toutes les autres dotations. La marge arbitraire y est donc plus réduite que pour les autres dotations.

TABLEAU 2.4.

CONDITIONS DE DELIMITATION DES INTERVALLES DE VALEURS PLAUSIBLES POUR LES TERMES D'UTILISATION HUMAINE

(étude préliminaire)

Terme	Définition	Aires d'application	Autres termes agissants	Limites de l'intervalle de choix paramétrique		Remarques
				Inférieure	Supérieure	
Irrigation	Dotation d'appoint artificiel à la végétation	Agricole	Aucun	Zéro	Valeur de l'ETP[1] calculée pour la surface cultivable nette de l'aire élémentaire et rapportée à sa surface totale	Les valeurs arbitraires différeront d'un événement constant, fraction de l'étendue de l'intervalle choisi arbitrairement pour des raisons de commodité (facteurs agissants : climat). Ce terme intervient en premier lieu.
Elevage	Dotation d'alimentation du bétail	Végétation naturelle Agricole dans certains cas (non irrigation)	Aucun	Zéro	Consommation par tête de bovin ou d'ovin multipliée par capacité possible de l'aire	Elevage extensif - La nature de l'aire (climat, végétation), permettra de choisir le type d'élevage possible (bovin, ovin, etc.) et d'évaluer la capacité correspondante de l'aire.
		Agricole	Irrigation	Zéro	Consommation par tête, multipliée par la capacité de production animale qui correspond à l'utilisation totale de la dotation agricole pour les cultures fourragères	Elevage intensif - En fait la consommation peut dépasser cette limite supérieure, dans le cas d'utilisation de suppléments alimentaires venant d'ailleurs. Sauf cas particulier, il y a cependant peu de chances que ce soit le cas
Agro-industrie	Dotation nécessaire pour la transformation des produits agricoles des aires voisines (à l'exception de produits venant d'autres zones de la région, ou de l'extérieur)	Aires urbaines et industrielles	Aucun	Zéro	Besoins en eau pour la transformation la plus consommatrice possible des productions pouvant résulter au mieux des dotations pour l'irrigation et l'élevage des aires élémentaires situées dans la zone d'influence de l'aire	Il est nécessaire de définir le rayon d'influence de l'aire urbaine et industrielle considérée, et, en première approximation, les productions dont la transformation industrielle est la plus consommatrice possible, qui sont compatibles avec les conditions climatiques de la région.
Autres industries	Dotation pour l'industrie autre que l'agro-industrie définie ci-dessus	Urbaines et industrielles. Agricoles et de végétation naturelle, dans le cas d'exploitations minières en cours	Aucun	Consommation actuelle	Evaluation assez arbitraire résultant de l'analyse de l'état actuel et d'une estimation de l'évolution possible de cette situation	Limites délicates à évaluer. A ne pas surestimer. Il faut une enquête rapide mais précise sur l'état actuel et l'évolution prévue. A priori, on ne peut dire quelle sera la limite supérieure et la limite inférieure.
Besoins humains		Agricoles De végétation naturelle	Irrigation Elevage	Consommation actuelle globale (y compris services publics hôtellerie, etc.) multipliée par population actuelle	Consommation cible globale (y compris services publics, hôtellerie, etc.) multipliée par la population nécessaire pour assurer la production agricole et animale correspondant aux dotations d'irrigation et d'élevage, qui demande le plus de main d'œuvre.	Une étude rapide agro-socio-économique permet de fixer ces limites en fonction de données standard. A priori, on ne peut dire laquelle de ces deux limites sera l'inférieure et laquelle sera la supérieure, car on peut envisager une augmentation de la consommation et une diminution de la population.
		Urbaines et industrielles	Agro-industries Autres industries	Consommation actuelle globale par habitant (y compris services publics, hôtellerie, parcs et espaces verts, etc.) multipliée par population actuelle	Consommation cible globale par habitant (y compris services publics, hôtellerie, parcs et espaces verts, etc.) multipliée par population cible maximale	Ces limites doivent être définies au moyen d'une enquête rapide socio-urbanistique.

(1) - ETP = Evapotranspiration potentielle

Ces termes sont déterminables en faisant appel à des descriptions tout autres que la géologie et l'hydrogéologie. Les procédés de détermination sont assez aisés à concevoir et automatisables selon des méthodes classiques. Je n'insiste donc pas sur cet aspect du problème dans la suite de l'exposé.

2.5. Autres termes secondaires du bilan

Nous avons examiné les termes constitutifs des cheminements principaux, du cheminement d'apport au sol et de l'ensemble des utilisations humaines. Il reste 3 termes de l'organigramme que nous n'avons pas encore cités :

- évaporation,
- transpiration,
- constitution de matière.

Généralement,le troisième de ces termes est négligé et on introduit les deux premiers dans le bilan sous le nom d'évapotranspiration, que certains appellent aussi déficit d'écoulement (TURC, 1954). Il n'est d'ailleurs que de se reporter à la thèse de TURC pour voir que ce terme n'est ni représentatif, ni utile dans les cas où :

- la variation des réserves d'eaux souterraines n'est pas négligeable,
- le pas de temps est inférieur à l'année,
- les précipitations occultes ne sont pas négligeables (interception horizontale),
- les prélèvements artificiels ne sont pas négligeables.

Autrement dit, la notion d'évapotranspiration ou de déficit d'écoulement est inapplicable dans le cadre de la présente étude.

On pourrait alors essayer de maintenir ces trois termes séparés et les évaluer. Mais ce n'est absolument pas nécessaire, étant donné que les termes des cheminements principaux peuvent être déterminés sans les faire intervenir. Tout au plus pourraient-ils être considérés comme éléments de contrôle. Mais quand on considère la complexité et la multiplicité de leurs origines, je crois qu'il vaut mieux ne pas en tenir compte dans le calcul.

Ces trois autres termes secondaires seront donc laissés de côté dans la suite de l'exposé.

CHAPITRE 3 - LES FACTEURS UTILES POUR LA DETERMINATION DES TERMES DU BILAN

3.1. Introduction

Nous avons donc analysé l'organigramme du bilan élémentaire et défini les facteurs physiques agissant sur les différents termes utiles du bilan hydrologique élémentaire. Théoriquement, si nous connaissons les valeurs de ces facteurs pour chaque aire élémentaire et chaque pas de temps et les lois de correspondance physique entre ces facteurs et les termes du bilan, le problème est résolu.

Il est malheureusement impossible de déterminer tous ces facteurs. D'autre part, même si nous les connaissions tous, nous aboutirions à des lois de correspondance extrêmement complexes, qui prendraient la forme de fonctions de plusieurs variables, non forcément indépendantes les unes des autres.

Il faut donc faire une sélection parmi les facteurs agissants selon des critères simples :

1° - leur possibilité de détermination lors de la phase d'étude considérée ;
2° - l'importance de leur action sur les termes envisagés ;
3° - leur indépendance d'autres facteurs ou leur degré de prépondérance sur d'autres facteurs agissants.

Après cette sélection, il faut définir les correspondances entre facteurs utiles et termes du bilan, selon des critères de commodité et de précision minimale à respecter.

Les facteurs agissants ont été déjà classés selon leur genre. Nous avons distingué les genres suivants :

- topographique
- géologique
- hydrogéologique
- agronomique
- climatologique.

Nous allons donc les examiner dans cet ordre.

3.2 Facteurs topographiques

3.2.1. Récapitulation des facteurs agissants - Choix des facteurs utiles

Dans le tableau 3.2.1., j'ai récapitulé les divers facteurs topographiques agissants qui ont été isolés au chapitre 2. Les définitions de ces facteurs, qui n'avaient pas été données alors, le sont dans le tableau. Elles sont valables pour une aire élémentaire donnée durant un pas de temps donné. Puis sont indiqués les termes sur lesquels ces facteurs agissent, les modes possibles de détermination, l'importance de l'action, et la dépendance éventuelle d'autres facteurs.

De ce tableau, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

1° - La pente moyenne du terrain est aisément déterminable par des procédés graphiques automatisables. Cette subdivision introduit arbitrairement une certaine discontinuité dans un phénomène qui, en fait varie de manière continue, mais ceci est difficilement évitable.

2° - En ce qui concerne les facteurs agissants qui relèvent du réseau hydrographique, les deux premiers, c'est-à-dire la densité et l'étendue, peuvent être ramenés à un seul facteur.

En effet, l'étendue et la densité du réseau hydrographique sont liées l'une à l'autre par un facteur constant qui est la surface totale de l'aire élémentaire.

On pourrait donc ne retenir comme facteur utile que l'un de ces deux facteurs, par exemple la densité du réseau hydrographique, qui offre l'avantage d'être adimensionnel.

Mais il n'est pas commode de déterminer la densité du réseau hydrographique telle qu'elle est définie dans le tableau 3.2.1. En effet, d'un pas de temps à l'autre, l'état hydrologique moyen varie, en fonction de l'état de l'aire élémentaire au début du pas de temps considéré, et de tous les échanges indiqués dans l'organigramme du bilan, et donc toutes autres choses égales, par ailleurs, des événements climatiques. Il varie aussi en fonction des prélèvements qui, même s'ils sont placés artificiellement vers l'aval de l'organigramme, auront une influence sur les volumes d'eau présents dans le réseau durant le pas de temps, et donc sur l'étendue et la profondeur d'eau. Nous aboutissons donc à une impasse, ou du moins à la nécessité

TABLEAU 3.2.1

Facteurs topographiques agissants			Termes sur lesquels ils agissent	Modes possibles de détermination		Dépendance d'autres facteurs	Remarques
Localisation	Facteur	Définition		Etude préliminaire	Phase ultérieure		
Réseau hydrographique	Densité	Rapport entre la surface du réseau hydrographique et la surface totale de l'aire élémentaire	Ruissellement direct Rétention	Ce facteur est déduit directement de la mesure de l'étendue du réseau hydrographique et de celle de la surface de l'aire élémentaire		Géologie superficielle, climat et pente moyenne du terrain	Ce facteur n'est pas indépendant. Il n'est cependant pas certain qu'il soit possible et commode de le laisser de côté et de ne prendre en compte que ses facteurs déterminants (ce qui reviendrait à ne tenir compte de la densité du réseau hydrographique que de manière implicite)
Réseau hydrographique	Etendue	Surface du réseau hydrographique dans l'aire élémentaire	Evaporation de ruissellement Infiltration de ruissellement Eaux superficielles	On peut envisager une mesure directe sur cartes, mais ceci interdit de pouvoir tenir compte des variations de cette étendue en fonction du pas de temps considéré. Cette mesure directe est donc toujours très approximative		Géologie superficielle, climat et pente moyenne du terrain	Ce facteur est assimilable par un simple rapport avec la surface totale de l'aire élémentaire, à la densité du réseau hydrographique. Il n'est donc pas nécessaire de le maintenir en considération tel quel.
Réseau hydrographique	Profondeur d'eau	Profondeur moyenne de l'eau dans le réseau hydrographique	Infiltration du ruissellement Eaux superficielles	Détermination pratique très malaisée		Pour une aire élémentaire donnée, à une profondeur d'eau donnée correspondra une étendue du réseau hydrographique et une seule	Facteur de détermination très malcommode et qui peut être remplacé par la prise en compte de l'étendue, ou de la densité du réseau hydrographique (ou des facteurs déterminants de ces derniers)
Réseau hydrographique	Pente longitudinale	Pente longitudinale moyenne des cours d'eau constituant le réseau hydrographique	Eaux superficielles	Peut être mesurée par les principaux cours d'eau. Introduction de la notion de moyenne très délicate		Pente moyenne du terrain	On peut remplacer ce facteur par la pente moyenne du terrain, qui l'exprime alors implicitement.
Terrain	Pente moyenne	Pente moyenne du terrain de l'aire élémentaire	Ruissellement direct Rétention	Peut être mesurée directement sur cartes. Ce facteur, indépendant du temps a déjà été retenu comme critère de délimitation des aires élémentaires		Facteur indépendant de tous autres facteurs même si au fond il est lié par des relations complexes à la géologie et au climat (actuel ou passé)	Facteur utile, pouvant traduire implicitement l'action des facteurs caractérisant le réseau hydrographique (densité, étendue, profondeur d'eau, pente longitudinale.
Terrain	Distance d'adduction	Distance entre point de prélèvement et point d'utilisation des eaux superficielles ou souterraines	Prélèvements dans les eaux superficielles --- Prélèvements dans les eaux souterraines	Déterminable cas par cas	Déterminable cas par cas	Etendue du réseau hydrographique et surface de l'aire --- Résultats de l'étude hydrographique	Facteur intervenant dans le classement par ordre d'intérêt des solutions possibles Jouera un rôle dans le modèle agro-socio-économique plutôt que dans le bilan
Terrain	Pente du terrain entre points de prélèvement et d'utilisation	Découle directement de la désignation	Prélèvements dans les eaux superficielles et souterraines	Déterminable cas par cas	Déterminable cas par cas	Distance d'adduction et pente moyenne du terrain	Facteur pris en compte implicitement dans la pente moyenne du terrain et la distance d'adduction.

d'une approximation assez grossière, consistant par exemple à attribuer une largeur évaluée assez arbitrairement au réseau hydrographique pour chaque pas de temps. Mais la densité du réseau hydrographique n'est pas un facteur indépendant et nous pouvons envisager de le remplacer par d'autres facteurs plus commodes.

Une première idée serait de ne pas en tenir compte et de le considérer comme implicitement représenté par la pente moyenne et les facteurs agissants géologiques, agronomiques et climatologiques. On pourrait supposer en effet que deux aires élémentaires de même pente moyenne, de même nature géologique, couvertes de la même végétation, soumises au même climat, présenteront des caractères d'érosion analogues, et donc des réseaux hydrographiques analogues dans lesquels les débits de ruissellement seront analogues. Donc, il deviendrait raisonnable de ne pas considérer la densité du réseau hydrographique, comme un facteur utile.

Cette simplification est excessive et probablement risquée, car trop de termes du bilan sont localisés le long du réseau hydrographique et les correspondances basées sur la géologie, l'agronomie et la climatologie seront probablement trop approximatives pour que l'on puisse ne pas faire intervenir un facteur caractérisant le réseau hydrographique.

Ce facteur, pour être commode, doit être constant, et donc indépendant des facteurs agronomiques et climatiques, qui varient avec le temps.

On peut alors envisager de caractériser le réseau hydrographique d'une aire élémentaire par sa longueur totale ou plutôt, pour que les valeurs de ces facteurs puissent être comparables d'une aire élémentaire à l'autre, par le rapport entre cette longueur totale et la surface de l'aire élémentaire. Ce facteur, qui aura la dimension de l'inverse d'une longueur, peut être appelé densité linéaire du réseau hydrographique.

Cette densité linéaire est liée à la densité et à l'étendue du réseau hydrographique durant un pas de temps quelconque, par des relations univoques faisant intervenir les facteurs géologiques, constants, et les facteurs agronomiques et climatologiques, dont la plupart sont variables avec le temps.

La prise en considération de la densité linéaire permettra donc de rendre compte implicitement de la partie constante des deux premiers facteurs topographiques agissants du tableau 3.2.1. Leur partie variable avec le temps sera prise en compte implicitement dans les facteurs utiles variables retenus.

3° - La pente longitudinale du réseau hydrographique est un facteur facile à mesurer pour chaque tronçon de cours d'eau d'une aire élémentaire. Il devient difficile cependant de composer ces pentes mesurées pour arriver à une valeur unique caractéristique de l'aire. On pourrait envisager une méthode de moyenne pondérée, en affectant à chaque pente un "poids" modérateur, par exemple la longueur du tronçon.

Mais cette méthode donnerait trop d'importance aux cours d'eau peu importants. Or, la pente longitudinale agit sur les eaux superficielles, terme de stockage, dans lequel les cours d'eau importants sont prépondérants. Il faudrait alors classer les rivières par ordre d'importance dans la pondération envisagée, ce qui rendrait très délicate l'évaluation de la pente longitudinale moyenne du réseau hydrographique.

Ne pourrait-on remplacer ce facteur par un autre, de détermination plus commode, et dont la prise en considération rendrait compte implicitement de l'action de la pente longitudinale ?

La pente longitudinale du réseau hydrographique est déterminée par la pente moyenne du terrain et les autres facteurs agissant sur l'érosion, qui sont d'ordre géologique, agronomique et climatologique.

A condition de tenir compte de ces facteurs non topographiques, nous pourrons admettre que la prise en considération de la pente moyenne du terrain rend compte implicitement de l'action de la pente longitudinale du réseau hydrographique. Le remplacement est donc possible.

4° - Les deux derniers facteurs topographiques agissants, distance d'adduction et pente du terrain entre points de prélèvement et d'utilisation sont des facteurs mesurables dans chaque cas, mais qui joueront un rôle plus probablement dans le modèle agro-socio-économique que dans le modèle hydrologique.

Nous retiendrons donc deux facteurs topographiques utiles pour la détermination des termes du bilan, qui sont :

- la pente moyenne du terrain,
- la densité linéaire du réseau hydrographique

Il nous faut maintenant examiner le mode d'évaluation de ces deux facteurs et le problème des échelles des cartes à utiliser pour l'étude préliminaire et les phases ultérieures.

3.2.2. La pente moyenne du terrain

La pente moyenne du terrain joue un rôle très important dans la répartition de l'eau arrivant au sol en ruissellement direct et rétention. Mais ce facteur sert aussi de base pour distinction entre zones de difficultés d'aménagement différentes.

Il est tentant d'adopter la même échelle de pentes pour l'étude du bilan et pour l'aménagement..

Toutes autres choses égales par ailleurs, le ruissellement est proportionnel à la racine carrée de la pente.

Comme les classes de pente sont en général basées sur des considérations de degrés de difficulté d'aménagement, il faudra contrôler si les subdivisions standard adoptées par les agronomes et les ingénieurs ruraux permettent une bonne différenciation hydraulique des pentes.

Le choix d'une échelle de pentes doit être un choix général et non particulier à chaque région. Changer d'échelle de pentes d'une région à l'autre ne peut que rendre plus délicates les comparaisons des résultats d'études de régions différentes, d'où ne peuvent sortir que des perfectionnements méthodologiques. Il faut donc essayer d'adopter une échelle de pente standard pour les études d'aménagement, valable pour tous les pays. J'ai donc adopté, pour la présente étude, une classification dérivée de la norme américaine.

Classe 1. - Pentes douces de 0 à 2 % en moyenne, en assez grandes étendues descendant dans la même direction, s'étendant sur au moins 130 m de longueur et 3 hectares de surface.
Pente moyenne : 1 %
Cœfficient de pente pour le ruissellement : 1.10^{-1}.

Classe 2. - Pentes douces de 2 à 5 % en moyenne, en assez grandes étendues descendant dans la même direction, ou plus ondulées, mais ne dépassant pas alors 4 % de pente moyenne, s'étendant sur au moins 100 m de longueur et 2 hectares de surface.
Pente moyenne : 3,5 %
Cœfficient de pente pour le ruissellement : $1,89.10^{-1}$.

Classe 3. - Pentes douces de 5 à 10 % en moyenne, en assez grandes étendues descendant dans la même direction ou plus ondulées, mais n'excédant pas alors 8 % de pente moyenne, s'étendant sur au moins 50 m de longueur et 0,8 hectare de surface.
Pente moyenne : 7,5 %
Cœfficient de pente pour le ruissellement : $2,72.10^{-1}$.

Classe 4. - Relief moutonné de pentes moyennes 8 à 20 %.
Pente moyenne : 14 %
Cœfficient de pente pour le ruissellement : $3,74.10^{-1}$.

Classe 5. - Relief moutonné de pentes moyennes 20 à 40 %
Pente moyenne : 30 %
Cœfficient de pente pour le ruissellement : $5,49.10^{-1}$.

Classe 6. - Terrain de pentes moyennes supérieures à 40 %.
Comme en général les terrains de pentes moyennes supérieures à 100 % sont peu étendus, nous pouvons admettre une pente moyenne de 75 %, et donc un cœfficient de pente pour le ruissellement de $8,55.10^{-1}$.

Les classes 1 à 4 correspondent aux classes habituellement prises en considération pour la mise en valeur (classement U.S.B.R.). La classe 5 peut encore être mise en exploitation, principalement forestière ou par cultures en terrasses. La classe 6 est moins directement utilisable. Cependant certaines parties pourraient vraisemblablement être boisées et exploitées. Ces deux dernières classes ont d'ailleurs été introduites principalement pour l'étude du bilan.

Les cœfficients de pente pour les ruissellements de chacune des classes sont assez régulièrement espacés. Nous examinerons ce point plus en détail sur l'exemple thessalien.

3.2.3. La densité linéaire du réseau hydrographique

Ce facteur est très simple à mesurer, à condition de définir la limite à partir de laquelle on ne peut plus considérer un thalweg topographique comme faisant partie du réseau hydrographique. Ceci nous amène donc à examiner le problème de l'échelle des cartes topographiques à utiliser dans l'étude régionale.

3.2.4. Choix des échelles topographiques

Pour permettre des comparaisons inter-régionales et donc une amélioration de la méthode, il faut essayer d'utiliser les mêmes échelles de cartes topographiques aux mêmes étapes.

D'après la définition de l'échelle de pentes donnée en 3.2.2., nous voyons que nous devrons pouvoir discerner des distances allant jusqu'à 50 m et des surfaces allant jusqu'à 0,8 hectare au minimum.

Au 1/100 000, par exemple, 50 mètres sont représentés par 0,5 mm, et 0,8 hectare par un rectangle de 1,6 mm x 0,5 mm. Le 1/100 000 est donc une échelle trop petite pour que l'on puisse établir une carte de pentes correcte. Le 1/50 000, par contre, est une base plus raisonnable : 50 m sont représentés par 1 mm et 0,8 hectare par un rectangle de 3,2 mm x 1 mm, déjà délimitable manuellement au crayon. Malheureusement les équidistances entre lignes de niveau à cette échelle sont de l'ordre de 10 m ou 20 m, et on voit tout de suite qu'une carte de pentes à cette échelle ne pourra guère arriver à une délimitation aussi fine que la définition de l'échelle de pentes le voudrait. Le 1/20 000, lui, avec des équidistances de l'ordre de 5 m dans les zones montagneuses et de 1 m en plaine permettrait d'établir des cartes de pentes d'une finesse compatible avec la définition de l'échelle, 50 m étant représentés par 2,5 mm et 0,8 hectare par un rectangle de 8 mm x 2,5 mm.

Le 1/10 000 permettrait une subdivision encore plus précise. Malheureusement, on ne dispose que rarement d'une couverture totale de la région à étudier au 1/10 000 ou au 1/20 000, au moment de l'étude préliminaire. Il n'est donc pas courant de commencer l'étude de ces échelles.

Et d'ailleurs, serait-ce souhaitable ?

Il faudrait analyser pour une seule région un si grand nombre de feuilles que ce travail important deviendrait trop coûteux pour une étude préliminaire, car il rendrait nécessaire l'exécution de toutes les cartes au 1/20 000 ou au 1/10 000. Il vaut mieux effectuer l'étude préliminaire sur la base du 1/50 000 qui existe déjà dans la plupart des cas (cartes d'état-major). Dans certains pays anglo-saxons, on a affaire à une échelle non décimale, de l'ordre du 1/60 000, par exemple. Je pense que pour permettre la comparaison entre études régionales il faudrait que l'ingénieur chargé de l'étude fasse effectuer par des procédés photographiques une transformation de ces bases topographiques, pour les amener à une échelle standard de 1/50 000, ce qui ne représente d'ailleurs qu'une dépense minime par rapport au coût de l'étude.

Je propose donc l'adoption du 1/50 000 comme échelle standard de travail pour les études préliminaires d'aménagement régional. Ceci ne veut pas dire que la présentation des plans doit se faire au 1/50 000. Là aussi, la réduction photographique doit permettre des présentations synthétiques à des échelles convenables, comme le 1/100 000 ou le 1/200 000, qui peuvent aussi être utilisées comme échelles de travail pour certains genres de facteurs utiles.

Dans les régions où il n'existe pas de bases topographiques au 1/50 000, il n'est pas réaliste de se risquer à faire une étude régionale comportant un calcul du bilan selon la méthode élaborée ici. On peut tenter des évaluations qualitatives, hasarder quelques chiffres, mais ceci ne pourra que rarement dépasser le stade d'un diagnostic sur l'intérêt éventuel d'une étude plus poussée.

Pour l'avant-projet, je propose le 1/20 000 ou le 1/25 000 comme échelle standard de travail.

Des cartes à cette échelle devront être levées en temps utile pour permettre l'étude sub-régionale d'avant-projet. Ceci peut se faire assez rapidement et économiquement, par aérophotogrammétrie. Dans certains cas, par exemple pour des avant-projets portant sur de grandes surfaces, on pourra conserver le 1/50 000.

Pour le projet, il me semble que le 1/20 000 pourrait être maintenu comme échelle de base générale avec, en addition, par endroits, utilisation du 1/10 000 et même du 1/5 000.

Voici donc définies les échelles topographiques à utiliser pour la subdivision de la région en zones de classes de pentes différentes, et pour la définition de la densité linéaire du réseau hydrographique. Il est normal de penser que ces échelles seront maintenues pour la détermination des autres facteurs, géologiques, hydrogéologiques et agronomiques, quoique, pour certains genres de facteurs on puisse admettre des échelles plus petites (de l'ordre de moitié de l'échelle de travail pour la topographie).

Nous verrons si c'est possible et justifié dans les paragraphes suivants.

3.3. Facteurs géologiques

3.3.1. Les critères géologiques

Les facteurs géologiques agissants définis au chapitre 2 sont les caractères des diverses tranches du sol et du sous-sol. Dans ce chapitre 2, j'ai systématiquement désigné ces facteurs, quelle que soit la tranche de terrain à laquelle ils s'appliquent par l'expression suivante :

"Nature et disposition des terrains" constituant la ou les tranches intéressées.

Cette expression recouvre tous les facteurs géologiques énumérés de manière assez anarchique en 1.3.5.1. et dont nous avons vu qu'ils sont trop nombreux pour être commodément utilisés en attribuant

à chacun d'eux une valeur représentative pour chaque aire élémentaire. Il faut maintenant faire un choix. J'ai esquissé en 1.3.5. le principe d'une représentation de la géologie de chaque aire élémentaire par des indices caractérisant diverses tranches du sol et du sous-sol.

Ces indices peuvent être un artifice commode pour quantifier la géologie dans un calcul à l'ordinateur. Ils peuvent agir de manière analogue aux classes de pente, par exemple. Mais alors que les classes de pente sont un facteur utile, classique dans les études d'aménagement, les indices géologiques sont une notion nouvelle qu'il faut étudier soigneusement de manière à les rendre aussi commodes que possible.

Les tranches de sol individualisées au chapitre 2 sont les suivantes :

- surface du sol,
- tranche superficielle,
- tranche phréatique,
- tranches profondes.

On peut admettre que la surface du sol sera prise en compte implicitement dans la tranche superficielle, étant donnée la complémentarité des termes de ruissellement direct et de rétention et la faible épaisseur relative de la tranche superficielle. Il reste donc à caractériser par des indices géologiques, la tranche superficielle, la tranche phréatique et les tranches profondes.

Il faut définir des échelles de valeurs de ces indices basées sur des caractères géologiques agissants sur les termes du bilan. De telles échelles ne peuvent pas être définies de manière aussi générale que l'échelle de pentes. D'une région à une autre, on rencontrera des roches différentes, des degrés d'altération et de fissuration différents, et des situations stratigraphiques et tectoniques différentes, ce qui obligera à définir des échelles d'indices géologiques nouvelles pour chaque région étudiée, et même peut-être à reconsidérer le problème d'une phase de l'étude à l'autre dans une même région.

Il est vraisemblable que l'on pourra se trouver dans des situations analogues dans deux régions différentes, et la comparaison avec des études réalisées sera très utile. Mais l'analogie ne permettra guère d'extrapoler quantitativement. Elle jouera plutôt un rôle de guide qualitatif dans la définition des échelles géologiques.

Essayons de dégager certaines règles générales de définition des échelles d'indices géologiques.

3.3.2. Délimitation des tranches de terrain

La première tâche du géologue, avant la définition des échelles d'indices géologiques, sera de délimiter les tranches de terrain auxquels ces indices sont applicables.

On peut envisager de définir ces tranches à l'aide de critères géologiques et hydrogéologiques :

- la tranche superficielle est limitée vers le bas par le niveau "minimum minimorum" de la nappe phréatique ;
- la tranche phréatique peut être limitée vers le bas par le premier niveau aquiclude servant de toit à une nappe captive ;
- les tranches profondes peuvent être séparées par des niveaux aquicludes.

Ces définitions sont sans doute séduisantes, mais il faut encore examiner si elles sont applicables.

La délimitation pratique des tranches de terrain est avant tout une question de mesures sur le terrain et d'extrapolations.

3.3.2.1. Tranche superficielle

On peut déterminer la limite inférieure de la tranche superficielle en extrapolant les résultats de mesures piézométriques périodiques dans la région, selon un réseau suffisamment dense pour que l'on puisse en déduire des cartes isopièzes valables. Selon l'échelle topographique de l'étude, la densité des points de mesure nécessaires variera. Pour l'étude préliminaire, effectuée à l'échelle 1/50 000, une densité de 1 point tous les 3 km à 4 km environ, dans les zones de plaine en tous cas, devrait être suffisante (graphiquement ceci correspond à 1 point tous les 6 à 8 cm). Pour l'avant-projet et le projet effectués à l'échelle 1/20 000, une densité de 1 point de mesure tous les 1 000 m ou 1 500 m devrait être suffisante.

Il faut pour cela faire un inventaire sélectif des puits et des sources existants et y effectuer ou faire effectuer des mesures périodiques pendant la partie de l'étude consacrée au rassemblement des données. La création de piézomètres nouveaux n'est nécessaire que si la densité des puits et sources est trop faible ou trop irrégulière pour que les cartes piézométriques que l'on peut en déduire soient valables. Il faut aussi rattacher chacun de ces points de mesure à la triangulation et au nivellement général de la région. Ces mesures périodiques doivent être classées et mises en cartes et diagrammes, point par point, au moyen de procédés automatiques à l'ordinateur. Lors de ces mesures, il faut faire bien attention de mesurer le niveau statique, et non le niveau dynamique en cours de pompage ou à un moment trop rapproché des pompages.

Mais ceci ne nous permet pas de définir le niveau minimum minimorum de la nappe phréatique, car la période de mesures du niveau phréatique a été trop courte. Il faudra donc avoir recours à une extrapolation analogique, basée sur une relation de correspondance entre la position de la nappe et un phénomène variable en fonction du temps mesuré pendant une période aussi longue que possible, par exemple les précipitations.

Cette extrapolation peut être effectuée à l'ordinateur.

Il y a dans cette procédure un certain arbitraire et une certaine approximation. Mais si l'extrapolation est faite par excès vers le bas, cette approximation n'est pas un obstacle.

Dans les zones de montagne, nécessairement moins peuplées, les points de mesure existants seront moins nombreux et l'établissement d'une carte piézométrique moins précise. On pourrait évidemment multiplier les piézomètres artificiels, mais ceci ne devra être envisagé que cas par cas, après un examen géologique superficiel de ces régions montagneuses.

La durée de la période de mesure sera nécessairement courte lors de l'étude préliminaire : un an ou deux, au maximum. La valeur de l'extrapolation analogique s'en ressentira. Pour les phases ultérieures de l'étude, les mesures s'étendront sur des périodes plus longues, surtout si elles ont été continuées durant l'intervalle qui a séparé les phases de l'étude. On peut ainsi espérer définie plus finement la limite inférieure de la tranche superficielle du sol lors de l'avant-projet, puis du projet. Mais on peut se demander si une extrapolation fine est réellement nécessaire. On pourrait envisager une approximation plus grossière, mais peut être encore compatible avec la précision du calcul, au moins pour l'étude préliminaire : on n'effectuerait l'extrapolation que sur la profondeur maximale constatée du toit de la nappe. On définirait alors la tranche phréatique par une profondeur constante pour toute l'aire, ou même pour tout un groupe d'aires élémentaires, égale à cette profondeur maximale ponctuelle extrapolée. Ceci est examiné plus bas sur l'exemple thessalien.

3.3.2.2. La tranche phréatique et les tranches profondes

Si ces tranches sont délimitées vers le bas par des planchers aquicludes susceptibles de séparer des nappes, il n'y a donc plus ici de considérations de position de nappes ou autres critères hydrogéologiques. Seule la nature du sous-sol permettra d'en différencier les diverses tranches. La délimitation des tranches phréatiques et des tranches profondes ne pourra alors se faire que si l'on connaît bien la structure stratigraphique, la tectonique et la nature des couches constituant le sous-sol. Ceci est traité ci-dessous, au sujet de la caractérisation des tranches (point 3.3.3.).

Il y a toujours une tranche phréatique, mais il n'est pas du tout obligé qu'il y ait des nappes captives, et donc des tranches profondes. Il faut pouvoir déterminer, dès l'étude préliminaire, si de telles tranches profondes existent, et dans quelle zone de profondeur on les rencontre.

En général, les nappes captives sont situées sous des plaines ou des plateaux sédimentaires. Il se peut que l'on en rencontre dans les montagnes, mais leur exploitation n'y est que rarement intéressante. Les seules exceptions qui méritent d'être mentionnées sont le karst et les roches très fissurées, qui peuvent, dans certains contextes tectoniques ou stratigraphiques, être recouverts par des formations aquicludes, même en montagne. Par conséquent, sauf dans ces cas particuliers, dans les montagnes et affleurements rocheux, nous considérerons que l'ensemble du sous-sol, situé sous la tranche superficielle, fait partie de la tranche phréatique. Il est alors sans intérêt de pousser les reconnaissances en profondeur, au-delà de quelques mètres sous le niveau minimal absolu de la nappe phréatique, sauf dans le cas d'un captage de source.

Par contre, dans les zones où l'épaisseur de terrain meuble n'est pas négligeable, les nappes captives peuvent avoir un rôle important à jouer. Il est possible qu'il faille forer jusqu'à de grandes profondeurs pour atteindre un aquifère important. Mais l'artésianisme ou le sub-artésianisme peuvent compenser largement par les économies qu'ils occasionnent sur le pompage, le coût supplémentaire du forage et de l'équipement du puits. On devra donc distinguer dans ces zones, en dessous de la tranche superficielle du sol, une tranche phréatique et des tranches profondes. Il n'est pas nécessaire, dès l'étude préliminaire, de définir une à une chaque tranche susceptible de contenir une nappe captive distincte, et ce d'autant plus qu'il y a probablement des communications verticales entre les diverses nappes captives à travers les couches aquicludes, qui ne sont à peu près jamais totalement imperméables. On peut donc alors ne considérer qu'une ou deux tranches profondes, que l'on devra caractériser par leurs capacités d'ensemble de contenance et de restitution d'eaux souterraines.

On peut d'ailleurs se demander ici aussi s'il n'est pas plus commode et encore acceptable, au moins pour une étude préliminaire, d'adopter une procédure simplifiée, et de décider arbitrairement de découper le sous-sol en tranches successives d'égale épaisseur, par exemple 50 mètres. On attribuerait à ces tranches successives des valeurs d'indices pondérant les indices des diverses couches constituantes et on arriverait ainsi, par corrélation des indices avec les résultats de puits existants, à prévoir la probabilité de production

de ces tranches égales successives. Mais ceci ne serait justifié que dans les terrains meubles et la surface de séparation entre ces terrains meubles et le bed-rock sous-jacent doit être déterminé aussi précisément que possible dès l'étude préliminaire.

Une différenciation plus poussée des nappes captives devient cependant nécessaire à partir de l'avant-projet. A ce stade une certaine imprécision sur la subdivision en tranches profondes est encore acceptable, mais on ne peut plus se contenter de les grouper en une ou deux tranches profondes. Lors du projet, on doit avoir atteint une précision suffisante pour établir un programme d'exploitation valable, presque pour chaque puits. Lors de chacune de ces deux phases de l'étude, on doit non seulement délimiter chaque tranche individualisée, mais la caractériser par sa capacité globale de contenance et de restitution d'eaux souterraines.

3.3.3. Caractérisation des tranches

3.3.3.1. Tranche superficielle

Supposons cette tranche délimitée. Quels sont les caractères géologiques agissant sur les termes de ruissellement direct, de rétention et d'infiltration directe ?

Le ruissellement direct, la rétention et l'infiltration directe varient en fonction de la rugosité, de la fissuration et des vides intergranulaires du terrain superficiel. La rugosité superficielle est directement liée à l'aspect de la roche ou du sol meuble (forme et dimension des grains constitutifs) et à la fréquence des vides de fissure ou intergranulaires que l'on rencontre dans ce sol. On devra donc établir une classification des roches et des sols basée sur ces deux facteurs.

Les roches non altérées pourront être classées selon leur structure, leur grain et leur fissuration, indépendamment de leur nature pétrographique. Ceci amènera éventuellement à classer dans la même catégorie des roches éruptives et sédimentaires, détritiques et chimiques, car des phénomènes différents peuvent amener aux mêmes résultats en ce qui concerne la structure, le grain et la fissuration.

Les sols meubles pourront être classés selon leur granulométrie, leur porosité et leur tendance au retrait, en particulier dans le cas des sols argileux.

Les classes de roches et de terrains superficiels seront définies avec plus ou moins de précision selon l'étape de l'étude, comme nous le verrons plus bas lors de l'examen technologique des levés géologiques et des reconnaissances à effectuer.

Ces facteurs sont pratiquement mesurables à la surface du sol et dans les quelques mètres d'épaisseur qui constitueront la tranche superficielle du sol. Il se pose cependant un problème d'économie de l'effort dans leur détermination. On pourrait certes effectuer sur l'ensemble de la région des puits de reconnaissance ou des sondages à la tarière à main selon un quadrillage serré dès le début de l'étude et exécuter sur chaque type de roche ou de sol meuble rencontré des mesures du grain et de la fissuration ou de la granulométrie et de la porosité, ainsi que des courbes de succion dans la tranche superficielle.

Mais est-ce nécessaire dès l'étude préliminaire, et selon quelle densité ?

Si, par exemple, dans une région déterminée, nous voulons dès l'étude préliminaire effectuer une reconnaissance par puits ou sondages à la tarière selon la maillage de 3 x 3 km^2 qui a été recommandé pour l'établissement de la carte piézométrique de la nappe phréatique, dans les zones de plaines, de plateaux et de vallées non négligeables, cela amènera à creuser des puits de 3 à 5 mètres de profondeur, voire plus, et à mesurer pour chaque type de sol rencontré la granulométrie et la porosité in situ et les courbes de succion sur échantillons intacts en laboratoire. Pour une surface de 1 000 km^2, ceci amène à environ 110 puits ou sondages à la tarière, et probablement plus de 500 mesures de granulométrie, de porosité à effectuer et à autant de déterminations des courbes de succion ; puis à utiliser par moyennes pondérées le long de chaque verticale de manière à obtenir des valeurs représentatives de toute la tranche superficielle. Ce procédé est d'interprétation assez longue. On peut envisager d'autres méthodes plus légères et meilleur marché. Par exemple, on peut exécuter selon un maillage de 3 x 3 km^2 - ou analogue - des mesures depuis la surface d'une caractéristique physique de la tranche superficielle, comme la résistivité, et relier les résultats de ces mesures effectuées en grand nombre dans la région, aux résultats de mesures "d'étalonnage" de granulométries pondérées et de porosité pondérées et de courbes de succion déterminées en un nombre réduit de points représentatifs de la variété de sols rencontrés dans la région. Pour les phases ultérieures de l'étude, on aura avantage à resserrer le maillage des points de mesure de résistivité et à multiplier les puits d'étalonnage, sans excès cependant. Une densité de 1 x 1 km^2 peut être adoptée comme raisonnable.

J'ai parlé de mesures de résistivité de la tranche superficielle car cette caractéristique physique est directement liée à la nature géologique du terrain, à sa granulométrie, à sa composition minéralogique, à sa porosité, et à sa teneur en eau et à sa courbe de succion. Ces relations auront une valeur strictement locale et ne seront qu'approximativement univoques. Dans la plupart des cas, il subsistera des indétermina-

tions, qui ne pourront être levées que grâce à une collaboration étroite entre géologues et géophysiciens. Il y a alors des chances raisonnables de pouvoir établir une correspondance valable à l'échelle de la région entre les éléments géologiques de la tranche superficielle qui influent physiquement sur les termes du bilan et la résistivité superficielle. Ceci permettra une substitution : au lieu de chercher à exprimer tous les éléments géologiques utiles de la tranche superficielle du sol, on peut n'expliciter que la valeur de la résistivité superficielle et considérer que les autres éléments sont pris en compte implicitement de ce fait. Cette substitution est très délicate et ne pourra être faite qu'à l'aide d'un nombre suffisant de puits d'étalonnage comportant des mesures de ces éléments géologiques utiles, et d'une utilisation éventuelle des résultats de cas analogues. On pourra alors établir une échelle de résistivités superficielles semblable à celle qui a été établie pour les pentes et attribuer à chaque plage de valeurs de la résisitivité superficielle constituant l'échelle, un nombre qui sera l'indice géologique superficiel. Il est évident que cette échelle ne pourra guère être générale et qu'elle devra probablement changer d'une phase de l'étude à l'autre. Une fois l'échelle des indices géologiques superficiels ainsi définie, on pourra subdiviser la région en zones de même indices géologiques superficiels, en s'appuyant d'ailleurs sur un levé géologique dans lequel l'accent sera mis sur la granulométrie et la porosité des terrains meubles affleurants.

On pourrait envisager une procédure analogue pour les parties de la région où la roche non altérée affleure. Mais l'observation directe est en général plus commode que dans les sols meubles, plus souvent recouverts par une couche d'humus et une végétation plus dense. On évaluera le grain et la fissuration des roches par simple levé de terrain, et pour les parties que l'on ne peut atteindre aisément, il faudra avoir recours à la photo-interprétation, qui permettra une interpolation valable entre points d'observation. Le levé géologique des affleurements rocheux permettra de caractériser les roches par leur grain et leur fissuration. Ces deux caractères sont plus difficiles à chiffrer que la granulométrie et la porosité des sols meubles. Néanmoins, on peut les utiliser pour définir une classification des roches analogues à la classification des sols meubles. On arrive alors à une définition semblable de l'indice superficiel.

3.3.3.2. La tranche phréatique et les tranches profondes

Il nous faut maintenant examiner comment on peut caractériser la tranche phréatique et les tranches profondes. Ces tranches sont en principe caractérisées par le fait qu'elles sont limitées par des couches aquicludes, ou peut-être, dans le cas de l'étude préliminaire, par des profondeurs arbitraires équidistantes.

Il faut donc connaître avec une précision de plus en plus grande, au fur et à mesure que l'on avance dans l'étude, la disposition stratigraphique du sous-sol et les caractères des couches constituantes. Et ce, jusqu'à une profondeur souvent bien supérieure à la profondeur limite au-delà de laquelle il n'est plus économique de forer un puits, même artésien et très producteur. En effet, il est nécessaire de savoir comment l'eau souterraine parvient aux couches profondes exploitables économiquement. Pour connaître les cheminements possibles de l'eau souterraine, il faut quelquefois effectuer des reconnaissances jusqu'à de grandes profondeurs, et en tous cas connaître la structure tectonique profonde et superficielle des plaines, plateaux et vallées d'importance non négligeable.

Comment peut-on déterminer ces caractères géologiques du sous-sol de ces zones de terrain meuble ? Un levé géologique, même très soigné et bien appuyé sur l'observation des affleurements rocheux encaissants, ne suffira pas pour que l'on connaisse la disposition stratigraphique et la structure tectonique du remplissage alluvial et sédimentaire des plaines, plateaux et vallées, surtout si l'on se trouve en présence d'une tectonique de type horst et graben. Il sera nécessaire, certes, et une bonne connaissance stratigraphique et tectonique des montagnes encaissantes permettra déjà d'esquisser les grandes lignes de la structure et de la disposition de leur sous-sol. Mais on ne pourra pas en déduire la position des couches constituant ce sous-sol avec une précision suffisante, ni les caractères géologiques utiles de ces couches. Il faut donc ajouter à ce levé géologique des reconnaissances profondes permettant de pallier à ce manque d'information.

Ces reconnaissances devraient fournir directement des renseignements caractérisant, de manière globale, la tranche à reconnaître, à la verticale du point de reconnaissance afin d'aboutir commodément à une définition d'indices. Elles devraient aussi permettre de détecter les accidents tectoniques. Enfin, quel que soit le caractère global mesuré directement, il faut pouvoir le relier aux éléments géologiques utiles pour la détermination des termes du bilan. Ceci nous ramène nécessairement à une procédure de reconnaissances géophysiques combinées à des sondages mécaniques d'étalonnage. Le problème est moins aisé à résoudre que pour la caractérisation de la tranche superficielle. Il faut pouvoir différencier géophysiquement des tranches ayant des capacités d'emmagasinement et de restitution de l'eau souterraine définies. On peut représenter physiquement ces capacités par la perméabilité du sol constitutif, qui est fonction directe de la porosité et de la dimension des vides pour les sols meubles, de la densité de fissuration et de la dimension moyenne des fissures pour les roches dures.

Nous avons vu au sujet de la caractérisation de la tranche superficielle que la résistivité d'un terrain peut être reliée à sa nature lithologique, à sa teneur en eau et à sa porosité ou densité de fissuration, ainsi qu'a sa granulométrie ou a son grain. Il sera donc en principe utile et intéressant d'avoir recours à la prospection électrique pour la délimitation et la caractérisation des tranches profondes dans les zones de plaines, plateaux et vallées. Mais ce mode de reconnaissance n'est pas d'une finesse telle qu'il permette de distinguer chaque aquifère d'une série détritique épaisse. Il ne permet pas non plus de distinguer à coup sûr les caractères géologiques des terrains de telle ou telle résistivité. Car à une même valeur de la résistivité peuvent correspondre plusieurs explications géologiques, tant en nature qu'en dimension. Il faut donc étalonner les mesures de résistivité depuis la surface au moyen de sondages mécaniques effectués aux mêmes endroits que quelques sondages électriques. Ceci accroît la sécurité des interprétations géoélectriques et permet, dans la plupart des cas, de différencier les terrains meubles des roches compactes sous-jacentes. Cette méthode de reconnaissance présente cependant un certain nombre d'inconvénients:

- au cas où l'eau souterraine est salée, et donc très conductrice, les contrastes entre sols de natures différentes sont pratiquement effacés et les diagrammes expérimentaux sont très semblables à ceux que l'on trouverait si l'on avait affaire à une couche épaisse d'argile imprégnée d'eau douce. En reconnaissances d'eaux souterraines, cet inconvénient est mineur, sauf dans le cas où l'on cherche un rejet d'eaux polluées dans les tranches profondes imprégnées d'eaux fossiles non utilisables. De plus, le doute peut aisément être levé au moyen de quelques sondages accompagnés de prélèvements et d'analyses chimiques de l'eau, ou d'un carottage électrique;

- un inconvénient plus grave est l'imprécision sur les profondeurs encadrant un milieu de résistivité donnée. Cette imprécision est due au fait que la grandeur mesurée est une résistivité apparente dans laquelle sont amalgamées les résistivités vraies des terrains traversés, leur épaisseur, et la longueur de la ligne de mesure, qui caractérise le volume du sol dans lequel le courant mesurable est passé. On peut pallier à cet inconvénient au moyen d'étalonnages par sondages mécaniques et d'un contrôle géologique superficiel ;

- un troisième inconvénient résulte du principe de l'équivalence selon lequel, à partir d'une succession de trois terrains, un sondage électrique n'est plus univoque et qu'un terrain dont l'épaisseur e est inférieure ou égale à la profondeur de son toit est moins bien caractérisé par son épaisseur e et sa résistivité ρ que :

- par le rapport $C = \frac{e}{\rho}$ si le terrain est plus conducteur que les terrains encaissants,
- par le produit $= e.\rho$ si le terrain est plus résistant que les terrains encaissants,

(LASFARGUES, 1957).

Cette indétermination peut elle aussi être levée au moyen de sondages mécaniques d'étalonnage. Mais comme on ne peut pas multiplier ces sondages mécaniques, il restera souvent quelques doutes sur l'interprétation des sondages électriques, qui ne pourront être levés que partiellement au moyen de corrélations avec les sondages électriques voisins.

- signalons aussi l'inconvénient des à-coups de prise lors des mesures, qui sont fréquents lors de changements de la nature géologique des terrains superficiels le long de la ligne d'envoi de courant. De tels à-coups peuvent rendre un sondage électrique (S.E.) impossible à interpréter et il vaut mieux les éviter autant que possible. La connaissance de la géologie superficielle lors de l'exécution des reconnaissances géoélectriques permettre dans la plupart des cas d'implanter la ligne de mesure de manière à éviter les changements de terrain.

- en profondeur, la proximité d'une faille ou d'un accident tectonique peut provoquer des effets latéraux sur les S.E. et en fausser l'interprétation. On peut remédier à ceci en exécutant deux S.E. selon des lignes orthogonales sur ces points douteux, et en portant une attention particulière aux corrélations entre S.E.

En conclusion, les reconnaissances géophysiques par mesures de résistivité à partir de la surface sont un excellent moyen de différenciation de plusieurs tranches du sous-sol. On peut arriver à différencier ainsi jusqu'à six ou sept couches consécutives. Malgré quelques inconvénients, que l'on peut pallier avec une sécurité suffisante en ayant recours à des corrélations ou à des comparaisons avec d'autres données ou reconnaissances effectuées selon un réseau moins dense, elles permettent de délimiter et caractériser par une valeur directement reliée à la perméabilité des terrains traversés, les couches profondes du sous-sol de

manière globale et sans trop entrer dans le détail. Je propose donc l'emploi de cette méthode de reconnaissance de manière assez systématique pour le rassemblement des données géologiques nécessaires à l'établissement d'un bilan hydrologique et hydrogéologique régional ou sub-régional. Elle devra être mise en œuvre selon un maillage régulier, variable selon la phase d'étude en cours, mais qui ne pourra guère être moins dense que 3 x 3 km^2 en moyenne lors de l'étude préliminaire, sauf dans le cas particulier de petites plaines, et qui devra descendre jusqu'à 1 x 1 km^2 ou 500 x 500 m^2 dans les phases ultérieures. La profondeur d'exploration, c'est-à-dire la longueur des lignes d'envoi de courant, variera selon les cas, mais, en particulier pour essayer d'élucider les problèmes de structure tectonique profonde - qui gouvernent les conditions de circulation d'eau dans les nappes captives - il ne faudra pas hésiter à pousser l'investigation bien au-delà des profondeurs maximales d'exploitation rentable. A partir de l'avant-projet, cependant, on pourra se limiter à explorer jusqu'au niveau du plancher de la tranche profonde la plus basse individualisée lors de l'étude préliminaire. Il faut aussi remarquer qu'il n'est pas nécessaire d'étalonner très précisément les S.E. au-delà de cette profondeur économique d'exploitation, car il importe plus de contrôler qualitativement à ces profondeurs la continuité ou l'interruption de telle ou telle couche aquifère rencontrée ailleurs dans la bande des profondeurs exploitables économiquement, que de savoir précisément à quelle profondeur cette continuation se produit. Ajoutons en dernier lieu que ce mode de reconnaissance est rapide et relativement peu coûteux, ce qui en accroît l'intérêt. Il faut cependant insister sur le fait que seule une collaboration très étroite entre géologues et géophysiciens permettra une interprétation et une utilisation des résultats satisfaisantes.

Ce mode de reconnaissances géophysiques n'est peut-être pas à utiliser en exclusivité, car il ne fournit pas des indications toujours suffisantes en ce qui concerne la délimitation en profondeur entre terrains meubles et roches dures, ni la structure tectonique profonde. Ceci peut être gênant lorsqu'il s'agit de différencier des alluvions grossières et des conglomérats bien cimentés, par exemple. On peut pallier à ces inconvénients en utilisant d'autres méthodes géophysiques, telle que la sismique réfraction, qui donnera une définition en général correcte de la surface de séparation entre terrains meubles et roches dures. Cette méthode basée sur la mesure des vitesses longitudinales de propagation des ondes de choc dans les différents milieux du sous-sol, aidera par comparaison avec les résultats des S.E., à lever la plupart des doutes relatifs à la position de la surface de séparation entre sols meubles et roches dures. Elle fournira aussi des renseignements précieux quant à la tectonique profonde et il est fréquent qu'elle soit employée en complément de reconnaissances électriques. Pour la tectonique, on peut aussi avoir recours à des techniques plus généralement utilisées en reconnaissances pétrolières, telles que l'aérogravimétrie et l'aéromagnétométrie.

Lors de l'exposé sur les reconnaissances géoélectriques, j'ai signalé la nécessité de sondages mécaniques d'étalonnage de la géophysique. Ils doivent jouer un rôle analogue à celui des puits d'étalonnage pour la résistivité superficielle. Leur nombre peut donc être considéré comme analogue. Ils doivent permettre de déterminer la granulométrie et la porosité ou la densité de fissuration et la dimension des fissures des terrains traversés et de représenter ces caractères par une dénomination lithologique et une perméabilité. Ils doivent ainsi permettre d'établir une relation entre les résistivités réelles déduites des mesures par S.E. et les caractères géologiques des terrains. Pour un étalonnage optimal, il est préférable d'exécuter ces sondages mécaniques à l'emplacement de S.E. déjà exécutés. Mais des sondages ou puits exécutés avant l'étude peuvent aussi être utilisés, ce qui amènera à des économies de temps et d'argent pour ces reconnaissances.

Ces reconnaissances devraient suffire pour la caractérisation géologique des diverses tranches du sous-sol au droit des aires élémentaires sous les plaines, plateaux et vallées alluviales de quelque importance. Les reconnaissances nécessaires pour les parties purement montagneuses seront limitées à un levé géologique dans lequel l'accent est mis sur la structure, le grain et la fissuration des roches, avec quelques mesures locales de résistivité de ces roches pour aider à l'étalonnage des reconnaissances géoélectriques. Les cas où il y aura circulation d'eaux souterraines captives dans des montagnes seront toujours des cas d'espèces et les reconnaissances à y effectuer sont difficile à définir de façon générale. On peut cependant penser que des reconnaissances géophysiques par sismique réfraction ou réflexion peuvent y être utiles, ainsi que quelques sondages de reconnaissances. Je n'insisterai pas à ce sujet.

3.4. Facteurs hydrogéologiques

Jusqu'ici, nous avons examiné des facteurs caractéristiques de l'aire élémentaire, indépendants du temps. A partir des facteurs hydrogéologiques agissants, nous abordons les facteurs variables avec le temps. Nous allons donc essayer de leur attribuer des valeurs caractéristiques à la fois de l'aire et du pas de temps élémentaires.

Pour cela, j'ai repris la procédure employée pour les facteurs topographiques agissants et récapitulé les divers facteurs hydrogéologiques agissants dans le tableau 3.4.

Dans ce tableau il ressort que :

1° - ces facteurs dépendent d'autres facteurs qui sont, soit des caractères constants des aires élémentaires, soit des facteurs variables. Il est donc intéressant de rechercher s'il est possible de négliger certains de ces facteurs et d'admettre qu'il en est tenu compte implicitement du fait de l'utilisation de certains des facteurs dont ils dépendent;

2° - la teneur en eau de la tranche superficielle est reliée par une relation univoque aux caractères géologiques de cette tranche (et donc à l'indice géologique superficiel), à la pente moyenne du terrain, et des facteurs agronomiques et climatologiques qui déterminent l'apport d'eau au sol. On est tenté de ne pas expliciter ce facteur dans l'expression du bilan.

Sa détermination est possible, mais relativement complexe. On peut mesurer ponctuellement la teneur en eau d'un sol par divers moyens, dont principalement deux :

- prélèvement remanié dans un puits de reconnaissance et détermination physique en laboratoire de la teneur en eau de chaque échantillon ainsi prélevé ;
- mesure in situ au moyen d'une sonde radioactive (émission de neutrons ou de rayons gamma) qui peut être introduite dans un forage, tubé ou non.

A partir de ces mesures ponctuelles, pour arriver à une valeur de la teneur en eau représentative de l'aire élémentaire durant le pas de temps considéré, il faut suivre une procédure de calculs assez lourds de détermination de moyennes successives.

Cette procédure n'est ni commode, ni économique, même si l'on a recours à l'ordinateur.

Elle introduit nécessairement des erreurs systématiques à plusieurs niveaux: lors du calcul des moyennes dans le temps, basées sur des mesures périodiques et plus encore lors de l'homogénéisation. D'autre part, malgré son importance, on peut admettre qu'elle sera prise en compte implicitement avec une précision suffisante si l'on utilise le critère géologique superficiel (qui tient compte par définition des facteurs agissant sur la rétention, le ruissellement direct et l'infiltration directe) et les facteurs utiles agronomiques et climatologiques qui seront retenus ci-dessous.

Peut-être cependant sera-t-il utile de procéder à des mesures de la teneur en eau de la tranche superficielle de sol en certains points représentatifs de la région, pour faciliter l'établissement des relations d'étalonnage entre les facteurs utiles et la rétention. Mais il ne sera pas nécessaire de le conserver comme facteur utile dans le calcul du bilan.

3° - La position de la nappe phréatique est à mesurer de toute manière pour déterminer la limite inférieure de la tranche superficielle. Une fois ces mesures effectuées, on pourrait être tenté de les exploiter doublement :

- d'abord pour la délimitation de cette limite inférieure,
- ensuite pour la détermination de valeurs représentatives de la position de la nappe phréatique pour chaque aire élémentaire et chaque pas de temps considéré.

Cette deuxième exploitation est peut-être justifiée dans le cas d'emploi de la méthode séquentielle, mais elle se heurte aux mêmes critiques que la recherche de détermination de la teneur en eau, pour la méthode statistique : risque d'erreurs du fait de la représentation par un seul chiffre de la position de la nappe pour une aire non négligeable, et surtout du fait de l'homogénéisation. On peut admettre que dans une aire élémentaire de critères géologiques superficiels et phréatiques donnés, à des valeurs données des facteurs utiles agronomiques et climatologiques, ne pourra correspondre qu'une valeur du niveau de la nappe phréatique. Ceci amène à ne pas retenir la position de la nappe phréatique comme un facteur utile lors de l'étude préliminaire et de l'utilisation de la méthode statistique lors des phases ultérieures de l'étude, et à réserver la décision en ce qui concerne les cas d'utilisation de la méthode séquentielle.

4° - Pour les nappes profondes, captives ou non, il n'est guère possible de rattacher les niveaux des différentes nappes libres et les charges hydrostatiques des nappes captives à des facteurs utiles représentatifs de l'aire élémentaire en cours d'étude. En effet, le temps nécessaire pour les échanges verticaux entre nappes à travers les aquicludes séparant les diverses tranches du sous-sol n'est plus négli-

TABLEAU 3.4.

Facteurs hydrogéologiques agissants			Termes sur lesquels ils agissent	Modes possibles de détermination		Dépendance d'autres facteurs
Localisation	Facteur	Définition		Etude préliminaire	phases ultérieures	
Tranche superficielle de sol	Teneur en eau	Valeur moyenne pour l'aire élémentaire des valeurs ponctuelles des rapports du poids de l'eau contenue dans un sol ou une roche et du poids sec des matériaux constitutifs du sol ou de la roche	Ruissellement direct Rétention Infiltration directe	Mesures directes en certains points de la région et extrapolation analogique à l'aide des précipitations, de la température et du critère géologique superficiel	Même méthode que pour l'étude préliminaire avec multiplication des mesures directes, temps de mesure plus long et extrapolation plus sûre	La pente moyenne, critère géologique superficiel, facteurs climatologiques (précipitations, pouvoir évaporant de l'atmosphère), position de la nappe phréatique et facteur agronomique
Tranche phréatique ou tranche superficielle de sol	Position de la nappe phréatique	Valeur moyenne pour l'aire élémentaire des niveaux ponctuels de la nappe phréatique au repos.	Rétention Infiltration directe Infiltration du ruissellement Eaux souterraines Prélèvements et rejets dans les eaux souterraines			Indices géologiques superficiels et phréatiques, facteurs climatologiques (précipitations, pouvoir évaporant de l'atmosphère) et facteurs agronomiques
Tranches profondes	Niveau des différentes nappes libres	Valeurs moyennes pour l'aire élémentaire des niveaux ponctuels de chaque nappe libre	Eaux souterraines Prélèvements et rejets dans les eaux souterraines			Indices géologiques profonds, indice géologique phréatique pour une faible part, facteurs topographiques, géologiques, agronomiques et climatologiques d'aires élémentaires souvent lointaines. Prélèvements dans l'aire élémentaire considérée.
Tranches profondes	Charge hydrostatique des différentes nappes captives	Valeurs moyennes pour l'aire élémentaire des valeurs ponctuelles de la charge hydrostatique (rapportées en niveaux), de chaque nappe captive	Eaux souterraines Prélèvements dans les eaux souterraines			
Tranche phréatique et tranches profondes	Composition chimique et bactériologique des eaux	Découle de la désignation du facteur	Prélèvements et rejets dans les eaux souterraines et superficielles	Analyses chimiques et bactériologiques avec utilisation d'une classification standard des eaux en vue de leur utilisation	Même méthode que pour l'étude préliminaire avec multiplication des analyses	Chimie des roches traversées par les écoulements souterrains et des terrains sur lesquels le ruissellement se produit.

geable par rapport à la durée du pas de temps élémentaire. Il y a donc décalage dans le temps entre ces facteurs et les niveaux ou charges à considérer, à partir d'autres aires élémentaires, souvent fort éloignées. On est donc obligé de mesurer ces divers niveaux de nappes libres et ces diverses charges hydrostatiques de nappes captives pendant la période expérimentale de la phase d'étude en cours et d'essayer de leur donner une valeur plus générale, représentative de la période de référence de l'étude, pour le cas d'utilisation de la méthode statistique. Ceci est en général assez aisé, car avant l'exploitation systématique de ces nappes profondes, le niveau ou la charge de ces nappes varie très peu et après le début d'exploitation, (au cas où l'exploitation a commencé avant l'étude, ce qui est fréquent), on dispose de mesures sur une durée plus importante que la période expérimentale de la phase d'étude en cours proprement dite.

En conclusion, je propose de retenir ces niveaux de nappes libres profondes et ces charges hydrostatiques de nappes captives profondes comme facteurs hydrogéologiques utiles.

La détermination de ces facteurs ne peut se faire que par mesures piézométriques directes dans des forages exécutés spécialement ou sur des puits d'exploitation existant précédemment. Le nombre de sondages à exécuter dépend du nombre de puits existants. La densité du réseau de mesures peut être moindre que pour les mesures piézométriques de la nappe phréatique, car le niveau ou la charge hydrostatique d'une nappe profonde variera moins rapidement que le niveau de la nappe phréatique, dans l'espace et dans le temps. On peut envisager des maillages de 6 x 8 ou 8 x 8 km^2 lors de l'étude préliminaire, sauf cas particuliers, et de 2 x 3 ou 3 x 3 km^2 pour l'avant-projet. Il faut aussi remarquer que ces mesures ne devront pas être exécutées sur l'ensemble des plaines, plateaux ou vallées alluviales et sédimentaires de la région, mais qu'elles devront être limitées aux secteurs où d'après les résultats de l'étude géologique et géophysique, on a bon espoir de rencontrer des aquifères profonds intéressants.

5° - La composition chimique et bactériologique des eaux a une action déterminante sur les prélèvements qui seraient effectués sur les eaux souterraines et de surface, et sur les rejets. On peut étudier cette composition en analysant chimiquement des échantillons prélevés en des endroits caractéristiques.

Il n'est pas nécessaire dans une étude du bilan d'avoir recours à une classification fine. On peut se contenter de classer les eaux en :

- eaux utilisables pour l'alimentation humaine,
- eaux utilisables pour n'importe quel type de culture ou d'élevage,
- eaux utilisables pour quelques types de culture et d'élevage,
- eaux impropres à toute utilisation.

Il n'est pas nécessaire non plus de prélever des échantillons d'une même eau à des intervalles de temps trop rapprochés. La qualité d'une eau varie assez peu, et pour l'étude préliminaire, on pourra se contenter d'un seul prélèvement pour chaque type d'eau à identifier, et considérer la classification correspondante comme une caractéristique constante. Pour les phases ultérieures de l'étude, on pourra effectuer des prélèvements plus fréquents et adopter la classification moyenne qui en résultera.

En conclusion, nous retiendrons comme facteurs hydrogéologiques utiles :

- les niveaux ou charges hydrostatiques des nappes profondes, captives ou non, qui seront variables avec le temps,
- les classes chimiques caractérisant les eaux des diverses tranches du sous-sol et de l'écoulement superficiel, qui seront des caractères constants.

3.5. Facteurs agronomiques

J'ai récapitulé les divers facteurs agronomiques agissants, dans le tableau 3.5., selon le même principe que pour les facteurs topographiques.

De ce tableau, nous pouvons retenir que :

1° - la saison n'est en fait pas un facteur, mais une donnée chronologique du problème, et qu'elle peut être représentée par le pas de temps ;

2° - les autres facteurs, tels qu'ils ont été définis dans le tableau, varient en fonction du temps. Si nous voulons aboutir à une méthode commode pour le calcul du bilan, il faut réduire au minimum le nombre des facteurs variables. On peut envisager de décomposer les facteurs agissants de manière à avoir deux groupes :

- éléments constants : espèce, densité de plantation, âge moyen ou âge d'origine en particulier,
- éléments variables : degré de croissance à partir de l'état original, foliation, etc.

Les éléments du premier groupe peuvent être déterminés pratiquement, pour les aires de végétation naturelle, par photo-interprétation et contrôles sur le terrain. Pour les aires agricoles, ces éléments sont arbitraires, ainsi que pour les aires urbaines et industrielles, dans lesquelles ils ne jouent qu'un rôle réduit. Pour les aires hydrologiques, ils n'ont pas de signification.

On peut envisager d'exprimer les parties constantes des facteurs agronomiques agissants par une seule valeur, qui serait un indice agronomique, analogue aux indices géologiques définis ci-dessus.

L'échelle d'indices agronomiques peut être déterminée en deux temps. On fait d'abord un inventaire des combinaisons possibles dans la région des éléments agronomiques constants. Puis, au moyen d'expériences locales ou d'une analyse des résultats d'expérience dans d'autres régions analogues, on tente de relier les termes du bilan à ces combinaisons d'éléments agronomiques. Si nous voulions tenter de relier séparément chaque partie constante des facteurs agronomiques agissants aux termes sur lesquels ils influent, nous arriverions à des calculs inextricables et probablement à une impasse.

Le second groupe d'éléments est plus délicat à évaluer. Mais il dépend directement de la saison et des facteurs climatologiques et hydrogéologiques variables. Nous pouvons donc le considérer comme implicitement représenté par la prise en compte de ces facteurs.

Les facteurs agronomiques agissants peuvent donc se ramener pratiquement à un indice agronomique, qui sera une caractéristique physique naturelle ou arbitraire de l'aire élémentaire et à la représentation implicite des parties variables des facteurs agronomiques par d'autres facteurs variables. L'indice agronomique étant relié à la finalité, c'est-à-dire à l'influence de la végétation sur les termes du bilan. Il n'est pas nécessaire d'imaginer le détail des cultures pour établir un bilan hydrologique. Il suffit d'adopter une valeur paramétrique de l'indice agronomique compatible avec les dotations agricoles possibles et comprise dans un ensemble de valeurs de l'indice auxquelles peuvent correspondre des cultures possibles et théoriquement rentables pour que le calcul du bilan soit possible. Il y a là un domaine de recherche appliquée que je laisse aux agronomes.

3° - les relations entre les indices agronomiques et les termes du bilan peuvent être déterminées par analyse des résultats d'expériences réalisées en plusieurs points de la région, caractéristiques des conditions types de valeurs du critère géologique superficiel, de la pente moyenne et des facteurs climatologiques utiles.

Malheureusement, ces expériences doivent s'échelonner sur plusieurs années pour être représentatives des divers cas possibles, ou bien être effectuées en chaque endroit sur de multiples cellules expérimentales, ce qui devient très coûteux. Il est donc peu probable que l'on puisse disposer de résultats expérimentaux dans la région au début de l'étude préliminaire. Au mieux, ces résultats seront très fragmentaires. La situation sera plus satisfaisante au début de l'étude d'avant-projet, et peut être correcte au début de l'étude du projet.

On est donc obligé de baser la recherche des relations entre indice agronomique et termes du bilan sur des mesures extérieures à la région, appuyées sur un nombre croissant de mesures intérieures à la région au fur et à mesure que l'on progresse dans l'étude. Ceci pourrait amener à la définition d'échelles générales des indices agronomiques, rattachées aux indices géologiques superficiels et aux types de climats. Je laisse volontairement de côté ce champ de recherche, qui nous entraînerait trop loin de la géologie. Je crois cependant qu'une analyse systématique des expériences réalisées dans le but de relier l'interception horizontale, l'interception verticale, le ruissellement et la rétention à la végétation pourrait déboucher à la longue sur une classification générale des indices agronomiques. On établirait aussi progressivement une liste des valeurs des parties constantes des trois facteurs agronomiques : type, densité et âge de la végétation

TABLEAU 3.5.

Facteurs agronomiques agissants		Termes sur lesquels ils agissent	Mode possible de détermination		Dépendance d'autres facteurs
Facteur	Définition		Etude préliminaire	Phases ultérieures	
Type de végétation	Répartition sur la surface de l'aire élémentaire des diverses espèces végétales qui s'y trouvent, proportionnellement aux surfaces qui leur sont affectées	Ruissellement direct Rétention Interception verticale Interception horizontale	Pour les aires élémentaires maintenues en leur état naturel . Pour les aires de végétation naturel. aires lors des calculs de réglage (voir chapitre 4). On peut déterminer ces 3 facteurs par analyse de photographies aériennes et levé sur le terrain. On peut ainsi arriver à une carte différenciant les végétations de même densité et âge ; pour les aires élémentaires aménagera, c'est-à-dire dont on modifiera la végétation et auxquelles on apportera éventuellement de l'eau supplémentaire. On ne peut rien mesurer.	Les cultures des aires élémentaires à aménager sont définies. On peut donc évaluer ces facteurs agissant pour tous les types d'aires élémentaires. Il y aura cependant une certaine approximation, du fait que lors de l'avant-projet et du projet, on peut modifier la répartition des cultures sur les aires élémentaires agricoles. Cette approximation pourra, si besoin est, être rendue comparible avec la précision exigée, au moyen de reprise du calcul du bilan en itérations, c'est-à-dire en les reprenant après avoir modifié les facteurs agronomiques en fonction du résultat du calcul du bilan précédent.	Ces facteurs dépendent du critère géologique superficiel et des facteurs climatologiques mais aussi de l'histoire régionale de l'intervention humaine. A un critère géologique superficiel et des facteurs climatologiques donnés peuvent correspondre plusieurs types de végétation, densité et âge de la végétation. Pour les aires élémentaires agricoles, on peut aussi relier ces facteurs à leur dotation agricole, au moins lors de l'étude préliminaire.
Densité de la végétation	Répartition sur la surface de l'aire élémentaire des diverses densités (nombre de plantes par unité de surface) rencontrées sur l'aire, proportionnellement aux surfaces de même densité	Ruissellement direct Rétention Interception verticale Interception horizontale			
Age de la végétation	Pour les plantes pérennes âge moyen (en années) des plantes couvrant l'aire élémentaire (en totalité ou en partie). Pour les plantes non pérennes, un an par définition.	Ruissellement direct Rétention Interception verticale Interception horizontale			
Saison	Moment de l'année considéré	Ruissellement direct Rétention Interception verticale Interception horizontale			

correspondant à chaque classe d'indices agronomiques ainsi définis. Cette échelle générale sera forcément approximative, ce qui explique pourquoi j'ai parlé d'expériences à faire dans la région à étudier.

A l'aide de ces expériences on peut déterminer plus précisément les relations valables dans la région entre indices agronomiques et termes du bilan, et surtout la correspondance régionale entre les indices agronomiques et les types, densités et âges de la végétation.

3.6. Facteurs climatologiques

3.6.1. Récapitulation

Au chapitre 2, j'ai retenu huit facteurs climatologiques agissant, selon le cas, sur deux termes principaux, la rétention et l'évaporation du ruissellement, et sur deux termes secondaires, l'interception verticale et l'interception horizontale.

Ce sont, rappelons-le, la quantité de pluie, la quantité de neige, l'intensité de la pluie, l'intensité de la neige, la nébulosité au sol, la température de l'air, l'humidité de l'air et l'agitation de l'atmosphère.

3.6.1.1. Introduction de la notion d'indice climatique

Maintenir ces huit facteurs variables en fonction du temps, risque fort de rendre le calcul du bilan impossible pratiquement. Il faut donc simplifier. Ceci peut se faire comme pour les facteurs géologiques et agronomiques au moyen de l'introduction d'un indice. Cet indice climatique peut être conçu de manière semblable à celui de THORNTHWAITE (19), mais plus particulièrement orienté vers l'application de la présente méthode.

Il est impossible de reporter la variation en fonction du temps sur un autre genre de facteurs, car justement dans la limitation du nombre des facteurs hydrogéologiques variables et la réduction des facteurs agronomiques à un indice invariable, nous nous sommes basés sur l'hypothèse que la variation en fonction du temps était exprimée dans les facteurs climatologiques. Nous devons donc maintenir des facteurs climatologiques variables parmi les facteurs utiles. Mais lesquels faut-il choisir ?

Les quantités totales de précipitations et les températures de l'air sont les éléments du climat en général mesurés au plus grand nombre de stations et durant les périodes les plus longues. Mais de ces deux éléments du climat, seule la température de l'air a été retenue comme facteur agissant. La quantité totale des précipitations est un élément trop composite pour qu'il ait à lui seul une relation univoque avec les termes du bilan. Dans la plupart des cas nous ne disposons que de résultats épars et portant sur de courtes durées pour les autres facteurs climatologiques agissants, au début de l'étude préliminaire. Ceci peut être amélioré pour l'Avant-Projet et pour le Projet, mais il subsiste toujours un écart important entre la densité des stations et les périodes de mesure de ces sept facteurs d'une part, et d'autre part de la quantité totale de précipitations et de la température de l'air. Il faudrait donc, si l'on voulait éviter de faire intervenir un indice climatique, homogénéiser les résultats des mesures de ces divers facteurs.

Puis il faudrait chercher à attribuer aux diverses stations où l'on dispose de valeurs de la quantité totale des précipitations et de la température de l'air, des valeurs représentatives de ces sept facteurs, par application des relations établies au plus proche de ces stations.

Et enfin, il faudrait passer à des valeurs représentatives des aires. Cette procédure est assez complexe et elle introduit des risques d'erreur systématique .

Il semble donc préférable de chercher à relier la quantité de pluie, la quantité de neige, l'intensité de la pluie, l'intensité de la neige, la nébulosité, l'humidité de l'air, et l'agitation de l'atmosphère à la quantité totale des précipitations, et à la température de l'air, en introduisant des cœfficients variables selon la station de mesures considérée et qui peuvent être exprimés par un indice climatologique, représentatif du type de climat. Ces relations seraient nécessairement statistiques, car elles seraient à établir au moyen de diagrammes portant en abscisse la quantité totale de précipitations et en ordonnée le facteur considéré, et se traduiraient par des jeux de courbes caractérisées par de mêmes valeurs de la température. L'indice climatique serait tel qu'à un indice donné corresponde une combinaison de ces cœfficients de relation et une seule.

Ceci introduit une certaine approximation et il n'est pas certain que cette approximation soit acceptable.

En raison des imprécisions dans les mesures et de l'hétérogénéité des appareillages de mesures, nous devons nous attendre à n'avoir qu'une image approchée du climat de la région, quelle que soit la méthode d'homogénéisation et de représentation des facteurs que l'on utilise. Ce qui importe plus est de relier cette image approximative à des valeurs correctes de débits mesurés dans les cours d'eaux, aux sources et aux

puits. Nous pouvons donc accepter une certaine approximation systématique sur la représentation du climat, pourvu que les mesures de débit soient correctes.

La représentation du climat par la quantité totale des précipitations, la température de l'air et un indice climatique évalué pour chaque station de comparaison possible et étendu par voisinage et interpolation entre stations de comparaison est donc plus pratique que celle qui consisterait à maintenir les 8 facteurs agissants comme facteurs utiles. Cette subdivision de la région en zones d'égal indice climatique devra s'appuyer, pour l'étude préliminaire, sur des comparaisons avec d'autres régions analogues, car on ne disposera pas alors de données suffisantes dans la région. Il faudra cependant, selon toute vraisemblance exécuter des mesures climatologiques complémentaires durant l'étude préliminaire, selon des spécifications à fixer en fonction des données existantes.

Pour l'étude séquentielle, cette procédure est moins justifiée. Mais il est nécessaire de l'employer quand même, pour ne pas rendre les calculs inextricables. Nous avons remarqué au paragraphe précédent que l'on peut se contenter d'une image raisonnablement approximative du climat de la région, à condition que les mesures de débit soient correctes. Or, à partir de l'avant-projet, il est possible d'assurer une précision assez grande aux mesures de débit. D'autre part, la densité et la durée des mesures des sept facteurs climatologiques seront plus grandes que lors de l'étude préliminaire.

La définition des indices climatiques et le découpage de la région en zones de mêmes indices climatiques seront plus fins et plus précis. Nous pouvons donc accepter le maintien de cette procédure.

Le problème se ramène donc à la détermination de valeurs de la quantité globale des précipitations et de la température de l'air, homogènes et représentatives pour chaque aire élémentaire considérée. Pour la méthode séquentielle, il n'y a pas à homognéiser. Il n'y a qu'à transformer les valeurs expérimentales ponctuelles en valeurs représentatives des aires élémentaires. Il y aura cependant ici une difficulté, car la densité des stations de mesure de la température de l'air risque d'être moindre que celle des stations pluviométriques. Pour la méthode statistique, l'homogénéisation est nécessaire. Au sujet de cette homogénéisation et de la transformation de valeurs ponctuelles en valeurs représentatives de surface, je n'insisterai pas, le sujet n'est pas neuf et se trouve traité par ailleurs (GRISOLLET, GUILMET et ARLERY, 1962).

3.7. Récapitulation des résultats

Au cours du chapitre 3, le nombre des facteurs agissants à prendre en considération dans le calcul du bilan à diminué progressivement. Chemin faisant, j'ai dû transformer les facteurs agissants tels qu'ils avaient été définis au chapitre 2, tantôt en les scindant en parties constantes et parties variables avec le temps, tantôt en les amalgamant, tantôt en les éliminant et en considérant qu'ils étaient représentés implicitement lors de la prise en compte explicite d'autres facteurs, d'expression plus commode, à cause de relations sensiblement univoques liant les facteurs négligés aux facteurs conservés. Il nous reste maintenant un certain nombre de facteurs constants, dont certains sont des caractéristiques physiques naturelles et d'autres des paramètres arbitraires, et des facteurs variables avec le temps.

Les facteurs constants sont définis soit selon des critères physiques de valeur générale ou régionale, soit selon des critères de finalité, soit selon une combinaison des deux types de critères. Ils sont de plusieurs genres :

- topographiques : 2 facteurs
- géologiques : 2 facteurs dans tous les cas, plus un facteur par tranche profonde du sous-sol individualisée
- agronomiques : 1 facteur
- climatologiques : 1 facteur

Ces facteurs utiles sont pour la plupart des indices dont chacun correspond à un certain nombre de combinaisons possibles des facteurs agissants auxquelles devraient correspondre des conséquences identiques sur les termes du bilan. Il subsiste donc au moins six facteurs constants pour caractériser chaque aire élémentaire.

Les facteurs variables sont eux aussi de plusieurs genres :

- hydrogéologiques : 1 facteur par tranche profonde de sous-sol individualisée
- climatologiques : 2 facteurs.

Soit, au moins deux facteurs variables, dans le cas où il n'y a pas de tranche profonde isolée de la tranche phréatique. Ce nombre de facteurs utiles caractérisant l'aire élémentaire courante dans le calcul du bilan est tout à fait compatible avec une procédure automatique de calcul du bilan.

CHAPITRE 4. - SYNTHESE METHODOLOGIQUE - CALCULS DE REGLAGE

4.1. L'image analytique de la région

J'avais exposé le but de cette étude en introduction et il est peut-être bon de le rappler ici : il s'agit d'une contribution à la recherche d'une méthode globale pour la détermination du bilan hydrologique et hydrogéologique d'une région ou d'une fraction de région, en vue de son aménagement agricole, agro-industriel et humain.

Les trois chapitres précédents ont été essentiellement analytiques. La région, puis l'étude régionale ont été définies, puis analysées en détail dans l'optique d'une recherche des éléments qui agissent sur le bilan, et qui sont pratiquement déterminables.

J'ai donc abouti progressivement à une décomposition aussi fine que possible de la région en éléments pratiquement déterminables et dont l'utilisation doit permettre l'établissement du bilan régional ou sub-régional.

Le cycle global annuel a été décomposé en trimestres ou en mois, selon la phase d'étude considérée. La région a été structurée et décomposée en deux étapes :

1° - Bassins Versants Unitaires ou B. V. U., qui sont des unités d'aménagement.

2° - Aires élémentaires de finalités diverses et de tailles réduites, qui sont le terme ultime de la subdivision des B. V. U. dans l'espace topographique.

Puis j'ai examiné le problème du bilan de l'aire élémentaire, en ai défini un organigramme et ai analysé chacun de ses termes.

Cette analyse m'a permis d'identifier systématiquement les facteurs susceptibles d'agir sur ces termes. J'ai ensuite examiné ces facteurs agissants de manière critique, ce qui m'a amené à un tri parmi eux et à quelques substitutions amalgamant l'effet de plusieurs facteurs de base en un seul facteur plus pratique. Je me suis ainsi efforcé de limiter le nombre des facteurs retenus tout en prenant implicitement en considération l'action des facteurs non explicités. Ceci a pu être fait grâce à des substitutions logiques.

Je suis maintenant parvenu au terme de l'analyse. La région est décomposée en éléments dont chacun est caractérisé par des facteurs permettant d'exprimer le bilan de l'aire élémentaire. De ce bilan élémentaire, on passe ensuite au bilan du B. V. U., puis au bilan régional, par itérations cumulatives.

Sur la base des résultats des enquêtes et des reconnaissances préconisées dans les chapitres précédents, et interprétées selon le schéma logique exposé dans ces trois chapitres, chaque aire élémentaire individualisée peut être caractérisée par une valeur de chaque facteur utile constant :

- classe de pente moyenne du terrain,
- valeur de la densité linéaire du réseau hydrographique,
- indice géologique superficiel,
- indice géologique phréatique,
- indices géologiques profonds éventuels,
- indice agronomique,
- indice climatique.

Elle doit d'ailleurs être caractérisée aussi par sa superficie (ou plus exactement par la valeur de la projection horizontale de sa superficie) et par ses finalités possibles.

Nous disposons aussi, pour chaque aire élémentaire, de valeurs des facteurs utiles variables représentatives de chaque pas de temps (niveau moyen ou charge piézométrique moyenne des nappes dans chaque tranche profonde, quantité totale des précipitations et température de l'air).

Il est aisé d'introduire ces caractéristiques d'aires élémentaires dans un programme d'ordinateur. Le découpage logique de la région en B. V. U. et celui des B. V. U. en aires élémentaires peuvent aussi être représentés dans des procédures automatiques. On peut aussi coder les finalités des aires élémentaires et les prendre en compte automatiquement. Tout ceci fait partie des utilisations classiques de l'ordinateur. Nous disposons donc d'une image de la région schématisée, certes, mais aussi proche que possible de la

réalité. La schématisation a certes introduit des discontinuités dans des phénomènes normalement continus, telle que la pente. Mais ceci est inévitable à partir du moment où l'on cherche à construire une image de la réalité. Il y a une certaine analogie entre la construction de l'image régionale et la structure de l'image sur un écran de télévision.

Durant la construction de l'image dans les chapitres 1, 2 et 3, j'ai toujours mentionné la nécessité d'une certaine finesse de définition, cette finesse est variable d'une phase de l'étude à l'autre, mais dans chaque cas, elle doit être le résultat d'une combinaison entre deux impératifs contradictoires.

1° - l'image doit être assez fine pour que le bilan puisse avoir une précision compatible avec l'utilisation que l'on en fera dans la simulation agro-socio-économique ;

2° - une telle finesse ne doit pas imposer un investissement ni des délais excessifs pour l'exécution des enquêtes et reconnaissances d'abord, puis du traitement de l'information qui leur fait suite.

J'ai montré qu'en principe, à condition justement d'organiser soigneusement ces enquêtes et ces reconnaissances, il devait être possible de bâtir une image suffisamment fine de la région - ou de la fraction de région - en cours d'étude, au moyen d'enquêtes et de reconnaissances qui ne sortent guère des méthodes usuelles et dont nous verrons dans la deuxième partie qu'elles ne représentent pas un investissement excessif et ne nécessitent pas des délais démesurés.

4.2. Transformation de l'image physique en simulation du bilan

4.2.1. - Principe d'action

Mais en fait, nous n'avons là que des images successives représentatrices de situations naturelles qu'il faut relier les unes aux autres et traduire en termes du bilan. Autrement dit, il faut animer cette image.

Pour ceci, il faut chercher des relations de correspondance entre les valeurs des facteurs utiles et celles des termes du bilan, puis appliquer ces relations à chaque aire élémentaire. Il faut alors transformer l'image de la région en une image de son bilan.

Pour ceci, il faut procéder à des expériences et à des mesures, ou s'appuyer sur des expériences effectuées ailleurs dans des conditions analogues. Le principe est semblable à celui qui a été exposé pour le passage des caractères géologiques aux indices géologiques. A l'aide d'une comparaison expérimentale dans certains cas types on établit une loi de correspondance que l'on applique ensuite à toutes les valeurs des éléments mesurés. Le problème se complique ici car tous les facteurs utiles - ainsi d'ailleurs que les paramètres de dotation - agissent simultanément pour causer un comportement de l'eau dans chaque aire élémentaire (le bilan est en fait l'expression chiffrée de ce comportement).

Les relations entre facteurs utiles et termes du bilan sont donc plus délicates à établir que toutes les corrélations dont il a été question dans les trois premiers chapitres. Il ne faut pas espérer les établir sans avoir recours à l'expérience.

4.2.2. - Procédure expérimentale

Dans une région déterminée, les valeurs possibles des facteurs utiles sont définies dans des intervalles bornés. Une analyse probabilitaire permettrait de déterminer les fréquences d'occurrence de combinaisons des diverses valeurs possibles de ces facteurs utiles. On pourrait donc envisager de rechercher des aires élémentaires caractérisées par des combinaisons fréquemment rencontrées des valeurs des facteurs utiles et y établir des stations expérimentales destinées à étudier les relations entre facteurs utiles et termes du bilan. Ceci a l'inconvénient de retarder l'exécution de ces expériences jusqu'à ce que les aires élémentaires soient définies et caractérisées, c'est-à-dire jusqu'à ce que toutes les enquêtes et reconnaissances définies dans les chapitres 1 et 3 aient été exécutées et exploitées. Pratiquement, un tel retard est inacceptable et serait une condamnation de la méthode globale.

Il faut pouvoir exécuter l'expérimentation sur les relations entre termes du bilan et facteurs utiles en même temps que l'on effectue les enquêtes et reconnaissances destinées à déterminer les facteurs utiles.

Ceci est possible. En effet, un examen très rapide des caractères topographiques, géologiques, hydrogéologiques, agronomiques et climatologiques de la région doit permettre de choisir très rapidement avec un risque minime d'erreurs des endroits répartis assez régulièrement dans tout le domaine des situa-

tions possibles dans la région. On peut alors installer en ces points des stations expérimentales destinées à étudier le mécanisme des relations entre facteurs utiles et termes du bilan.

Que doivent comporter de telles stations expérimentales ? Pour répondre à ceci il faut se reporter aux chapitres 2 et 3 et réexaminer les relations organiques entre termes internes du bilan et facteurs utiles.

Les termes utiles du bilan élémentaire sont les suivants :

1° - Termes localisés au-dessus de la surface du sol
- Précipitations
- Interception horizontale
- Interception verticale

2° - Termes localisés dans la tranche superficielle ou à ses limites
- Ruissellement direct
- Rétention
- Infiltration directe

3° - Termes localisés dans le réseau hydrographique ou à ses limites
- Evaporation des eaux de ruissellement
- Infiltration des eaux de ruissellement
- Eaux superficielles
- Prélèvements, Rejets } dans les eaux de ruissellement

4° - Termes localisés dans les eaux souterraines
- Eaux souterraines
- Prélèvements, Rejets } dans les eaux souterraines

Les échanges d'eau dans l'aire élémentaire peuvent donc être classés en quatre groupes, selon leur localisation. Il faudra donc envisager non pas un, mais quatre types de stations expérimentales pour rechercher les lois régionales de correspondance entre termes du bilan et facteurs utiles. Examinons ceci plus en détail.

4.2.3. - Expérimentation au-dessus de la surface du sol

La procédure est classique. Il s'agit de mesurer en un certain nombre d'endroits caractérisés par des climats nettement distincts l'interception horizontale et l'interception verticale pour diverses sortes de végétation (KITTREDGE, 1948, PENMAN, 1963). Simultanément les facteurs climatologiques utiles et agissants relatifs à ces termes doivent être mesurés dans une station météorologique.

4.2.4. - Expérimentation dans la tranche superficielle

4.2.4.1. Choix des emplacements des stations expérimentales

Les facteurs utiles agissant sur les termes du bilan localisés dans la tranche superficielle sont les suivants :
- classe de pente moyenne du terrain,
- valeur de la densité linéaire du réseau hydrographique,
- indice géologique superficiel,
- indice géologique phréatique,
- indice agronomique,
- indice climatique, pour les facteurs constants, et
- quantité totale de précipitations,
- température de l'air pour les facteurs variables.

Essayer de placer des stations expérimentales en des endroits représentatifs des diverses combinaisons possibles de ces facteurs utiles amènerait à un nombre démesuré de stations expérimentales et il vaut mieux y regarder de plus près.

Influence de la pente

Le ruissellement direct varie proportionnellement à la racine carrée de la pente. L'alimentation descendante de la rétention varie par conséquent selon une loi linéaire en fonction de la pente, étant donné que cette alimentation descendante est la fraction de l'eau arrivant au sol qui ne ruisselle pas.

La relation entre l'infiltration directe et la pente de terrain n'est pas évidente. On peut admettre cependant que cette relation n'existe que par l'intermédiaire de l'alimentation descendante de la rétention.

L'influence de la pente sur le ruissellement direct, la rétention et l'infiltration directe se traduira donc par des lois linéaires en fonction de la racine carrée de la pente.

On pourrait donc ne pas tenir compte de ce facteur dans le choix des emplacements des stations expérimentales sur la tranche superficielle. Mais les cœfficients de ces lois linéaires ne sont pas connus et il faut en principe deux points expérimentaux pour définir une relation linéaire. Ceci nous oblige à placer systématiquement les stations expérimentales en deux séries d'emplacements caractérisés par des pentes moyennes différentes.

Influence de la densité linéaire du réseau hydrographique

Le rôle de la distance, entre le point d'arrivée de l'eau au sol et le réseau hydrographique a été étudié en de nombreux endroits, en particulier dans les calculs de réseaux de drainage. L'influence de la densité linéaire du réseau hydrographique est donc qualitativement connue :

1° - pour une valeur infinie de cette densité, c'est-à-dire dans le cas d'une aire entièrement occupée par le réseau hydrographique, le ruissellement direct n'est pas défini.

2° - mais on peut lever cette indétermination aisément. En effet, si cette densité linéaire est grande, les distances à parcourir par l'eau entre point de chute et réseau hydrographique seront grandes. Tous autres facteurs égaux par ailleurs le temps d'écoulement sera d'autant plus faible que ces distances seront plus courtes. La fraction de cette eau absorbée par le sol sera donc plus faible et le ruissellement direct plus fort. Par conséquent, lorsque la densité linéaire du réseau hydrographique tendra vers l'infini, le ruissellement direct en fera autant.

3° - à l'autre extrémité du domaine des valeurs possibles pour la densité linéaire du réseau hydrographique, si cette densité est nulle, toute l'eau arrivée au sol sera absorbée par le sol ou s'évaporera, ce qui dans le cadre de l'organigramme proposé en 2.1. pour le bilan élémentaire, revient au même.

4° - le ruissellement direct différentiel, c'est-à-dire à partir d'un point quelconque de l'aire élémentaire, varie donc linéairement en fonction de la densité linéaire du réseau hydrographique. En intégrant cette relation à l'échelle de l'aire élémentaire, on arrive à une relation parabolique, variant entre zéro et l'infini.

5° - corollairement l'alimentation descendante de la rétention varie entre une valeur finie non nulle pour une densité linéaire du réseau hydrographique égale à zéro à une valeur tendant asymptotiquement vers zéro lorsque cette densité tend vers l'infini.

6° - tous autres facteurs utiles égaux par ailleurs, l'infiltration directe sera proportionnelle à l'alimentation descendante de la rétention.

7° - nous aurons donc des lois de variation en fonction de la densité linéaire du réseau hydrographique qui seront :
- paraboliques pour le ruissellement direct,
- hyperboliques pour la rétention et l'infiltration directe.

Pour connaître les cœfficients d'une relation du second degré il faut en connaître trois solutions. Nous connaissons deux solutions de la relation entre le ruissellement direct et la densité linéaire du réseau hydrographique. Nous n'en connaissons qu'une en ce qui concerne les relations entre la rétention et l'infiltration directe et la densité linéaire du réseau hydrographique. Il faudrait donc pour bien faire étudier les termes du bilan en chaque endroit retenu pour deux valeurs distinctes de la densité linéaire. Ceci est possible à condition de juxtaposer deux unités expérimentales dont les gouttières collectrices du ruissellement seraient disposées différemment. Cette juxtaposition est plus satisfaisante que l'autre solution possible qui consisterait à faire des cycles d'expérience moins longs que le pas de temps et à faire varier la densité linéaire du réseau hydrographique d'une expérience à l'autre.

Quelles que soient les densités artificielles elles seront certainement différentes des densités réelles rencontrées dans la nature.

On peut alors se demander s'il ne vaudrait pas mieux étudier l'influence de ce facteur à l'échelle de l'aire élémentaire, au moyen de mesures de débit sur le réseau hydrographique en des stations convenablement placées. Ce problème ne peut pas être résolu dans la généralité.

En conclusion cependant, rappelons que ce facteur n'est pas à retenir comme critère de choix des emplacements pour les stations expérimentales

Influence des indices géologiques

Ces facteurs utiles ont une influence très grande sur la répartition de l'eau arrivant au sol en ruissellement direct, rétention et infiltration directe. Comme ces indices sont définis selon des critères propres à chaque région, il n'est pas possible d'esquisser une loi générale de correspondance entre indices géologiques et termes du bilan.

Nous retiendrons donc ces indices comme critères de choix des emplacements des stations expérimentales.

Mais comme ces indices ne seront connus que vers la fin de la période des reconnaissances, il faudra tenir compte de ces critères de manière approximative. On choisira donc des emplacements dont on a tout lieu de penser, après une reconnaissance rapide de la région, qu'ils seront caractérisés par des couples d'indices géologiques superficiels et phréatiques nettement différents les uns des autres.

Influence de l'indice agronomique

Cet indice a certainement une influence notable, mais elle est difficile à évaluer, même qualitativement, dans le cas général. On pourrait donc envisager de tenir compte de la végétation dans le choix des emplacements des stations expérimentales. Mais les possibilités sont si nombreuses que l'on aboutirait à un nombre excessif de stations, économiquement parlant.

Et d'ailleurs ceci ne serait pas utile :

- pour les forêts, il vaut mieux étudier l'influence de la végétation à l'échelle de l'aire élémentaire ou plus exactement d'un bassin versant pilote de plusieurs km^2 ;
- pour les cultures, on peut envisager de fractionner la station expérimentale en unités distinctes juxtaposées. Et l'on cultiverait des plantes correspondant à des indices agronomiques différents sur chacune de ces unités, d'une manière analogue à ce qui a été dit au sujet de la prise en compte expérimentale de la densité linéaire du réseau hydrographique.

Influence du climat

L'indice climatologique, les précipitations et les températures de l'air ne seront connues avec une précision suffisante qu'en fin de période de reconnaissances, c'est-à-dire après l'exécution de mesures climatologiques complémentaires.

On ne pourra donc pas tenir compte précisément de ces facteurs utiles pour choisir les emplacements de stations expérimentales. On pourra cependant agir d'une manière analogue à ce qui a été indiqué pour les indices géologiques : on dispersera ces emplacements sur toute la région, compte tenu de sa morphologie, afin d'avoir des chances raisonnables de voir les stations expérimentales se trouver dans des conditions climatiques très nettement distinctes.

Il ressort de l'examen des divers facteurs utiles que si l'on établit des stations expérimentales relatives aux termes du bilan localisés dans la tranche superficielle en des points suffisamment dispersés de la région, on a des chances raisonnables de disposer de stations dont les caractéristiques seront nettement distinctes les unes des autres.

Il n'est pas possible de préciser le nombre de stations nécessaires en restant dans le cas général. Ce nombre est en effet susceptible de varier dans de grandes proportions selon la région envisagée.

4.2.4.2. - Grandeurs à mesurer. Conception générale de la station expérimentale

Sur une station expérimentale de recherche des relations entre termes du bilan et facteurs utiles, il faut pouvoir mesurer chacun des termes du bilan et des facteurs utiles, pendant une période déterminée. En principe, ces mesures doivent se rapporter au pas de temps élémentaire.

Termes du bilan

• En ce qui concerne les termes du bilan, la mesure du ruissellement direct est aisée. Il suffit de recueillir les eaux de ruissellement à l'aval de l'aire expérimentale.

• La mesure du bilan de la rétention durant le pas de temps est possible aussi par mesures continues in situ de profils hydriques et intégration automatique du résultat de ces mesures. Ces procédés de mesure font

l'objet de recherches en plusieurs universités, et en particulier au laboratoire de Mécanique des Fluides de l'université de Grenoble.

. La mesure de l'infiltration directe, c'est-à-dire des échanges entre la tranche phréatique et la tranche superficielle est possible avec une bonne approximation, à condition d'isoler l'aire d'essai du milieu environnant au moyen de parois étanches suffisamment profondes et de mesurer l'évolution du niveau phréatique dans cette aire durant le pas de temps.

. La mesure des quantités d'eau arrivant naturellement au sol est possible par des procédés classiques.

. L'expérimentateur est maître de la dotation pour irrigation.

La différence entre ces quantités arrivant au sol et la somme du ruissellement direct, de la rétention et de l'infiltration directe représente la somme de la réserve d'eau résiduelle dans la tranche superficielle et de l'eau évaporée, transpirée et utilisée pour la constitution de matière. Comme la réserve d'eau dans la tranche superficielle est mesurée directement, le bilan des écoulements localisés dans la tranche superficielle durant le pas de temps considéré est connu.

Facteurs utiles

De manière analogue, les facteurs utiles peuvent être déterminés :

. la pente moyenne du terrain est mesurable aisément ;

. la densité linéaire du réseau hydrographique est :

- soit, fixée une fois pour toutes par les gouttières collectrices aux limites de l'aire,
- soit, un paramètre de la station d'essai, sur lequel on agit librement d'une période d'essai à l'autre;

. les caractères géologiques de granulométrie, porosité, densité in situ (ou grain, fissuration et densité in situ) des tranches superficielles et phréatiques sont mesurés selon la procédure indiquée au chapitre 3 et reliée à la résistivité mesurée aussi à l'emplacement de la station avant sa construction.

Ceci permet ultérieurement de définir les indices géologiques superficiels et phréatiques de la station d'essai;

. l'indice agronomique joue aussi un rôle de paramètre sur lequel l'expérimentateur peut agir ;

. pour déterminer l'indice climatique, il faudra mesurer les huit facteurs climatologiques agissants énumérés au chapitre 2 et parmi lesquels se trouve la température de l'air. Ceci oblige à installer une station météorologique assez perfectionnée à l'emplacement de la station expérimentale ;

. quant à la quantité totale des précipitations elle peut être mesurée selon les procédés classiques de pluviométrie.

4.2.4.3. - Valeurs des stations expérimentales dans la tranche superficielle

Nous pouvons donc concevoir le principe d'une station expérimentale où l'on pourrait mesurer les termes utiles du bilan localisés dans la tranche superficielle et les facteurs utiles retenus à l'issue de l'exposé du chapitre 3.

Ces mesures comportent cependant un certain nombre d'imperfections qui peuvent causer des erreurs importantes. Pour qu'elles soient valables il faut isoler la station expérimentale des eaux souterraines environnantes. Ceci peut être envisagé au moyen de parois étanches assez profondes dont le coût imposera que l'aire expérimentale soit assez petite. Et l'on n'est jamais absolument sûr que l'isolement est satisfaisant. D'autre part, ces parois perturbent le milieu dans lequel on veut faire les mesures et ceci est une cause supplémentaire d'erreurs d'autant plus importante que la cellule d'essai est plus petite.

Malgré leurs défauts et surtout malgré leur nombre nécessairement réduit en raison de coût, de telles stations expérimentales sont utiles pour une étude de bilan hydrologique et hydrogéologique, dès l'étude préliminaire.

Mais les lois de correspondance que l'on déduira de l'expérience s'appliqueront à un nombre de cas relativement faible. Les interpolations quelquefois lointaines effectuées pour attribuer des valeurs des termes du bilan localisés dans la tranche superficielle à toutes les aires élémentaires seront donc assez approximatives.

4.2.5. Expérimentation dans le réseau hydrographique

4.2.5.1. - Conception de l'expérimentation

Les facteurs utiles agissant directement sur les termes du bilan localisés dans le réseau hydrographique sont les suivants :

- classe de pente du terrain,

- valeur de la densité linéaire du réseau hydrographique,
- indice géologique phréatique,
- température de l'air.

L'expérimentation ne peut se concevoir ici qu'à l'échelle de l'aire élémentaire ou du groupe d'aires élémentaires. Comme les aires élémentaires ne seront pas définies lors du choix des stations expérimentales, il faudra choisir des bassins versants hydrographiques suffisamment disparates pour que l'on dispose d'un bon échantillonnage des situations possibles dans la région et assez petits pour qu'ils représentent des situations homogènes et simples.

Le principe de l'expérimentation est assez simple :
On suppose connus sur l'aire élémentaire les termes suivants :

- précipitations,
- interception horizontale,
- interception verticale,

par application des lois de correspondance entre ces termes et les facteurs utiles qui agissent sur eux (voir point 4.2.6., ci-dessous);

- ruissellement direct,
- rétention,
- infiltration directe,

par application des lois de correspondance entre ces termes et les facteurs utiles qui agissent sur eux (voir point 4.2.4.).

Si l'on connaît la température de l'air et l'indice climatique de l'aire, on peut déterminer le terme d'évaporation des eaux de ruissellement, avec une assez bonne approximation. On peut en effet mesurer la surface du réseau hydrographique sur cette aire, au moyen de photographies aériennes et relier cette surface à la densité linéaire du réseau hydrographique.

Il reste à mesurer les débits arrivant dans l'aire élémentaire et ceux qui en sortent par le réseau hydrographique, ainsi que les prélèvements et les rejets.

Par différence, on déterminera le terme d'infiltration des eaux de ruissellement. On peut simplifier considérablement la procédure en choisissant des bassins versants expérimentaux n'ayant pas de points d'entrée du réseau hydrographique et à la sortie desquels il suffira d'implanter une station limnimétrique complète. La mesure des facteurs utiles se fera selon la procédure indiquée au chapitre 3. Il faudra cependant installer sur le bassin versant expérimental une station météorologique complète de manière à déterminer son indice climatique.

4.2.5.2. - Validité de l'expérimentation

La valeur des mesures sur de tels bassins versants expérimentaux, et donc des lois de correspondance qui peuvent en être déduites dépend pour beaucoup de la confiance que l'on peut accorder aux déterminations des termes localisés dans la tranche superficielle et au-dessus de la surface du sol, qui ne peuvent être qu'approximatives.

Elle dépend aussi du soin que l'on aura apporté à la détermination des facteurs utiles constants des éléments de décomposition des bassins versants expérimentaux. Et ceci ajoute encore au caractère approximatif de l'expérimentation.

4.2.6. Expérimentation dans les eaux souterraines

Cette expérimentation ne peut se faire qu'au moyen d'essais de pompage de longue durée dans des puits de reconnaissance implantés en des endroits choisis en fonction des premiers résultats de l'étude géologique, ainsi que des reconnaissances géophysiques et par sondages.

A l'aide de tels essais de pompage il sera possible d'évaluer les termes d'eaux souterraines et les limites dans lesquelles on peut admettre d'effectuer des prélèvements et des rejets dans les eaux souterraines et de les relier aux facteurs utiles :

- indices géologiques et profonds,
- niveaux piézométriques des nappes.

La procédure est classique et je n'insisterai pas à ce sujet. Les relations déduites de ces essais de pompage comporteront cependant une certaine approximation, en raison des méthodes de mesure et d'interprétation. Il est bien connu que les interpolations à partir des résultats d'essais de pompage sont assez aléatoires.

4.3. Les calculs de réglage

4.3.1. Constitution de la première image du bilan - Nécessité d'un réglage

En principe, l'application des lois de correspondance déduites des expérimentations dont les grandes lignes ont été ébauchées en 4.2.3., 4.2.4., 4.2.5. et 4.2.6., ci-dessus devrait permettre de bâtir une image du bilan hydrologique de la région dans son état actuel et dans les états prospectifs correspondant aux diverses hypothèses envisagées pour les dotations en eau.

Il suffisait alors de calculer le bilan de chaque B. V. U. en cumulant les bilans de chacune de ses aires élémentaires constitutrices, par une procédure d'agglomération en boule de neige procédant de l'amont vers l'aval. Le bilan de chaque aire élémentaire serait calculé au moyen d'un programme standard déduit de l'organigramme du tableau 2.1.

Ceci serait tout à fait justifié si les relations de correspondance entre termes du bilan et facteurs utiles étaient parfaitement valables. Or, nous avons vu que ces relations ne pouvaient être qu'approximatives. Alors, aboutit-on à une impasse ? L'édification de ce schéma de représentation du bilan hydrologique et hydrogéologique est-elle illusoire et sans application pratique possible ? Non, car il existe un mode de contrôle et d'ajustement des résultats de l'application de ces correspondances.

On peut d'abord effectuer un premier contrôle de la validité des relations de correspondance au moyen d'une recherche bibliographique portant autant que possible sur des cas analogues. Ceci permet un premier ajustement de l'image du bilan de chaque B. V. U. Mais ceci ne suffit pas encore pour que les erreurs, les approximations et les incertitudes dans les relations de correspondance entre termes utiles du bilan et facteurs utiles soient négligeables. Il est indispensable de procéder à un réglage plus fin, pour toute la région.

4.3.2. Principe des calculs de réglage

Ils peuvent se concevoir comme suit :

1° - On effectue le calcul du bilan de la région dans son état actuel, par application des relations de correspondance brutes déduites des résultats des expériences et éventuellement corrigées à l'aide de l'analyse bibliographique.

2° - Chemin faisant, on compare les résultats du calcul aux valeurs expérimentales de mesure de débit des cours d'eau en certains points de fermeture de bassins versants, de débit des sources, de production des puits d'exploitation d'eaux souterraines.

3° - On contrôle la valeur des cœfficients des relations de correspondance en chaque point de contrôle. Si l'on constate une différence excessive entre les termes calculés du bilan et les termes expérimentaux correspondants, on modifie les valeurs des cœfficients et, par itérations, on arrive à obtenir une concordance satisfaisante au point de contrôle considéré entre termes du bilan calculés et mesurés.

Ceci permet de comprendre pourquoi je n'avais pas, jusqu'ici, introduit les mesures classiques de débit, si ce n'est sur les petits bassins versants expérimentaux de recherche de correspondances entre termes du bilan et facteurs utiles dans le réseau hydrographique.

Une autre raison en est que ces débits varient selon l'aménagement envisagé et que l'on ne peut les introduire dans des calculs de bilan que pour l'état actuel.

Ces contrôles pourront avoir lieu en plusieurs points, le long de plusieurs lignes ou sur plusieurs surfaces de la région. Il est indispensable de disposer de plusieurs contrôles échelonnés le long du réseau hydrographique de la région. Il est fort probable, en effet, à cause du nombre de relations de correspondance entre facteurs utiles et termes du bilan, et donc du nombre de cœfficients, que les conditions de compatibilité (c'est-à-dire de bonne concordance entre débits calculés et débits mesurés) seront satisfaites en un contrôle pour plusieurs groupes de valeurs de ces cœfficients. Il est au moins probable que les ensembles de groupes de valeurs de ces cœfficients satisfaisant aux conditions de compatibilité en deux points de fermeture soient identiques. Il y aura donc intersection et la partie commune de ces deux ensembles satisfera aux conditions

de compatibilité pour les deux points de fermeture. Et ainsi de suite, d'amont vers l'aval, le nombre de groupes de valeurs des cœfficients diminuera d'intersection en intersection. L'idéal serait que, à partir d'un certain contrôle, il ne reste plus qu'un groupe de valeurs des cœfficients satisfaisant aux conditions de compatibilité et que plus loin vers l'aval les conditions de compatibilité soient encore satisfaites pour ce groupe. Rien n'impose a priori que cet idéal soit atteint.

Il se peut qu'après avoir réduit le nombre de groupes de valeurs des cœfficients à l'unité, on arrive à des incompatibilités plus à l'aval. Ceci signifie que les cœfficients choisis pour l'amont cessent d'être valables et qu'un nouveau choix est nécessaire. La région est alors à subdiviser en secteurs à chacun desquels correspond en fin de compte un groupe de cœfficients satisfaisant aux conditions de compatibilité. Pour tracer la frontière entre deux secteurs, il faut examiner soigneusement les valeurs de critères et caractéristiques constantes des aires élémentaires, et ne pas se contenter de séparer les secteurs par la limite du bassin versant qui se ferme à l'aval sur le dernier contrôle pour lequel les conditions de compatibilité ont été vérifiées pour un groupe donné de valeurs des cœfficients.

Il se peut aussi qu'à l'aval extrême de la région, il subsiste plusieurs groupes de valeurs des cœfficients qui satisferont aux conditions de compatibilité tout au long du calcul cumulatif. En ce cas, il faut reprendre l'étude bibliographique et l'exploitation des résultats expérimentaux dans la région, pour chercher à réduire les intervalles de liberté dans le choix des cœfficients. Car il ne peut y avoir physiquement qu'une solution et une seule au problème du bilan d'une région donnée, dont l'état de mise en valeur est donné, et pour laquelle les valeurs des facteurs utiles variant avec le temps sont données aussi. On essaie alors de se ramener à l'un des deux cas précédents.

4.3. Mode d'utilisation des mesures de débit

Voici donc exposé le principe selon lequel les calculs de réglage doivent être effectués. Il m'est difficile d'aller beaucoup plus loin dans la recherche méthodologique sans avoir recours à l'exemple de la Thessalie. Une dernière question peut être abordée, cependant : comment peut-on utiliser les mesures de débit pour le contrôle ? Pas de temps après pas de temps ? Par recherche de relations statistiques ? Ou bien en les homogénéisant ?

En règle générale, les mesures de débit des cours d'eau, des sources et des puits ont été effectuées de manière anarchique avant le début de l'étude préliminaire. Au hasard de programmes partiels d'équipement, des stations limnimétriques ont été installées dans certains secteurs de la région à certaines époques et des mesures y ont été effectuées durant certaines périodes. D'un secteur à l'autre, le mode de mesure et la période durant laquelle elles ont été effectuées changent. La densité des stations de mesures change aussi. Pour les débits des sources, on constate une disparité et une dispersion analogue de mesures. En ce qui concerne les puits, on ne dispose, la plupart du temps, que de résultats épars. On est amené, pour exploiter les données, à un véritable travail de détective qui comporte la recherche des compatibilités entre les résultats des mesures, les constatations géologiques, agronomiques et climatologiques. On peut ainsi sélectionner un certain nombre de résultats qui présentent quelques garanties de vraisemblance. Et on essaie d'exploiter ces données sélectionnées. Il est de toute manière préférable de compléter ces données partielles et anarchiques au moyen de reconnaissances complémentaires, étalées sur un ou deux ans et effectuées en des endroits convenablement choisis.

Procéder à l'homogénéisation des mesures de débit en les rapportant à la période de référence choisie pour l'homogénéisation des quantités totales des précipitations serait tentant. Malheureusement, cette procédure, déjà critiquable pour les facteurs climatologiques agissants (autres que la température de l'air, en général), lorsqu'il ne s'agit que de définir des indices climatiques, l'est plus encore quand il s'agit de mesures de débit. Nous avons vu en effet que l'exactitude des mesures de débit était plus importante que celle des mesures climatologiques, en raison justement de leur rôle de contrôle dans le choix des cœfficients. Il vaut mieux, dans ces conditions, ne pas utiliser cette procédure.

On peut aussi être tenté d'utiliser les résultats bruts de mesure et de les relier aux résultats bruts des mesures hydrogéologiques et climatologiques effectuées aux mêmes moments. Mais ceci ne permet pas de minimiser les décalages entre précipitations et débits (temps de propagation des écoulements) qu'il s'agisse d'écoulements superficiels ou souterrains.

Une autre solution me paraît préférable : elle me semble diminuer au maximum l'importance des erreurs expérimentales et des décalages dans le temps et peut se schématiser comme suit :

- transformation des résultats bruts des mesures de débits en valeurs représentatives du pas de temps élémentaire durant lequel les mesures ont été effectuées ;

- exécution du calcul de réglage pour les valeurs des facteurs utiles hydrogéologiques et climatologiques correspondants à ce pas de temps.

Cette procédure présente plusieurs avantages :

- elle permet de multiplier le nombre des contrôles en un point donné ;
- elle se réfère à des périodes de même nature et même durée que les pas de temps qui seront utilisés dans les calculs prospectifs, ce qui supprime le risque d'aboutir à des groupes de cœfficients qui seraient valables à l'échelle de la semaine et dont rien n'indique a priori qu'ils seraient valables à l'échelle du mois ou du trimestre.

DEUXIEME PARTIE

APPLICATION CRITIQUE A LA THESSALIE

La région d'application

La région considérée (voir planche 1 ci-après) comme exemple de base pour l'étude critique de la méthode qui découle de la première partie se trouve en Thessalie, dans le Nord de la Grèce continentale. Elle ne comprend pas absolument toute la province administrative de Thessalie, car le département d'Almyros et une partie du département de Volos en sont exclus. D'autre part, une partie du département de Phtiotide (Lamia), se trouve inclue dans la région. Cette région est une unité physique : elle couvre les bassins versants du Pinios et du Titarissios, les deux grands cours d'eau venant du Pinde et des massifs cristallins séparant la Thessalie et la Macédoine, jusqu'à l'entrée du Pinios dans les gorges du Tembe, à travers lesquelles il se précipite vers la Mer Egée. Elle couvre aussi les bassins versants fermés de Karla et Sikourion, anciens lacs récemment drainés et quelques petits bassins versant périphériques, qu'il est commode de rattacher à la région.

Elle comprend deux plaines centrales sensiblement orientées NNO - SSE, séparées par une assez large bande de collines et entourée par des montagnes, les Kamvounia, le Titaros, les Antikhassia et l'Olympe au Nord, le Pinde, l'Othrys et le Kassidiaris au Sud Ouest et au Sud, l'Ossa et le Mavrovouni à l'Est. Dans ces montagnes se trouvent des plaines, plateaux ou zones de relief modéré, qui sont peuplées et cultivées.

Elle couvre une surface de 12 000 km^2 environ.

J'ai pris contact avec cette région à l'occasion d'une étude préliminaire technique et économique, confiée par le gouvernement grec à la firme suisse d'ingénieurs conseils, Electro-Watt, de Zurich, pour laquelle je travaillais à l'époque. Cette étude a été effectuée entre août 1966 et juin 1968. Dans ce qui suit, elle sera désignée sous le nom d'étude réelle.

Le problème posé était l'optimalisation de l'exploitation agricole des plaines principales de la région, compte tenu des conditions physiques, humaines et économiques.

Principe de l'essai d'application

J'étais chargé de la partie géologique et hydrogéologique de cette étude préliminaire, ce qui m'a amené à rechercher :

- les conditions géologiques et géotechniques de fondation des sites et d'étanchéité et de stabilité des versants des bassins de retenue des barrages envisageables;
- les conditions d'écoulement des eaux de surface et souterraines en tenant compte des utilisations de l'eau d'amont en aval dans la région.

Avant cette étude préliminaire homogène de la région, un certain nombre d'études partielles avaient été effectuées, et ceci avait eu pour résultat l'identification et l'étude à des degrés divers de plusieurs sites de barrages et de plusieurs zones d'intérêt pour une exploitation d'eau souterraine. Mais il n'y avait eu aucune coordination entre ces études ; à titre d'exemple, il existait une étude déjà détaillée d'aménagement agricole de la plaine de Karla, basée sur un réservoir artificiel dans cette plaine, vers lequel on comptait dériver les eaux du Pinios, et qui ne tenait aucun compte des besoins en eau éventuels plus à l'amont le long du Pinios, ni du fait que l'exploitation des eaux du Pinios sans une telle dérivation risquait d'être plus économique que ce projet de Karla.

Ces lacunes et absences de coordination m'ont amené à concevoir le principe de méthode exposé dans l'introduction de la présente étude et développé dans la première partie. J'ai donc attaqué le problème de manière systématique et ai procédé à des analyses topographiques puis géologiques et enfin hydrologiques de la région. Ceci m'a amené à rassembler, puis à analyser les données existantes à l'issue des études précédemment exécutées, dans un premier temps. Puis j'ai proposé, en accord avec les autres spécialistes d'Electro-Watt, des programmes de reconnaissances, tant pour les sites de barrages que pour les eaux souterraines. Ces reconnaissances ont été exécutées par l'équipe de géologues mise à ma disposition, pour une part, et pour le reste, par des entreprises spécialisées choisies par le gouvernement grec.

Le rassemblement des données existantes a duré plusieurs mois, de septembre 1966 à mars 1967 environ. L'analyse topographique, pour laquelle je n'avais encore aucune règle standard et où il y a donc eu certaines pertes de temps et des tâtonnements, a duré de novembre 1966 à avril 1967. Le travail géologique de terrain a duré de mars 1967 à janvier 1968. L'exécution des reconnaissances géotechniques et géophysiques s'est échelonnée d'août 1967 à janvier 1968. L'exploitation de l'ensemble des données rassemblées alors a duré de novembre 1967 à mars 1968. Là aussi, il y eut de nombreux tâtonnements car la méthode n'était pas au point, et il m'arrivait en cours de travaux de me rendre compte - trop tard pour qu'il fût possible d'y remédier, la plupart du temps - que certaines données complémentaires auraient été nécessaires pour le calcul du bilan et qu'il aurait été aisé de les déterminer en temps utile sans mettre en œuvre des moyens spéciaux ou onéreux, ni allonger la durée de l'étude. D'autre part, le calcul a été effectué manuellement, ce qui a limité le nombre de cas pratiquement pris en compte.

En dépit de ces limitations et de ces imperfections, les bilans régionnaux, calculés pour sept cas d'aménagement envisageables ont permis d'aboutir à une optimalisation correcte et à un schéma d'aménagement agricole de la Thessalie. Mais j'étais conscient du fait qu'il y avait là un grand nombre d'imperfections qu'une recherche méthodologique et un choix rationnel des reconnaissances et mesures à effectuer permettraient d'éviter à l'avenir, sans accroissement excessif de coût ni de délais. De plus, ce genre de calcul devait être envisagé pour l'ordinateur, et non pour la machine à calcul de bureau. C'est pourquoi j'ai entrepris la recherche qui a abouti à la première partie de la présente étude.

Depuis la fin de l'étude préliminaire, j'ai quitté la Grèce, et malgré de nombreux passages qui m'ont permis d'y rechercher des données complémentaires, des lacunes subsistent dans la masse d'informations à ma disposition. L'application pratique de la méthode ébauchée dans la première partie ne peut alors être envisagée que comme une tentative à l'aide des données à disposition et un examen critique des lacunes résiduelles dans ces données, portant sur deux points principaux :

- importance de la lacune, éventuelle possibilité d'effectuer le calcul malgré cette lacune et conséquences sur la validité du calcul ;
- ordre d'idées des travaux et délais nécessaires pour effectuer les reconnaissances et les mesures indispensables pour combler cette lacune.

L'examen critique porte aussi sur le rassemblement de données superflues lors de l'étude préliminaire effectuée en 1966-1968, et sur les recherches méthodologiques qu'il serait intéressant d'effectuer pour compléter et préciser la méthode.

J'ai donc, dans cette seconde partie, repris en considération l'ensemble des données qui avaient été mises à ma disposition lors de l'étude réelle et celles qu'il m'a été possible de rassembler par la suite, et j'ai cherché à appliquer la méthode indiquée dans la première partie. Ceci m'a amené à des découpages différents de ceux qui avaient été utilisés lors de l'étude réelle, et à la constatation de nombreuses lacunes.

Il n'est pas question, dans ce qui suit, de critiquer les études réalisées dans le passé. La méthode de calculs du bilan exposée ici n'existait pas lors de l'étude réelle. Il serait absurde de porter des jugements de valeur sur des études exécutées en leur imposant implicitement d'avoir été effectuées selon une méthode non conçue à ce moment-là. D'autre part, l'étude réelle était orientée principalement vers l'étude des grands barrages et le problème des grands barrages est venu s'y greffer, en position secondaire. Le raisonnement est différent : il porte sur un examen critique de ce qu'il aurait été nécessaire de faire pour rassembler les données indispensables à la mise en œuvre de la méthode, en plus de ce qui avait été fait dans le cadre de l'étude réelle et des études précédentes, et de ce qui a été fait sans nécessité en supposant que la méthode était connue et mise au point ; puis une comparaison entre ces travaux nécessaires et ceux qui ont réellement été exécutés permettra de juger de l'intérêt pratique qu'il y a de mettre en œuvre la méthode actuellement proposée de calcul automatique de bilans hydrologiques.

Les planches relatives à l'ensemble de la région sont présentées ici (voir tome 2) à des échelles bien plus petites que l'échelle de travail préconisée dans la première partie (point 3.2.4.). J'ai donc sélectionné, dans la région, une zone témoin exemple de base représentatif moyen sur lequel j'ai effectué certains détails de l'essai d'application, en particulier dans la recherche de sensibilité limite du découpage en aires élémentaires. Il s'agit du bassin de Dheskati-Valanidha dont la position est indiquée sur la planche 1. Les planches relatives à cet exemple de base portent le même numéro que les planches régionales correspondantes, mais affecté de l'indice :e. Elles sont présentées au 1/100 000 par réduction photographique d'originaux au 1/50 000.

CHAPITRE 5

SUBDIVISION DE LA REGION EN BASSINS VERSANT UNITAIRES - ANALYSE TOPOGRAPHIQUE

Pour la subdivision de la région en bassins versants unitaires, quelques règles générales, qui sont plus des orientations que des règles, ont été énoncées dans la première partie (point 1.3.). Ces règles sont basées uniquement sur l'aspect topographique de la région ; c'est donc par l'examen des conditions de l'analyse topographique que l'application à la Thessalie doit logiquement commencer.

5.1. Bases topographiques à disposition - Principe d'utilisation

Les documents topographiques dont j'ai pu disposer étaient les suivants :

- carte de la Grèce au 1/500 000 ;
- cartes des départements au 1/200 000, établies par le Ministère de la Coordination, avec équidistance entre lignes de niveau de 200 m en général, 100 m quelquefois. Ces cartes ont été éditées en 1963 ;
- cartes d'état-major au 1/50 000, effectuées par aérophotogrammétrie par l'armée de l'air américaine en 1949 et continuellement remises à jour par les services topographiques de l'armée de l'air grecque ;

La Thessalie est couverte par 32 cartes au 1/50 000 dont j'ai pu utiliser une édition ancienne, au moins en ce qui concerne les agglomérations et les routes, mais toujours valable en ce qui concerne l'hydrographie et le relief.

- cartes au 1/20 000 couvrant partiellement les deux plaines centrales ;
- cartes au 1/10 000 et au 1/5000 pour quelques portions de plaines et en particulier le périmètre d'irrigation du Tavropos, près de Kardhitsa et des fragments du bassin de Karla.

Pour l'analyse topographique seuls le 1/200 000 ou le 1/50 000 étaient utilisables de manière générale, car les autres cartes ne couvrent pas la région.

Nous avons vu dans la première partie que le 1/200 000 était trop imprécis et avons proposé l'adoption systématique du 1/50 000 comme échelle de travail. Ceci a été fait lors de l'étude réelle.

Le premier problème est la subdivision en B. V. U., qui se fait uniquement sur des critères topographiques. Cette subdivision commence obligatoirement par une délimitation du réseau hydrographique et des lignes de crête ; puis une recherche des sites de barrage topographiquement possibles, un examen des caractères morphologiques de la région, doivent permettre de déterminer les points de fermeture possibles pour les B. V. U.

Sur la base du 1/50 000, il n'a pas été possible de déterminer avec sécurité que les sites de barrage d'une hauteur minimale de 20 m, en raison de l'équidistance des courbes de niveau. Tout au plus ai-je décelé quelques petits réservoirs intéressants, à des distances excessives des grands réservoirs.

Un examen rapide des cartes topographiques existantes au 1/20 000 (préalablement réduites photographiquement au 1/50 000) et surtout l'analyse stéréoscopique des photographies aériennes m'ont permis de compléter cette lacune. Un contrôle rapide sur le terrain de tous les points de fermeture aval possibles (sites de barrage ou non) était indispensable pour permettre un choix raisonnable entre eux. J'ai inspecté durant l'étude réelle tous les points de fermeture possibles, ce qui m'a permis :

- de faire une première sélection parmi les sites de barrages envisageables ;
- d'éliminer les points de fermeture superflus et d'arriver à une définition des B. V. U.

5.2. Recherche des sites de barrages

5.2.1. Critères économiques d'un premier choix

J'ai d'abord recherché sur les cartes tous les resserrements des vallées à l'aval immédiat de tronçons assez larges, à condition que le bassin versant soit au moins égal à 5 km^2 et que ce barrage présente un intérêt éventuel pour l'agriculture. Pour cela, j'ai tracé lors de l'étude réelle, puis repris dans le présent examen critique le réseau hydrographique et le chevelu des crêtes (planche n° 2). Puis j'y ai envisagé la construction de barrages standard en terre de pentes 2,5/1, ou en enrochements de pente 1,9/1. J'ai déterminé systématiquement lors de l'étude réelle la volume du barrage et celui de la retenue, en fonction de la hauteur du barrage en prenant des revanches de 5 à 7 mètres au-dessus du niveau du lac, selon l'implantation du barrage. En même temps, j'ai déterminé un seuil de rentabilité pour le rapport $V_{lac}/V_{barrage}$, en fonction des conditions économiques locales.

En ce qui concerne la Grèce, les bases adoptées lors de l'étude réelle ont été les suivantes : l'investissement maximal admis pour les retenues assez grandes nécessitant un transport sur d'assez longues distances était en 1967 de 0,10 à 0,12 \$ /m^3 de stockage possible. Pour des petits barrages avec utilisation à proximité, cet investissement maximal admis passe à 0,23 \$/m^3.

On a pu estimer dans un premier calcul économique approximatif que la part de l'eau dans le coût de production est d'environ 20 %. L'investissement pour stockage représente sensiblement la moitié du prix de l'eau. Ceci amène à conclure que les barrages interviennent pour 10 % dans le coût de production. On peut aisément admettre que dans les 30 ans qui viennent, toutes choses égales par ailleurs, la part des barrages dans le coût de production peut doubler sans que la rentabilité de l'exploitation soit compromise. Ceci revient à accroître le coût de l'exploitation de 10 % environ, ce qui est tout-à-fait acceptable.

Le coût en Grèce d'un grand barrage en terre peut s'estimer à \$ 2,3/m^3 de terre mise en place. Ce coût statistique est valable pour 1967. Il tient compte de tous les frais de construction, d'ingénierie et d'Administration. Si l'on considère que lors de l'étude de projets plus détaillés, on peut arriver à une économie du volume du barrage de l'ordre de 15 %, ceci nous laisse un prix de \$ 2 par mètre cube de barrage en terre "théorique" de première approximation. D'où un rapport minimal acceptable V lac/V barrage de 10,

Pour des petits barrages, le coût du mètre cube de barrage théorique peut être estimé à \$ 4, ce qui pour prix limite de l'eau au pied du barrage de \$ 0,47 amène à un rapport minimal acceptable V lac/V barrage de 8,5.

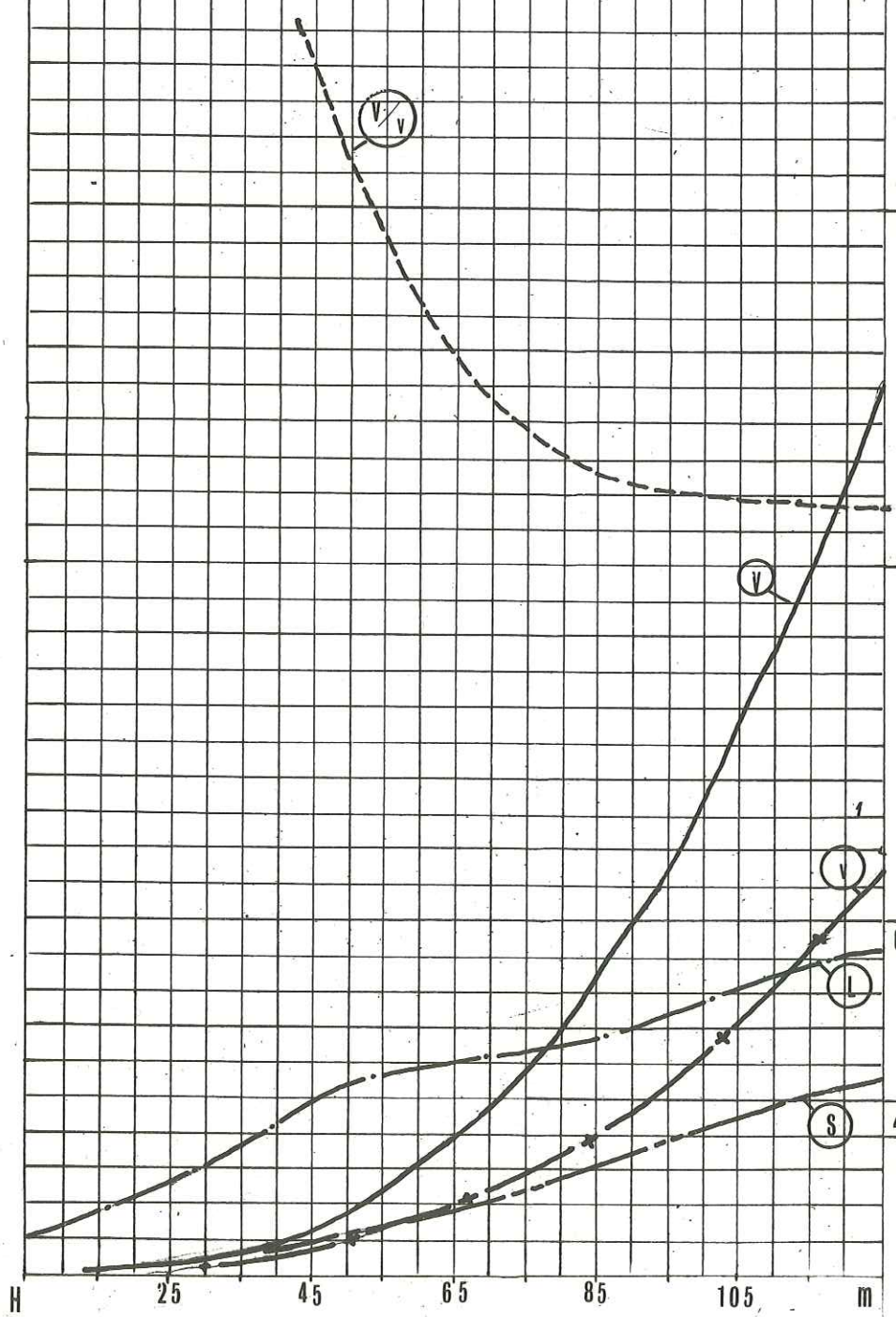
L'enrochement est un peu plus coûteux que la terre, mais les pentes sont plus raides pour les barrages en enrochements que pour les barrages en terre. Ceci nous amène à une estimation des rapports minimaux acceptables de 14,5 pour de grands barrages et de 12,4 pour de petits barrages.

Ces bases économiques sont indicatives mais assez valables et je ne crois pas que des économies sensibles puissent être faites à ce sujet dans l'exécution d'une étude. Une précision plus grande pourrait cependant être obtenue sans efforts ni coûts supplémentaires au moyen d'une standardisation et d'une programmation de cette analyse économique approximative. Dans une étude pluridisciplinaire réelle, il y aurait intérêt à faire établir ces bases par l'économiste et les spécialistes de Génie Civil. Cependant, comme il ne s'agit au fond que d'un critère de première élimination, nous pouvons accepter ici ces bases assez approximatives.

Le rapport V lac/V barrage n'est pas une constante de l'aménagement considéré. Il varie en fonction de la hauteur du barrage selon une loi particulière à chaque cas (voir fig. 5.2.1. ci-après. Exemple de fiche physique de retenue).

Il est donc nécessaire lors d'une première élimination de déterminer une règle pour fixer la hauteur à considérer. Pour ceci, j'ai dû faire intervenir l'hydrologie, très approximativement il est vrai. J'ai considéré les précipitations sur la base de la carte approximative des isohyètes établies lors d'études partielles précédentes et des ruissellements pris en compte par certains barrages de Thessalie qui avaient déjà été étudiés auparavant. Au cas où de telles bases partielles ou approximatives n'auraient pas existé, il aurait été possible de faire des suppositions sur les ruissellements plausibles. Ce procédé est très approximatif et lors de l'étude hydrologique plus précise, j'ai reconsidéré les cas un peu douteux de retenues éliminées lors de ce premier filtrage. Sur ces bases donc, j'ai procédé au recensement systématique des sites de barrages possibles.

Figure 5.2.1: Exemple de fiche physique de retenue



v | V | V/v
L | S

H	S	V	v	V/v
125	5,50	253	5,71	36,7
105	4,20	156	3,51	36,6
85	3,00	84	1,98	35,1
65	1,79	37	0,98	28,7
45	0,92	11	0,29	11,3
25	0,15	1,0	0,05	
5				

revanche m

15 | 300 | 20
1,5 | 30

H hauteur de retenue en m.

S superficie de la retenue en km^2

V volume de la retenue en Hm^3

L longueur en crete du barrage en m.

v volume du barrage en Hm^3

10 | 200 | 40
1,0 | 20

5 | 100 | 60
0,5 | 10

4 | 2 | 1 | 0 | 2

site: **PILI**

rivière: **PORTAIKOS**

cote du thalweg (m): **255**

5.2.2. Indexation des sites

Pour un calcul à l'ordinateur, il est indispensable de désigner les sites de retenue de manière commode. Comme le calcul du bilan selon la méthode actuelle n'est concevable qu'avec un ordinateur assez élaboré d'une série scientifique, la désignation des entités à prendre en compte peut se faire par des identificateurs de cinq chiffres au maximum, pour respecter les règles du Fortran. Pour d'autres langues d'ordinateur, même dans les productions IBM, ce nombre de 5 peut être moins impératif, mais en tous cas, il est commode. Faire avec moins de chiffres est impossible. L'emploi d'un sixième chiffre est superflu. Ceci m'a amené à désigner les sites par un code numérique qui permet une prise en considération au moyen d'instructions logiques simples en langage automatique. Cette indexation est basée sur les caractéristiques suivantes :

- dimensions du bassin versant,
- cote de pied de barrage,
- cours d'eau principal du bassin versant auquel le site peut être rattaché.

J'ai adopté ce type de code après avoir essayé de placer en tête le cours d'eau principal, mais ce système s'est révélé incommode.

Pour la Thessalie, je suis donc arrivé à l'indexation suivante :

Premier chiffre : 3 Bassin versant supérieur à 150 km^2 (apport moyen annuel de première approximation supérieur à 38 Mm^3)

4 Bassin versant compris entre 80 et 150 km^2 (apport moyen annuel de première approximation compris entre 20 et 38 Mm^3)

5 Bassin versant compris entre 20 et 80 km^2 (apport moyen annuel de première approximation compris entre 5 et 20 Mm^3)

6 Bassin versant compris entre 5 et 20 km^2 (apport moyen annuel de première approximation compris entre 1,25 et 5 Mm^3).

Les chiffres 0, 1 et 2 ont été réservés pour les B. V. U. et 7, 8, 9 n'ont pas été utilisés.

Second chiffre : Niveau du pied de barrage. Cette caractéristique est importante car elle permet de reconnaître l'usage possible de l'eau ainsi stockée : irrigation de zones basses ou hautes, aspersion possible sans pompage ou non, etc.

Le code adopté est le suivant :

0	pied de barrage entre	0 et	100 m
1	" " "	100 et	200 m
2	" " "	200 et	300 m
3	" " "	300 et	400 m
4	" " "	400 et	500 m
5	" " "	500 et	600 m
6	" " "	600 et	700 m
7	" " "	700 et	800 m
8	" " "	800 et	900 m
9	" " "	au-dessus de 900 m	

Troisième chiffre : Cours d'eau principal auquel se rattache le site considéré. Pour la Thessalie, j'ai assez arbitrairement adopté la numérotation suivante : (pour une bonne compréhension, le lecteur devra se reporter à la planche 1 - Situation générale).

0 Haut Pinios, jusqu'au site de Kria Vrissi vers l'aval (inclus) ;

1 Cours d'eau du Koziakas et du Pinde, Portaïkos, Pliouris et autres torrents de la bordure sud ouest de la plaine ouest, jusqu'au Sofaditis exclu ;

2 Sofaditis et affluents ;

3 Enipefs et affluents ;

4 Cours d'eau des Antikhassia, Litheos, Neokhoritis et autres torrents de la bordure nord de la plaine ouest ;

5 Pinios et affluents dans la plaine ouest et les gorges entre Farkadhon et Amygdhalia ;

6 Haut Titarissios jusqu'à son entrée dans la plaine Est ;
7 Pinios et Titarissios dans la plaine Est et la région de Ghoni ;
8 Karla et Sikourion, plaines fermées ;
9 Bassins versants extérieurs, d'où des eaux pourraient être dérivées vers la Thessalie, ou qui peuvent être rattachées à la Thessalie (Akheloos, Aliakmon).

Si les deux premiers chiffres du code peuvent être généralisés sans encombre pour d'autres régions que la Thessalie, le 3e chiffre est beaucoup plus local. Il est cependant tout-à-fait concevable d'établir une subdivision analogue pour n'importe quelle région, ce qui fait que cette indexation peut aisément être transposée à d'autres régions. Elle offre l'avantage de pouvoir être maintenue tout au long de l'étude et de la réalisation du projet et d'être utilisable par un ordinateur électronique. Il me semble qu'elle est nécessaire de manière générale, car dans la plupart des cas le recensement des sites de barrages topographiquement concevables et leur tri font intervenir un assez grand nombre de sites, à condition évidemment que la recherche soit systématique et basée sur un examen méthodique des cartes, et non, comme je l'ai vu souvent, anarchique et basée sur des reconnaissances partielles de terrain.

5.2.3. Recensement des sites - Première élimination

Sur les bases indiquées ci-dessus, j'ai établi la liste des sites récapitulée dans le tableau 5.2.3. Ces sites sont indiqués, pour plus de clarté, sur la planche 2: Réseau Hydrographique - Sites de barrages inventoriés dans la région. Ce recensement a été fait manuellement, et il a fallu deux mois de travail d'ingénieur pour le faire. Rien ne s'oppose, dans l'état actuel de nos connaissances en informatique, à ce que l'on envisage une automatisation de la recherche des sites, par combinaison de l'ordinateur et de tables traçantes ou enregistreuses automatiques. Un tel programme pourrait être inclus aisément dans la procédure de rassemblement des données. Par combinaison avec le premier programme précédemment cité de classement économique approximatif des sites retenus, on arriverai directement à une liste déjà réduite de sites à envisager. Cette liste est légèrement différente de celle de l'étude réelle, mais ceci n'a pas une importance notable. Quatre vingt deux sites ont été examinés. Peut-être y a-t-il encore des oublis, mais il ne s'agit probablement pas de sites importants des séries 3 ou 4. Il serait étonnant que des sites de la série 5 aient été négligés. Ceci limite les oublis à la série 6, d'importance mineure.

L'emploi de programmes de recensement automatique n'aurait pas permis une précision plus grande, car pour cela il aurait fallu disposer de bases topographiques plus précises. Par contre, de tels programmes auraient permis une sélection plus constante et plus fidèle, car les variations subjectives des critères d'appréciation sont éliminées. Un autre avantage de ces programmes est le gain de temps, qui représente une économie appréciable.

On pourrait envisager de prendre comme B.V.U. les bassins versants successifs des sites de barrages topographiquement intéressants. Mais l'analyse topographique de la Thessalie a confirmé ce qu'un raisonnement général amène à penser : dans un resserrement de vallée donné, on a souvent plusieurs sites de barrages topographiquement intéressants, proches les uns des autres, dont un seul sera éventuellement choisi. Les bassins versants totaux de chacun de ces sites sont assez voisins, mais peuvent différer de quelques kilomètres carrés; D'où l'introduction non forcément souhaitable d'une hétérogénéité supplémentaire dans la taille des B. V. U. Et si nous voulons prendre comme B. V. U. les bassins versants propres de chaque site, nous avons un assez grand B. V. U. pour le site le plus à l'amont et des B. V. U. bien plus petits vers l'aval, qui correspondent aux sites successifs du même resserrement de vallée. Dans ce cas le petit bassin versant compris entre deux sites de barrages successifs dans le même resserrement peut difficilement être considéré comme une unité d'aménagement. Sa prise en compte comme B. V. U. allonge le temps d'ordinateur nécessaire sans apporter d'avantages en contrepartie.

Nous devons donc éliminer un certain nombre de ces sites de barrages de la liste des points de fermeture obligatoire sur des nombres entiers de B. V. U. Ceci ne peut guère être effectué entièrement par des procédures automatiques, dans l'état actuel de nos connaissances. Une recherche d'automatisation pourrait cependant être faite et combinée à la précédente. Elle permettrait d'alléger la liste initiale des sites pris en considération. Pour la Thessalie, nous aboutissons "manuellement" à la première élimination suivante :

- huit sites ont été éliminés immédiatement pour des raisons géologiques, à l'occasion de visites diverses, au début de l'étude ;
- deux sites ne sont pas pris en considération pour l'étude actuelle pour des raisons de simplicité,

N°	Nom	Cours d'eau	Code	Bassin versant km2	Apport annuel V hm3	Barrage Type(1)	Barrage Volume V hm3	V/v	Remarques
1	Parapotamos	Pinios	300 01			R			Barrage intéressant pour la plaine de GONNI et pour la production d'électricité
2	Ambelia	Enipefs	313 01	521	81	R	0.58	140	Barrage le plus aval possible sur l'ENIPEFS Site étudié précédemment
3	Neokhori	Neokhoritis	314 01	162	37	T	1.28	29	Site étudié précédemment
4	Damassi 1	Titarissios	316 01	1569	—	—	—	—	Site étudié précédemment. Eliminé pour raisons géologiques
5	Kria Vrissi	Pinios	320 01	983	550	T	11,8	47	Site aval exteme sur le HAUT PINIOS. Etudié précédemment
6	Smoukovo	Sofaditis	322 01	382	145	R	2.7	54	Site etudié précédemment
7	Palio Dherli	Enipefs	323 01	405	63	T	1.7	37	Remplacement de 313 01
8	Kefalovrisson	Titarissios	326 01	686	154	T	0,5	34	Site étudié précédemment-Hauteur limitée (karst)
9	Kaloudha	Voulgara	326 02	476	107	T	2,43	44	Remplacement de 326 01
10	Elasson	Elassonitikos	326 03	221	—	—	—	—	Site étudié précédemment-Eliminé sur premier examen géologique
11	Mavros Vrakhos	Mourganis	330 01	247	138	T	5.1	27	Remplacement de 320 01
12	Kalomira	Malakassiotikos	330 02	199	111	T	7,7	10	Remplacement de 320 01-A la limite de l' économique
13	Korakofolia	Voulgara	336 01	281	63	T	0,76	83	Remplacement de 326 02
14	Megalos Lakkos 1	d°	336 02	276	62	T	0,71	87	Remplacement de 336 01. Hauteur limitée (karst)
15	d° 2	d°		276	22	T	0,17	124	Remplacement de 336 01. Hauteur limitée (karst - retenue : 22 Hm3)
16	Vouvala	d°	336 03	240	54	T	0,1	47	Remplacement de 336 02. Hauteur limitée (relief - retenue : 5 Hm3)
17	Palaeomonastiro	Elassonitikos	336 04	209	76	T	3,4	22	Remplacement de 326 03
18	Kniias	Lianopotamos	336 05	179	40	T	0,9	47	Remplacement de 326 01
19	Matoneri	Malakassiotikos	340 01	168	94	T	4,4	21	Remplacement de 330 02
20	Kriminitsa	d°	340 02	158	88	T	0,4	24	Remplacement de 340 01 - Prévu comme retenue partielle
21	Asproklissia	Mourganis	350 01	213	119	T	1,3	20	Remplacement de 330 01 - Prévu comme retenue partielle
22	Messokhora	Akheloos	369 01	651	—	—	—	—	Bassin extérieur à la région, pouvant y etre dérivé. Variante non considérée ici.
23	Gardhiki	d	379 01	71					
24	Kedhros (2)	Sofadhitis	412 01	111	42	R	2.2	19	Site extrême aval sur le SOFADITIS. Retenue limitée à apport aval 32201
25	Theopetra	Ljtheos	414 01	116	42	T	1.4	30	Site étudié précédemment
26	Mouzaki	Pliouris	421 01	14	143	R	3.4	42	Site étudié précédemment
27	Pili	Portaïkos	421 02	1 7	154	R	4,2	37	Site étudié précédemment
28	Ayioneri (2)	Elassonitikos	426 01	148	21	T	0.5	42	Site etudie précédemment Hauteur limitée (relief)
29	Aforismos (2)	Paleomandano	426 02	81	18	T	0,6	21	Site considéré pour 12 Hm3 (V_v max)
30	Batra	Klinovitikos	430 01	146	82	T	5,5	15	Remplacement de 320 01
31	Skopja	Bravras rema	433 01	93	—	—	—	—	Eliminé sur premier examen géologique karst
32	Likoudhi	Lianopotamos	436 01	143	32	T	0.4	73	Remplacement de 336 05
33	Yannota	Mouradha	436 02	136	—	—	—	—	Eliminé sur premier examen géologique karst
34	Andria	Klinovitikos	440 01	108	56	T	1.6	35	Remplacement de 430 01
35	Kalimani	Elassonitikos	446 01	138	50	T	2,2	23	Remplacement de 336 01
36	Yerakari	Mikanis	470 01	88	49	T	0,4	57	Retenue limitée à 21 Hm3 relief
37	Kato Kerassea	Xerias rema	508 01	26	4	T	0.9	4	Sans intéret économique
38	Ayia	Mega rema	509 01	43	6	T	0.1	79	Eliminé sur premier examen géologique karst
39	Pournarion	Kakkara rema	513 01	54	8	T	0,4	19	
40	Farsala	Aiklis rema	513 02	39	6	T	1,2	5	Sans intéret économique
41	Kondhro Tsouma	Mourgaya	514 01	53	12	T	0.8	15	
42	Vlakhoyianni 1	Smoliotikos	516 01	58	13	T	0,5	29	
43	Damassi 2	Galougavra rema	516 02	36	—	—	—	—	Eliminé sur premier examen géologique karst
44	Gonni	Rema dhia Doudion	517 01	34	8	T	2,2	4	Sans interet economique
45	Dafnospilia	Kalendsis	521 01	65	25	T	2.4	10	Intéret économique limite
46	Rakhoula	Karambalis	521 02	58	22	T	1,3	17	
47	Batso	Batso rema	524 01	24	13	T	2,3	6	Sans intéret économique
48	Vlakhoyianni 2	Karkatseli rema	526 01	26	6	T	0·7	9	Sans intéret économique Dérivation vers 51601 a envisager
49	Dhomenikon	Drafous rema	526 02	25	6	T	1·0	6	Sans intéret économique
50	Kalivia	Kastaniotikos	530 01	77	3	T	1·0	8	Sans intéret économique
51	Kondro Magoula	Karaman rema	537 01	45	16	R	1,1	15	Intéret économique limite
52	Amarandon	Kastaniotikos	540 01	62	35	R	5,3	7	Sans intéret économique
53	Metallion	Zarmando rema	543 01	43	15	T	0,9	16	
54	Karabournou	Elassonitikos	546 01	47	17	T	1.2	39	Remplacement de 336 04
55	Filiadhon	Vergoremha	553 01	46	7	T	0,5	14	
56	Kastri	Paleomandano	556 01	57	14	T	0.4	37	
57	Imeradhia	Mokratis rema	556 02	45	10	T	2,0	5	Sans intéret économique
58	Sarandaporon	Sarandaporou rema	556 03	48	11	T	1,3	8	Sans intéret économique
59	Loutron	Mouradha rema	566 01	70	—	—	—	—	Eliminé sur premier examen géologique karst
60	Aloni	Sarandoporou rema	566 02	44	10	T	0.6	17	
61	Paraskevi	Potamia rema	569 01	24	6	T	0,4	15	
62	Koutsofliani		570 01	26	15	T	0,2	75	
63	Gondres	Mouradha	576 01	33	7	T	0,4	17	
64	Pirgos	Karpeniotikos	611 01	16	6	T	0,9	7	Sans intéret économique
65	Skoufas		613 01	16	—	—	—	—	Eliminé sur premier examen géologique karst
66	Velesiotai		623 01	15	—	—	—	—	Eliminé sur premier examen géologique karst
67	Stefanovounon		636 01			T	0,2		
68	Perivolion 1	Boughazi rema	642 01	12	5	T	0,35	14	Site etudié précédemment
69	Makro Livadhon	Palamou rema	643 01	11	4	T	0.3	13	
70	Nea Makrissi	Klimatorema	643 02	11	4	T	0,2	20	
71	Ayios Yeoryos	Zarmando rema	643 03	10	4	T	0,4	10	Site etudié précédemment
72	Toumbana	Papoutsi rema	646 01	11	3	T	0.1	30	
73	Mikro Elefterokhori	d°	646 02	3	1	T	0.1	10	Sans intérêt hydrologique
74	Perivolion 2	Dhereliotis rema	652 01	14	5	T	0,4	13	Site etudié précédemment
75	Patliakon 1	Slodhota rema	656 01	16	4	T	0.6	6	Sans intéret économique
76	Patliakon 2	Veladhana rema	656 02	16	4	T	0.5	8	Sans intéret économique
77	Katista	Gourgoula rema	656 03	15	3	T	0,5	6	Sans intéret économique
78	Livadhion		656 04	12	3	T	0.5	6	Sans intéret économique
79	Dovra	Veladhana rema	666 01	14	3	T	0.5	6	Sans intéret économique
80	Livadheron	Mokratis rema	686 01	16	4.	T	0,3	13	
81	Flamboura	Kimoura rema	686 02	14	—	—	—	—	Eliminé sur premier examen géologique karst
82	Akri		686 03	5	1	T	0.1	10	

1 T = terre R= enrochement

2 bassin versant limité au premier site à l'amont

tableau **5.2.3**

sites de barrage considérés

car la dérivation de l'Akhellos sur la Thessalie est une variante technique qui oblige à reconsidérer le problème du bilan hydrologique ;

- dix sept sites sont sans intérêt économique (ils auraient pu être éliminés automatiquement par l'application combinée des programmes cités ci-dessus).

Il reste encore 55 sites, ce qui, si l'on arrêtait la première sélection à ce stade, obligerait à maintenir au moins autant de groupes de B. V. U., dont certains se révèleront peut-être superflus par la suite.

Il m'a donc paru nécessaire de procéder à une première élimination géologique systématique parmi les sites résiduels et j'ai été inspecter chacun d'eux. A la suite de cette inspection rapide, j'ai pu éliminer les sites suivants, car les retenues ou les sites étaient dans des calcaires karstiques :

336-01 Korakofolia, sur la Voulgara,
336-02 Megalos Lakkos, axe 1, seule subsistant la possibilité d'une retenue réduite, d'ailleurs très économique sur l'axe 2 ;
336-03 Vouvala,
446-01 Kalimani,
509-01 Ayia,
546-01 Karabournou,
566-01 Loutron.

Il reste donc 48 sites en considération, à l'issue de la première élimination économique et géologique. Ceci ne veut pas dire que ces 48 sites sont tous à construire. Leurs intérêts économiques sont divers et s'ils n'ont pas été écartés pour des raisons géologiques, ceci veut seulement dire qu'il n'a pas été possible de les éliminer sur la base d'une seule inspection.

Il est certainement encore possible d'éliminer un certain nombre de sites avant de passer à leur étude plus poussée. Ainsi dans le tableau 5.2.3., nous pouvons voir qu'un certain nombre de sites sont retenus comme "remplacements" ou "relais" de sites plus aval. Si l'on est certain de la possibilité de certains sites, au point de vue géologique, on peut éliminer leurs remplacements. Il sera peut-être nécessaire cependant de les reprendre en considération comme points de fermeture de B. V. U. si le bassin versant du site de barrage retenu est trop étendu pour qu'il soit possible de le considérer comme un seul B. V. U. La première inspection systématique des sites et de la lecture attentive des études partielles précédentes, amènent aux conclusions suivantes :

300-01 Parapotamos, posait des problèmes mais n'est pas nécessairement à éliminer ;
313-01 Ambelia n'est pas un site certainement possible, d'où la nécessité de maintenir 323-01 Paleo Dherli ;
320-01 Kria Vrissi est raisonnablement certain, ce qui permettait de ne plus envisager :
330-01 Mavros Vrakhos,
330-02 Kalomira,
340-01 Matoneri (sauf comme petit barrage d'intérêt local),
430-01 Batra,
440-01 Andria (sauf comme petit barrage d'intérêt local),
326-01 Kefalovrisson est très problématique, ce qui obligeait à conserver ses remplacements;
326-02 Kaloudha risque d'être limité par un col assez bas, à l'amont du site en rive droite, dans des formations continentales assez silteuses. Ses relais et remplacements ne doivent donc pas être éliminés. Mais ici intervient le souci d'équilibre des dimansions des B. V. U. : juste à l'amont de Kaloudha, il existe de nombreuses possibilités très proches les unes des autres :

a. - Sur la Voulgara, à l'amont du confluent avec le Lianopotamo :

Code	Nom	Cours d'eau	Surface du B.V.(1) (km^2)
556-02	Aloni	Sarandoporou Rema	43,5
686-02	Livadheron	Mokratis Rema	16,5
336-02	Megalos Lakkos (axe 2)	Voulgara	216

(1) - bassins versants propres, sites amont déduits.

b. - Sur le Lianopotamo, à l'amont du confluent avec la Voulgara :

Code	Nom	Cours d'eau	Surface du B.V. (1) (km^2)
436-01	Likoudhi	Lianopotamo	143
336-05	Knias	Lianopotamo	25
646-01	Toumbana	Affluent du Lianopotamo	11

(1) - bassins versants propres, sites amont déduits.

L'hétérogénéité de ces bassins versants est évidente et nous voyons bien qu'il est illogique de maintenir tous ces sites comme points de fermeture obligatoire de B. V. U. Il est aussi impossible d'attendre d'avoir choisi définitivement les sites de barrage à construire pour l'aménagement et d'éliminer ainsi tous les autres sites comme points obligatoires de fermeture. En effet, il faut avoir déterminé les bilans possibles et l'aménagement optimal pour connaître les sites de barrage à aménager réellement, et nous entrerions dans un cercle vicieux. Ce type de critères de délimitation des B. V. U. est donc insuffisant.

Seule l'utilisation des autres règles énoncées en 1.3.2. permet d'éviter cette impossibilité. Mais ceci exige une étude topographique basée non plus sur les resserrements du relief le long du réseau hydrographique, mais sur le relief dans son ensemble, ce qui nous amène à la carte des pentes.

J'ai donc récapitulé pour mémoire sur la planche n° 3 les 45 sites de barrage résiduels après cette première élimination.

5.3. Carte des pentes - Délimitation des B. V. U.

5.3.1. Carte des pentes - Chevelu - B. V. U.

J'ai alors repris l'analyse des cartes au 1/50 000 en cherchant à délimiter les zones de pentes moyennes correspondant aux 6 classes définies dans la première partie (voir point 6.2).

Pour la recherche des limites de B. V. U., je n'ai considéré que la limite entre terrains de pente moyenne supérieure à 20 % et terrains de pente moyenne inférieure à 20 %.

Avant tout autre commentaire, il me paraît nécessaire de souligner que jusqu'à ce point de l'analyse, la géologie a systématiquement été laissée de côté - exception faite de l'élimination de certains sites de barrages à l'occasion de premières visites rapides - dans les cas évidents.

L'examen des planches permet d'isoler un certain nombre de zones plates ou à relief peu accentué (Thessalie Ouest, Thessalie Est, Karla) et des bassins "satellites", dont les plus importants sont Dhomokos-Xinias, au Sud, Olimbos et Dheskati au Nord.

A l'aide de la carte des pentes, combinant l'analyse des pentes et le chevelu des crêtes, il m'a été possible, finalement, de délimiter les B. V. U. sur la base des critères suivants : (voir planches n° 4 pour la région et 4e pour l'exemple de base).:

- les sites de barrage situés à l'aval immédiat des zones potentielles de culture sont obligatoirement des limites aval de bassin versant élémentaire, que le barrage soit possible géologiquement ou non ;

- les sites de barrage non éliminés à la suite des considérations de 5.2.2. sont généralement des limites aval de groupes de bassins versants élémentaires. Ceci est vrai en particulier des sites périphériques des séries 5 et 6 (bassins versants 20-80 km^2 et 5-20 km^2). Cependant, l'emplacement de certains des barrages dont la capacité de stockage est notablement inférieure à l'apport annuel moyen n'ont pas été retenus comme points de fermeture.

Ces petits B.V. U. périphériques seront en général d'une grande simplicité en ce qui concerne le bilan hydrologique. Les considérer dès le stade de l'étude préliminaire ne complique pas réellement le problème.

- les grands bassins versants, qu'il s'agisse de plaines (Thessalie occidentale par exemple), ou de montagnes (site de Kria Vrissi 320-01, par exemple), doivent être subdivisés suivant le chevelu des crêtes. Ceci permet d'avoir au moins une délimitation correcte pour le ruissellement ; en ce qui concerne

les eaux souterraines, cette subdivision suivant le chevelu des crêtes n'est pas plus mauvaise qu'une autre - par exemple les subdivisions administratives -. Quant à l'organisation de l'agriculture, on peut l'étudier selon ce cadre, même si il est plus commode, à première vue, de l'étudier dans le cadre administratif de départements ou communes.

Il serait utile de chercher à systématiser ces critères de choix afin de permettre une automatisation du découpage en B. V. U. Ceci est abordé en 5.3.3. ci-dessous.

5.3.2. Indexation des B. V. U.

Dans ces conditions, et pour les mêmes raisons que celles indiquées pour les barrages, une indexation analogue à celle adoptée pour les barrages devient indispensable. J'ai donc défini un code complémentaire de celui des barrages basé sur les caractéristiques suivantes :

- niveau moyen des parties planes (pente moyenne 0 - 20 %) ;
- cours d'eau ou bassin versant principal ;
- nature : bassin versant périphérique ou "primaire", ne comportant pas de bassin versant amont, bassin versant secondaire n'ayant que des bassins versants périphériques à son amont, bassin versant tertiaire, ayant une combinaison de bassins versants périphériques et secondaires à son amont, bassins versants quaternaires, situés dans les plaines, à l'aval de bassins des trois premiers types, etc.

D'où l'indexation suivante :

Premier chiffre :

0 niveau moyen des zones de pente inférieure à 20 %, supérieur à 500 m ;
1 niveau moyen des zones de pente inférieure à 20 % compris entre 200 et 500 m ;
2 niveau moyen des zones de pente inférieure à 20 % compris entre 0 et 200 m.

Second chiffre :

0 Haut Pinios jusqu'au site de Kria Vrissi 320-01 ;
1 Cours d'eau du Koziakas et du Pinde, Portaïkos, Pliouris et autres torrents de la bordure sud ouest de la plaine ouest, jusqu'au Sofaditis exclus ;
2 Sofaditis et affluents ;
3 Enipefs et affluents ;
4 Cours d'eau des Antikhassia, Litheos, Neokhoritis et autres torrents de la bordure nord de la plaine ouest ;
5 Pinios et affluents dans la plaine ouest et les gorges entre Farkadhon et Amygdhalia ;
6 Haut Titarissios jusqu'à son entrée dans la plaine Est ;
7 Pinios et Titarissios dans la plaine Est et la région de Gomi ;
8 Karla et Sikourion, plaines fermées ;
9 Bassins versants extérieurs voisins - unités faisant morphologiquement partie de la Thessalie.

Troisième chiffre : nature

0 bassin versant périphérique ;
1 bassin versant secondaire, n'ayant à son amont que des bassins versants périphériques ;
2 bassins versants tertiaires, situés dans des zones montagneuses et recevant des eaux de ruissellement de bassins versants secondaires ou périphériques ;
3 bassins versants quaternaires situés dans les plaines ou les montagnes et recevant de l'eau de bassins versants tertiaires, secondaires ou périphériques.;
4, 5, 6, 7 etc., avec quelques adaptations pour ne pas dépasser un total de 10 degrés.

De plus, comme il est peu probable que lors de l'étude préliminaire il y ait plus de 9 bassins élémentaires dans chaque série définie par ces trois chiffres, j'ai numéroté ces bassins versants élémentaires d'étude préliminaire de 10 à 90, ce qui permet de conserver ce code dans la suite de l'étude et même lors de l'exécution ; et de subdiviser chacun des bassins versants élémentaires d'étude préliminaire en 9 bassins versants élémentaires d'avant-projet, si cela s'avère nécessaire pour une plus grande précision.

Ce type de code est transposable aisément à n'importe quelle région en général, moyennant des adaptations quant à la signification du second chiffre et peut-être du premier en fonction des caractéristiques géographiques de cette région.

Il peut paraître compliqué. A quoi bon en effet s'encombrer la mémoire de chiffres, même s'ils sont logiquement assemblés quand des noms propres peuvent mieux accrocher la mémoire, avec un peu d'habitude et une bonne connaissance de la région.

Evidemment, il est sans intérêt pour le lecteur de se remémorer les détails de la codification définie ci-dessus. Mais nous ne devons pas oublier que la complexité du problème impose l'utilisation de calculatrices électroniques. Et une telle codification logique facilitera le calcul, en "boule de neige" d'amont vers l'aval, par agglutinement de bassins versants élémentaires périphériques, puis primaires, secondaires, et ainsi de suite. Le bassin versant élémentaire joue le rôle d'une "maille" de modèle mathématique et sa dénomination par code facilite son introduction dans le calcul ou la modification des paramètres le caractérisant. On pourrait, certes, garder des noms propres. Mais ces moyens ne peuvent pas donner simultanément tous les renseignements que le code fournit et doivent être complétés par une description souvent assez longue. De plus, les noms propres ont un nombre variable de lettres, ce qui les rend incommodes et même quelquefois impropres pour un emploi comme indice.

L'application de ce code nous amène à la liste de B. V. U. du tableau 5.3.2.

Nous avons donc 104 B.V.U. Leurs dimensions sont encore disparates, mais il serait illusoire pour une étude préliminaire d'essayer de subdiviser encore les grands B. V. U. Grouper plus que je ne l'ai fait les petits B. V. U., en particulier dans les montagnes, n'est guère possible, car cela amènerait, soit à des B. V. U. très hétérogènes, soit à négliger un certain nombre de bassins versants de barrages (voir planche 4, pour l'ensemble de la région et 4 e pour l'exemple de base, avec indication sur cette dernière des sites de barrages inventoriés et retenus, des localités et du réseau hydrographique).

5.3.3. Commentaires - Essais de généralisation

Après cet exposé du mode selon lequel j'ai tenté de structurer la Thessalie et défini les B. V. U. pour l'étude préliminaire, il me reste à essayer d'extraire de cet exemple quelques règles d'action.

1° - Il n'est pas d'étude régionale possible sans une analyse topographique complète de la région. Cette analyse doit se baser sur les cartes existantes de la région et une échelle commode est le 1/50 000 pour les montagnes, avec report sur le canevas de base des cartes au 1/50 000, des cartes au 1/20 000, 1/25 000 réduites au 1/50 000 pour les zones de plaine, chaque fois que de telles cartes à grande échelle sont disponibles.

De toute manière, sauf s'il n'existe pas de cartes au 1/50 000 pour la région à étudier, il faut éviter de faire exécuter des documents topographiques généraux pour la région.

2° - Le premier but de l'analyse topographique est la structuration de la région et sa subdivision en B. V. U. Cette subdivision n'est d'ailleurs basée sur aucune autre analyse.

3° - L'analyse topographique doit commencer par la recherche de tous les sites de barrage topographiquement possibles et leur classement par ordre d'importance.

Ceci se fait par examen attentif des cartes au 1/50 000 et éventuellement des photographies aériennes et repérage de tous les resserrements de vallées situés à l'aval immédiat d'élargissements pouvant jouer le rôle de bassins de retenue.

Puis ces sites topographiques bruts doivent être incorporés dans un chevelu des crêtes de la région.

4° - Un premier choix doit alors être effectué parmi ces sites topographiques bruts, de manière à éliminer ceux qui manifestement ne présentent aucun intérêt pour l'aménagement de la région. Ce premier choix se base sur la position de ces sites, trop éloignés des zones d'utilisation ou d'importance trop faible. Simultanément une première évaluation grossière de l'apport moyen annuel de ruissellement doit être faite, pour éliminer certains sites qui ne permettraient pas malgré des conditions topographiques et une position acceptables, de stocker un volume d'eau intéressant. Cette première élimination est basée sur des critères qualitatifs ou très approximativement chiffrés. Il est donc essentiel de ne pas la considérer comme sans appel.

Nº	CODE	NOM	Nº	CODE	NOM
1	000 10	Haut Klinovitikos	56	257 20	Zarkos
2	000 20	Kastar[illegible]tikos	57	060 10	Haut Elassonitikos
3	000 30	Haut [illegible]ton	58	060 20	Lianopotamos
4	000 40	Koutsof[illegible]ani	59	060 30	Haut Sarandaporou
5	101 10	Malakass[illegible]otikos	60	060 40	Haut Paleomandano
6	101 20	Mikanis	61	060 50	Haute Mouradha 1
7	101 30	Klinovitikos	62	060 60	Haute Mokhratis
8	102 40	Mourganis-Pinios	63	060 70	Kallithea
9	110 10	Pliouris	64	060 80	Akri
10	110 20	Portaikos	65	060 90	Anthokhori
11	110 30	Kalendsis	66	061 10	Haute Voulgara
12	110 40	Karambalis	67	061 20	Haute Mouradha 2
13	110 50	Karpeniotikos	68	062 10	Basse Mouradha
14	210 10	Koziakas	69	062 20	Moyenne Voulgara
15	211 10	Pili	70	160 10	Smoljotikos
16	020 10	Perivolion 1	71	160 20	Dalougavra
17	020 20	Perivolion 2	72	161 10	Elasson
18	121 10	Xinias	73	161 20	Bas Paleomandano
19	122 10	Rendinotikos - Onokhonus	74	163 10	Basse Voulgara
20	173 10	Haut Sofaditis	75	164 10	Haut Titarissios
21	030 10	Aq. Yeorvos	76	165 10	Moyen Titarissios
22	130 20	Haut Kakkara	77	266 10	Bas Titarissios
23	130 30	Aiklis	78	070 10	Karaman
24	130 40	Palamourema	79	178 10	Parapotamos Pinios
25	130 50	Klimatorrema	80	270 10	Zappion
26	131 10	Zarmandorrema	81	270 20	Eleftérai
27	132 10	Haut Enipefs 1	82	270 30	Kiparissea
28	133 10	Haut Enipefs 2	83	270 40	Nika
29	134 10	Haut Enipefs 3	84	270 50	Agnanderi
30	140 10	Neokheritis	85	270 60	Mira
31	140 20	Litheos	86	270 70	Messorakhi
32	140 30	Mourgaya	87	271 10	Koussevassaniotikos
33	140 40	Panayitsa	88	277 10	Pinios Larissa
34	240 10	Rakha	89	277 20	Bas Titarissios
35	240 20	Paleonirgos	90	277 30	Terpsithea
36	240 30	Krinitsa	91	279 10	Ghoni
37	241 10	Voula	92	080 10	Marmarini
38	241 20	Basse Mourgaya	93	280 10	Avia
39	242 10	Bas Neokheritis	94	280 20	Sikourion
40	155 10	Moyen Enipefs	95	280 30	Megavouni
41	250 10	Krannon	96	280 40	Mega Monastiri
42	250 20	Petroporos	97	280 50	Agrokipption
43	250 30	Farkhadon	98	280 60	Kerassea
44	251 10	Kalendsis - Karambalis	99	281 10	Karla
45	251 20	Moyen Pliouris	100	090 10	Kariaï
46	251 30	Bas Litheos	101	090 20	Ag. Paraskevi
47	252 10	Pliouris-Portaikos	102	090 30	Kallipefki
48	253 10	Kalambaka	103	090 40	Yilofos
49	254 10	Bas Sofaditis	104	290 10	Potamia
50	254 20	Sarakina			
51	255 10	Kakkara			
52	255 20	Trikala			
53	256 10	Bas Enipefs			
54	256 20	Lipsima-Enipefs			
55	257 10	Koutsoheron			

TABLEAU 5.3.2

BASSINS VERSANTS UNITAIRES

(b . V . U)

5° - Simultanément à la recherche des sites de barrage, l'analyse topographique doit porter sur l'étude morphologique. Pour cela, il faut faire une carte de pentes faisant apparaître des aires de pente moyenne donnée.;

Ceci nous amène à une exploitation plus détaillée de l'analyse topographique à l'étude géologique régionale et aux reconnaissances géophysiques et géotechniques, dont le but est aussi, notons-le, de permettre de continuer l'élimination des sites de barrage.

Mais, avant de clore ce chapitre, il est utile de remarquer que les données à disposition étaient tout à fait correctes lors de l'étude réelle, pour la délimitation des B. V. U. En fait, le découpage de la région en B. V. U. a été légèrement différent de celui qui est proposé ici. En particulier dans les plaines, les B. V. U. étaient plus grands ; mais ceci n'est pas un inconvénient majeur. L'échelle des pentes choisie lors de l'étude réelle n'était pas celle qui est proposée ici, mais, en tous cas pour le découpage en B. V. U., ceci n'a pu avoir aucune importance, car la pente moyenne de 20 % était aussi une limite dans l'échelle des pentes de l'étude réelle.

CHAPITRE 6 - DELIMITATION DES AIRES ELEMENTAIRES

6.1. Introduction

Les aires élémentaires sont définies au moyen de critères de trois types :

1° - Critères topographiques :
- . chevelu des crêtes } selon commodité
- . réseau hydrographique }
- . pentes limites d'aménagement
- . altitudes et expositions limites d'aménagement

Les deux premiers critères sont à employer selon la commodité, en relation avec les critères géologiques et de finalité. Les autres critères sont en fait un aspect du critère de finalité.

2° - Un seul critère géologique, l'indice géologique superficiel ;
3° - Le critère de finalité.

Nous allons examiner dans ce chapitre le mode pratique de délimitation des aires élémentaires, et donc successivement, chacun des trois types de critères retenus.

6.2. Critères topographiques - Classe de pente moyenne

Le chevelu des crêtes et le réseau hydrographique sont d'une telle simplicité qu'ils se passeraient de commentaires. Leur trace peut se faire aisément par des procédés automatiques. Cependant, la décision quant à leur commodité d'emploi est d'automatisation délicate et un opérateur devra probablement intervenir. Ce critère n'est pris en compte qu'après la définition des autres lignes choisies comme critères de subdivision en aires élémentaires, et qui seront basées sur la géologie et la finalité. En effet, il ne doit être utilisé que pour organiser les aires élémentaires afin de rendre possible un calcul par agglomération cumulative d'amont vers l'aval.

L'altitude et l'exposition sont des caractéristiques très simples à déterminer. Elles n'interviennent dans la délimitation des aires élémentaires que comme expression d'une contrainte agronomique : la limite supérieure d'aménagement possible (limite de croissance des plantes). Elle s'exprime généralement par une altitude limite variant en fonction de l'exposition. Le tracé de cette ligne limite est d'une grande simplicité (et donc aisément automatisable) à partir du moment où la loi de variation de l'altitude limite en fonction de l'exposition est connue. Et nous supposons pour le calcul du bilan que c'est là une "donnée" du problème, fournie par les agronomes.

La pente limite au-delà de laquelle il n'est pas intéressant d'envisager un aménagement dépend, elle aussi, de données agronomiques. Mais les facteurs déterminants résulteront d'une estimation économique des difficultés techniques d'équipement (voies d'accès, préparation des surfaces, etc.). Elle variera en fonction de la géologie.

Pour déterminer cette ligne de pente limite, il est indispensable de préparer une carte des pentes (déjà utilisée, rappelons-le, pour la délimitation des B. V. U., mais avec un degré moindre de nécessité). Nous considérerons par ailleurs que les contraintes de difficultés d'aménagement sont des "données" du problème du bilan, fournies par les économistes et les ingénieurs de génie rural.

J'ai donc cherché à délimiter sur les cartes au 1/50 000 les aires pour lesquelles l'écartement des courbes de niveau étaient comprises entre les limites correspondant aux définitions des classes données au point 3.2.2. Les courbes de niveau ont pour la Thessalie, une équidistance de 20 m, ce qui amène aux intervalles graphiques suivants :

Classe 1 - 0 à 2 % de pente.
Ecartement graphique supérieur à 2 cm.

Classe 2 2 - 5 % de pente.
Ecartement graphique compris entre 2 cm et 8 mm.

Classe 3 5 - 10 % de pente.
Ecartement graphique compris entre 8 et 4 mm.

Classe 4 8 - 20 % de pente.
Ecartement graphique compris entre 5 et 2 mm.

Classe 5 20 - 40 % de pente.
Ecartement graphique compris entre 2 et 1 mm.

Classe 6 plus de 40 % de pente.
Ecartement graphique inférieur à 1 mm.

Ces écartements graphiques sont nettement discernables à l'œil nu, mais une détermination manuelle telle que celle que j'ai effectuée demande un travail très long et dans lequel des erreurs peuvent se glisser, en particulier une variation d'appréciation visuelle d'un point à l'autre de la carte.

Nous avons vu au chapitre précédent qu'un programme de détermination automatique de la carte des pentes était tout à fait concevable et ne reviendrons pas sur ce point.

A l'aide d'un examen visuel, j'ai donc établi la carte des pentes moyennes de la Thessalie, présentée ci-après (planches 5.1, 5.2, 5.3, 5.4. Cartes des pentes et des bassins versants unitaires et pour l'exemple de base, planche n° 5 e, carte des pentes).

Il apparaît sur cette carte un certain nombre d'enclaves de dimensions réduites et de digitations assez fines (crêtes, thalwegs) qu'il sera peut-être pratique et justifiable de négliger dans la caractérisation des aires élémentaires, sur les bases indiquées en 1.3.8.

6.3 Indice géologique superficiel. Nature, rappel du mode de détermination

Dans la première partie (points 1.3.5 et 3.3), nous n'avons pas, comme pour les classes de pente, été jusqu'à chiffrer cet indice, car il m'a semblé qu'il était trop particulier à la région en cours d'étude pour être fixé dans un exposé général. Nous avons vu pourtant qu'il pouvait être exprimé par des nombres qui,

- pour les sols meubles traduiraient l'appartenance de la tranche superficielle de sol à une bande déterminée de valeurs de la résisitivité, laquelle est directement liée à la granulométrie, et à la porosité du sol, ainsi d'ailleurs qu'à sa teneur en eau ;
- pour les roches non recouvertes d'une grande épaisseur de terrain meuble, ces nombres traduisent l'appartenance de la roche à un certain type de grain, de densité et de dimensions des fissures.

Dans ce groupement des divers sols et des diverses roches en catégories définies par un indice géologique superficiel on est tenté de faire intervenir la finalité prématurément, c'est-à-dire de chercher à relier les divers sols et les diverses roches rencontrées au ruissellement, à l'infiltration et à la rétention dans les conditions climatiques de la région. Ceci est très délicat et ne peut guère être réglé dans la généralité. Par conséquent, dans la première partie, je n'ai pas insisté sur ce point. Je me suis borné à définir un programme de reconnaissances et mesures qui me paraissaient nécessaires et commodes pour la détermination de l'indice géologique superficiel et à indiquer un cheminement à suivre pour l'exploitation des données résultant de ces reconnaissances et mesures (paragraphe 3.3).

6.4. Mesures effectuées pour la détermination de l'indice géologique superficiel, lors de l'étude réelle et données obtenues ultérieurement

6.4.1. La carte géologique

6.4.1.1. Documents existants

Les documents existants relatifs à la géologie régionale qui ont été utilisés pour la présente étude sont les suivants :

- carte géologique de la Grèce au 1/500 000 ;
- les roches basiques et ultrabasiques de la région de Velestinon. Thèse de Doctorat de S. ARANITIS (1956) (en grec) ;
- contribution à l'étude géologique de la Grèce du Nord : les confins de l'Epire et de la Thessalie (avec une carte géologique au 1/200 000) - Thèse de Doctorat ès Sciences de J. AUBOUIN, 1959 ;
- contribution à l'étude géologique du Pinde septentrional et d'une partie de la Macédoine occidentale (avec une carte géologique au 1/200 000) - Thèse de Doctorat ès Sciences de J. H. BRUNN (1956) ;
- Beitrage zur postmiozänen Entwicklungsgeschischte Thessalien (contenant une carte géologique au 1/200 000) - Thèse de Doctorat de H. SCHNEIDER (Université de Sarrebrück) (1967) ;
- reconnaissances géologiques pour la recherche de pétrole (1964-1966) effectuées par l'Institut de Géologie et de Subsurface (IGSR) d'Athènes et de l'Institut Français des Pétroles (IFP), et qui comprend :
  - . une carte géologique au 1/100 000 des plaines centrales (Est et Ouest) de la Thessalie et des premiers reliefs périphériques ;
  - . les résultats de reconnaissances gravimétriques et magnétométriques ;
  - . quelques coupes structurales des plaines de Thessalie ;
  - . les résultats de deux puits pétroliers de reconnaissance près du village d'Agnanderon en Thessalie occidentale ;
  - . une étude stratigraphique complète des roches existantes, basée sur des études de microfaunes ;
- rapport géologique de l'étude préliminaire d'aménagement du bassin de l'Aliakmon, effectué en 1963-1965 par un consortium de firmes allemandes d'ingénieurs conseils (Aliakmon Study Group) et qui comportait une carte géologique au 1/50 000 débordant sur la partie nord de la Thessalie (zone de Dheskati) ;
- études géologiques et géotechniques relatives à un réservoir artificiel envisagé dans la plaine de Karla, effectuées par M. ARANITIS (avril 1970) pour le compte du Ministère des Travaux Publics du royaume de Grèce, qui comporte en particulier une étude photogéologique au 1/50 000 et des levés géologiques au 1/20 000 de la partie Sud Est de la plaine de Thessalie orientale (Karla) ;
- reconnaissances hydrogéologiques du bassin de Kalambaka (Thessalie occidentale), contenant une carte géologique au 1/100 000 et une carte hydrogéologique à la même échelle. Thèse de Doctorat de G.A. KALERGIS, (en grec) Athènes (1970).

6.4.1.2. Travaux géologiques complémentaires effectués

Ces données étaient assez hétéroclites, quelquefois contradictoires et ne couvraient de toute manière pas l'ensemble de la région à étudier. Il a donc été nécessaire de procéder à un contrôle des données à disposition, à une homogénéisation de ces données, et à une extension des levés de manière à couvrir l'ensemble de la Thessalie.

Ce travail a été effectué en 1967 par une équipe de géologues d'Electro-Watt, S.A., Zurich, placée sous ma direction, et qui a comporté successivement trois géologues grecs, MM. KATSARAKIS, MOUROUTIS et POTAGAS (janvier - septembre 1966) et deux géologues français, stagiaires de 3e cycle de l'Institut Dolomieu, (Grenoble), MM. AIRAULT et BOISSIER (octobre - décembre 1966) que je tiens à remercier ici pour leur collaboration.

Ces travaux ont comporté l'établissement d'une échelle stratigraphique homogène, une analyse rapide des photographies aériennes à disposition (échelle approximatives 1/33 000 et 1/18 000) et des contrôles et levés sur le terrain. Un certain nombre des documents cités en 6.4.1.1. ont été mis à ma disposition après la fin des travaux sur le terrain. Je les ai pris en compte dans la mesure du possible et ai établi une carte

géologique au 1/100 000 de la Thessalie, dans l'optique d'une étude de bilan hydrologique, sur la base graphique de levés au 1/50 000.

Cette carte présentée au 1/200 000 dans les planches 6.1., 6.2., 6.3. et 6.4. pour l'ensemble de la Thessalie. Elle ne doit être considérée que comme un instrument de travail pour étude du bilan. Il n'est nullement question de lui attribuer une valeur générale.

J'ai par ailleurs maintenu au 1/100 000 la carte géologique de l'exemple de base (planche n° 6 e). On voit sur cette planche de détail des indentations nombreuses et un certain nombre d'enclaves de taille réduite. Si l'on ne considérait que l'indice géologique superficiel comme critère de délimitation des aires élémentaires, il y aurait déjà un problème de simplification du tracé des limites à résoudre. Ce problème sera encore aggravé par la prise en compte du critère de finalité (voir point 6,8,).

6.4.1.3. Echelle stratigraphique de référence

L'échelle stratigraphique de référence a été établie sur la base de l'étude stratigraphique de l'IGSR-IFP et des thèses de J. H. BRUNN (1956) et J. AUBOUIN (1949), légèrement modifiées en fonction de nos observations sur le terrain. En réalité, il s'agit plus d'une échelle pétrographique que d'une échelle stratigraphique à proprement parler. Elle est indiquée dans le tableau 6.4.1.3., avec schématisation de leur description lithologique ou morphologique, désignation des terrains d'altération superficielle les plus probables, du grain ou de la granulométrie et de la fissuration ou de la porosité. Pour les calcaires karstiques, j'ai indiqué une première estimation de la porosité "équivalente", ainsi désignée car elle a la même définition que la porosité des milieux granuleux mais s'applique à un milieu non granuleux.

Au-dessus de ces niveaux stratigraphiques, on ne rencontre plus que des formations meubles, alluvions fluviatiles ou lacustres et terrains d'altération entraînés le long des pentes ou laissés sur place, et qui se sont accumulés sur des épaisseurs variables pouvant parfois atteindre plusieurs centaines de mètres dans certaines plaines, en raison de leur subsidence encore active, depuis le Pliocène jusqu'à nos jours. Ces formations ne peuvent guère être différenciées stratigraphiquement. Aussi ai-je eu recours à une différenciation morphologique, indiquée ci-dessous. La classification de ces terrains meubles est basée sur leur position et sur leur nature. Chacun de ces critères s'exprime par un symbole :

Pour la position, les classes sont les suivantes :

b	produits d'altération non différencié ;
b_0	produits d'altération en place,
b_1	produits d'altération non en place, coulés au pied des pentes,
e	éboulis,
a	alluvions non différenciées,
a_1	alluvions récentes,
a_2	alluvions anciennes, éventuellement en terrasses.

La nature des terrains constituant ces divers dépôts continentaux meubles holocènes et plio-pléistocènes est exprimée par un second symbole, juxtaposé au premier qui désigne le caractère principal du terrain et dont la liste est indiquée ci-après :

A	éléments grossiers, blocs anguleux de grande taille (pouvant atteindre 1 m) ;
P	éléments grossiers roulés (cailloux, dimension maximale 15 cm) ;
G	éléments graveleux (dimension maximale 2 cm) ;
S	éléments sableux (dimension maximale 2 mm) ;
M	éléments silteux, fins, non plastiques (compris entre 2 et 80 microns) ;
C	éléments argileux, fins, plastiques (inférieurs à 2 microns).

AGE		DESIGNATION	SYMBOLE	Nature lithologique ou description morphologique	Alteration superficielle	Grain ou granulometrie	Fissuration ou porosite	Dimension des pores ou fissures
PALEOZOIQUE	Pelagonien	Cristallin indifferencié sauf marbres	Crs	Ensemble des formations cristallines décrites ci-dessous	Sable ou argile	Variable, de grossier a très fin	Variable, en général assez dense	Variable, en général assez étroites
		Schistes cristallins	Sch	Alternance à stratification très nette de bancs durs (quartzites micacés ...) et de bancs tendres (Sericitoschistes, chloritoschistes, etc...)	Argiles et plus rarement, sables, argiles sableuses.	Fin, en général	Assez dense	Fines, colmatées rapidement (2 à 6 m), sauf dans les quartzites
		Gneiss	Gn	Gneiss clairs à hornblende. Structure zoïlée fréquente, Leptynites sericiteuses. Aplites	Sable, sable argileux	Variable, souvent grossier.	Assez dense	Fines, de quelques cm à la surface à quelques mm à 2m de profondeur. Sensibles jusqu'à 10m env.
		Granites	γ	Granites clairs, à gros cristaux de Feldspath (orthose) Quartz et Feldspath, altérés dans forme propre. - Hornblende localement chloritisée	Sables, sables argileux	Assez grossier	Assez dense	Fines (quelques cm à la surface) - Sensibles jusqu'à 20 ou 30 m.
		Cristallin ultrabasique	UB	Amphibolites, serpentines	Argile plastique	Fin à très fin	Dense	Fines, colmatées rapidement
				Dioritoïdes, gabbros	Sables sombres argileux	Grenu à fin		Fines
				Calcschistes	argiles gris sombre	fin		Assez larges, haute porosité
		Marbres indifferenciés	Mr	Ensemble des marbres décrits ci-dessous	Terra rossa en général enlevée par le ruissellement et l'infiltration karstique	Variable, en général saccharoïde	Dense - Porosité équivalente variant de 2 à 8% env.	Elargies par dissolution (Karst de fissures) - Reseau hydrographique souterrain diffus
		Marbres en bancs intercalés dans	Mrp	Marbre paleozoïque en bancs de quelques m. intercalés dans le cristallin	analogue à Mr	analogue à Mr	analogue à Mr Porosité equivalente variant de 2 à 4% env.	analogue à Mr
		Marbres massifs	Mrm	Marbres "triasiques", bréchiques et bigarrés à la base, blanc au sommet - épaisseur max 500 m -	analogue à Mr	analogue à Mr	analogue à Mr Porosité equivalente variant de 2 à 8% env.	analogue à Mr
TRIAS MOYEN-SUPERIEUR JURASSIQUE	Subpelagonien ultrapindique	Ophiolites indifferenciées	Oφ	Peridotites, serpentines, gabbros, diorites, dunites harzburgites, lherzolites, pyroxenites - épaisseur max. 2000 m	Argiles sombres, plus ou moins sableuses, sables noirs	En général fin, quelquefois grenu	Variable	Variable
		Diabases Diorites Gabbros	δ	Diabases, diorites, gabbros, dunites, harzburgites, lherzolites - partie de Oφ -	Argiles sableuses sombres et sables argileux	quelquefois grenu	dense	Fines, sensibles jusqu'à 20 ou 30m
		Péridotite	π	Peridotites, pyroxenites Ophites, dolerites - partie de Oφ -	Argiles brun sombre	fin	dense	Fines, sensibles jusqu'à 30m et plus.
		Serpentine	σ	Serpentinites peridotites serpentinisées - partie de Oφ -	Argiles brun sombre	fin à colloïdal	dense	Fines, rapidement colmatées
	Ultrapindique & pindique	Radiolarites	Jsh	Pélites argilomicacées rouges - jaspes à radiolaires - Présence de grès	Argiles brun rouge	fin à colloïdal	variable selon la tectonisation	Fines, colmatées à faible profondeur
		Pélites argilomicacées	Jp	Roches à grain très fin, à débit schisteux, brun rouge	Argile brun rouge	fin à colloïdal	analogue à Jsh	analogue à Jsh
		Jaspes	Jj	Roche dure silexoïde avec radiolaires à cassure conchoïdale	Eclats silexoïdes	fin	analogue à Jsh	analogue à Jsh
		Calcaire indifferencié	Jk	Somme de Jkp, Jkm Jkk, et Jko	Variable	Variable	Variable	Variable
	Pindique	Calcaire en plaquettes et jaspes - Pinde -	Jkp	Calcaire en plaquettes minces avec lits de pélites et de jaspes intercalés en unités pouvant atteindre des dizaines de m. d'épaisseur.	Petits cailloux de calcaires, argile rouge, jaspes	fin	assez dense ; porosité equivalente 2 à 3% environ	Assez fines, avec faible karstification
	Ultrapindique	Calcaire mylonitisé	Jkm	Calcaire mylonitisé avec remplissage de phyllites vertes. Métamorphisme tectonique local	Argile grise à cailloux calcaires.	peu sensible	peu sensibles	colmatées
		Calcaire massif	Jkk	Barres calcaires, graveleux à oolithique, à ciment microcristallin ou cristallin. Faciès portoïs bréchique	Terra rossa, en général enlevée par le ruissellement et l'infiltration karstique	assez grossier	assez dense - présence de dolines, porosité equivalente 4 à 8% env.	larges, de quelques cm à quelques dm. Karst de fissures avec possibilité de reseau souterrain
	Sub pelagonien	Calcaire d' Omvriaki	Jko	Calcaires graveleux à polypiers, massifs à la base, en bancs gris, fins au sommet	analogue à Jkk	analogue à Jkk	analogue à Jkk	analogue à Jkk
CRETACE	Pindique	Flysch albien	Kf	Grès et couches gréso-argileuses. Existence controversée (Brunn - I.F.P.)	argiles, argiles sableuse	grossier à moyen	variable, selon la tectonisation	Vraisemblablement colmatées à faible profondeur sauf dans quelques bancs gréseux (petites sources)
		Calcaire de Thimiama	Kp	Calcaires en bancs de 40 à 50 cm d'épaisseur, à faciès microbréchique - série très épaisse -	Argile, terra rossa, en général enlevée par le ruissellement et l'infiltration karstique	moyen à fin	Variable, selon la tectonisation. Porosité equivalente 4 à 8% env.	Moyennes à larges (dissolution) - Morphologie karstique très nette.
	Subpelagonien	Calcaire indifferencié	Ks	Somme de Ksm Kss Ksp	Argile terra rossa, en général enlevée par le ruissellement et l'infiltration karstique	Variable	Variable, mais assez dense, Porosité equivalente 4 à 8% env.	Moyennes à larges (dissolution) - Morphologie karstique très nette (Karst de fissures probable)
		Calcaire marmorisé	Ksm	Calcaire massif gris ou blanc, cristallisé ou recristallisé.	analogue à Ks	Saccharoïde	analogue à Ks	analogue à Ks
		Calcaire gris sublithographique & microbréchique	Kss	Calcaires massifs gris ou blanc, quelquefois rose, quelquefois lités, en bancs épais (5 à 30m)	analogue à Ks	grenu à fin	analogue à Ks	analogue à Ks
		Calcaire en plaquettes	Ksp	Calcaires lités ou feuilletés	analogue à Kp	analogue à Kp	analogue à Kp	analogue à Kp
PALEOCENE		Flysch subpélagonien	Fs	Grès calcaires, marnes argileuses micacées, assez intercalations de grès fins, schistoïdes et de calcaires - Quelquefois metamorphisé	Argiles sableuses jaune brun.	moyen, variable	variable	Vraisemblablement colmatées à faible profondeur sauf dans quelques bancs gréseux (petites sources)
		Flysch ultrapindique et du Pinde	Fp	Grès calcaires, marnes argileuses, grès fins et calcaires intercalés	analogue à Fs	analogue à Fs	analogue à Fs	analogue à Fs

AGE		DESIGNATION	SYMBOLE	Nature lithologique ou description morphologique	Alteration superficielle	Grain ou granulometrie	Fissuration ou porosite	Dimension des poces ou fissures
EOCENE	Subpelagonien	Indifferencié	E	Somme de Ek Em	Variable	Variable	Variable	Variable
		Calcaire de base	Ek	Brèche à gros blocs anguleux de massif, puis calcaire massif, rosé, avec intercalations de marne d'une grise	Terra rossa, la plupart du temps enlevé par ruissellement ou infiltration karstique	Fin	Variable, mais assez dense - Porosité equivalente 3 à 6 % env.	analogue à Kp
		Marnes de Rhizoma	Em	Marnes débutant par des niveaux bréchiques à elements calcaires ou ophiolitiques - puis grès	Argiles sableuses et argiles jaunes à retrait viable	Fin à moyen	Variable	Analogue à Fs
MESO HELLENIQUE	Meteores	Gres et conglomérats de base	O1-2g	Conglomérats en bancs de plusieurs mètres alternant avec des grès roux jaune mal cimentés. Intercalations de marnes gréseuses	Argiles sableuses rousses avec galets abondants	Variable selon cimentation - Grain variable	Variable mais en général assez faibles - Porosité faible	Fissures colmatées rapidement - Pores variables
		Marnes	O1-2m	Marnes gris bleu à gris-noir, dures, se débitant en petits parallélépipèdes ou en miches.	Argiles gris sombre	Fin	Variable	Fines, colmatées très près de la surface.
	Serie des Meteores	Indifferencié	O3	Somme de O3c1', O3c1'' O3c2, O3m1, O3f, O3k, O3c3 O3g, O3m2	Variable	Variable	Variable	Variable
		Conglomérats d' Ayiofilon	O3c1'	Conglomérat peu cimentés à galets bien roulés de dimension max 15cm, d'origine variée	Argiles à galets et graviers abondants	Variable	Variable selon la profondeur	Variable, décroit rapidement en profondeur
		Conglomérats inf. des Météores	O3c1''	Conglomerats analogues à mais bien cimentés	Galets	Variable	Variable	En dehors des falaises, colmatage près de la surface.
		Conglomerats sup. des Météores	O3c2	Conglomérats à blocs de gneiss de couleur jaune alternant avec poudingues. Blocs de plus en plus grossiers	Blocs isolés argile jaune sableuse, dans les creux	Variable	Variable	Colmatage proche de la surface.
		Marnes d'Asprokklissia	O3m1	Marnes argilo siltueuses, grès argileux verdâtres grès coquillers, intercalations de bancs calcaire	Argiles et argiles sableuses	Variable	Variable	analogue à Fs
		Serie de Fanari	O3f	Somme de O3k, O3c3 O3g, O3m2	Variable, predominance d' argiles sableuse	Variable	Variable	analogue à Fs
		Calcaire de Fanari	O3k	Calcaire en gros bancs massifs, bréchiques à la base (très gros blocs)	analogue à Ksm	analogue à Ksm	analogue à Ksm	analogue à Ksm
		Conglomérats de Fanari	O3c3	Conglomérat fluviatile à galets de gneiss, schistes, ophiolites, calcaire, moyennement cimenté	Argiles sableuses jaunes avec galets	Variable selon cimentation.	Variable	Colmatage proche de la surface
		Grès de Fanari	O3g	Grès fin à grossier et lentilles de conglomérats en bancs de 1 à 5 m, avec intercalations argileuses	Sable, argile sableuse	Variable, en général fin	Variable	Fines, colmatées près de la surface
		Marnes et grès marneux de Fanari	O3m2	Marnes dures et grès fins marneux puis marnes gréseuses et grès plus ou moins marneux	Argiles, argiles sableuses	Variable	Variable	analogue à Fs
OLIGOCENE	Serie	Indifferencié	M	Somme de Mk Mm	Variable	Variable	Variable	Variable
		Calcaire transgressif	Mk	Bréche de base, puis calcaire zoogène gréseux	Analogue à Ks, mais plus sableux	Variable	Variable	Mal définie
MIOCENE	Sillon mesohellenique	Marnes gréseuses	Mm	Marnes bleues à khaki, puis série gréseuse bien cimentée, puis alternances de marnes et de grès	analogue à Fs	analogue à Fs	analogue à Fs	analogue à Fs
PLIO PLEISTOCENE CONTINENTAL		Indifferencié	P	Somme de tous les niveaux ci-dessous	Variable	Variable	Variable	Variable
		Calcaire	Pk	Calcaire graveleux avec bréche de base, limonite	Argile sableuse rouge	Variable	Variable	Mal définie
		Marnes inférieures	Pm1	Marne plastique gris-bleu à ostracodes	Argile claire	Fin	Faible	Colmatage proche de la surface.
		Marnes & marno-calcaires a pisolites	Pmk	Marnes et marnocalcaires à grosses perles de diamètre max 8cm	Argile jaune	Fin	Faible	Colmatage proche de la surface
		Grès et conglomérats	Pc1	Grès et conglomerats mal cimentés	Sables et graviers plus ou moins argileux	Assez grossier	Peu fissuré, mais assez poreux	Variable, percolant atteindre la surface
		Marnes lacustres	Pm2	Marnes lacustres blanches à empreinte de feuille	Argile blanche	Fin	Faible	Colmatées immédiatement.
		Argiles et grès	Pg	Argile, argile sableuse, grès, silts et graviers intercalés	Sols argilo-silteux avec galets	Fin	Faible	Colmatage proche de la surface
		Conglomérats post-glaciaires	Pc2	Anciens cones de déjection, cimentés à ciment calcaire - Friable	Galets, graviers	Variable	Assez dense	Variable

tableau 6.4.1.3

ECHELLE STRATIGRAPHIQUE DE REFERENCE

Fig. 6414

ESQUISSE GEOLOGIQUE REGIONALE

6.4.1.4. Géologie régionale

La carte géologique résultant des études précédemment effectuées et des levés complémentaires réalisés durant l'étude préliminaire était suffisante pour que le calcul du bilan effectué alors soit satisfaisant, étant donnée la finalité de cette étude réelle. Dans le cadre d'une étude globale comme celle envisagée ici, ce n'est plus le cas et nous verrons en 6.4.1.5. quelles sont les principales lacunes de ce travail. Présenter cette carte dans cette étude n'ajouterait donc rien de positif à la mise au point de la méthode. Ce qui importe, à vrai dire est plus la manière de définir les indices géologiques et de les représenter sur une carte, que la carte géologique à proprement parler. Il est cependant indispensable à la bonne compréhension de la suite de l'exposé, de décrire dans ses grandes lignes la géologie réginnale. Cet exposé s'appuie sur la représentation quelque peu schématique de la figure 6.4.1.4. La région est dominée par la rencontre de deux unités tectoniques : Le Pinde au Sud Ouest, le massif Pelagonien au Nord Est, séparées par des zones de transition : ultra-pindique et sub-pélagonienne, selon AUBOUIN et BRUNN. On y distingue plusieurs parties bien individualisées.

Thessalie occidentale

Entre ces deux unités tectoniques, se trouve la large plaine de Thessalie occidentale, extrémité sud est du sillon méso-hellénique (BRUNN), qui se présente sous la forme d'un graben général, encore en cours de subsidence. Ce graben est en fait formé d'une série de graben et de horst de tailles variables, ces derniers se traduisant par des affleurements crétacés et cénozoïques anciens au milieu de la plaine, qui est un remplissage d'alluvions torrentielles, fluviatiles et lacustres.

Les formations lacustres sont plus nettes dans la partie sud est de la plaine et tout porte à penser qu'il y a eu là, jusqu'à une époque récente, un lac dans lequel venaient se jeter le Pinios et tous ses affluents venant du Pinde et de l'Othris.

Les directions tectoniques principales, marquées par les orientations des plissements et des failles principales sont grossièrement NNO - SSE. En complément de ces directions principales on rencontre des directions de cassures secondaires, transversales et grossièrement orthogonales aux précédentes.

On constate dans la plaine de Thessalie occidentale l'existence d'un horst longitudinal assez important entre Kalambaka et Trikala, qui semble se prolonger dans l'affleurement anticlinal du Kierion, près de Sofadhes, puis dans le flanc nord est du Narthakion, vers Farsala.

La partie nord ouest de la Thessalie occidentale semble moins effondrée que la vallée du Pinios, entre Kalambaka et Trikala, et on y rencontre des affleurements éocènes, oligocènes et miocènes, à pendages assez faibles, séparés par des failles. Elle a vraisemblablement été soulevée en même temps que les montagnes cristallines voisines des Antikhassia, comme en témoigne l'anticlinal miocène d'Ellinokastron perché sur l'Oligocène et le cristallin. Il y a cependant dans cette région des graben remplis de terrains meubles plio-pléistocènes d'épaisseur non négligeable, comme la vallée du Litheos vers Avra, la petite plaine de Rakha, peut-être aussi la plaine de Trikala - Petroporos et la plaine de Neokhori, séparées du graben principal de Thessalie occidentale par le prolongement du horst de Vassiliki pour la première plaine, et par l'ilôt de marbre de Klokotos dans la plaine, au Sud du B. V. U. 2.242.10. Pour ces deux dernières plaines un doute subsiste cependant, qui ne pourra être levé que par des reconnaissances en profondeur.

Vers le Nord, la Thessalie occidentale, plaines et collines cénozoïques anciennes surélevées du Nord Ouest, viennent buter contre la barrière ophiolitique située entre le Mourganis, le Malakassiotikos, et la remontée cristalline qui fait suite au massif qui surplombe Dheskati. L'Oligocène continue cependant par une sorte de col vers le bassin de l'Aliakmon (Sioutsa).

Pinde

Vers l'Ouest, la Thessalie occidentale bute contre le Pinde, par l'intermédiaire des plissements très faillés du Koziakas et des montagnes de moindre importance qui lui font suite vers le Sud. Cette première chaîne de relief violent appartient à la zone ultra-pindique (AUBOUIN) et quitte assez vite le bassin versant de la région à étudier. Plus au Sud, les premiers contreforts bordant la Thessalie occidentale passent progressivement, par un jeu de failles principales et secondaires, à des faciès sub-pélagoniens (massif d'Omvriaki) avec de grandes étendues d'ophiolites et de flysch (bassins du Karambalis, du Kalendzis, du Sofaditis et du Haut Enipefs). Ces reliefs appartiennent à la zone sub-pélagonienne plutôt qu'à la zone ultra-pindique. Entre le Koriakas et le Pinde proprement dit, se trouve une dépression comprenant en majeure partie du

flysch, marquée par la vallée du Klinovitikos, puis celles du Portaïkos et du Pliouris, et enfin par la haute plaine de Mesokhora, remplie de formations plio-pléistocènes, et située hors de la région en cours d'étude.

Au-delà de cette dépression, on entre dans le Pinde dont la partie qui nous intéresse est constituée par une succession d'anticlinaux faillés à ossature de calcaire en bancs assez minces et de Flysch (bassins du Haut Malakassiotikos, du Kastaniotikos, du Haut Klinovitikos, du Haut Portaïkos et du Haut Pliouris). Cette partie de la Thessalie a été reconnue assez approximativement et nous nous sommes considérablement appuyés sur les travaux de BRUNN (1956) et de AUBOUIN (1959) pour la rédaction de la carte.

Cette partie du Pinde méridional vient buter vers le Nord sur le massif ophiolitique situé entre le Mourganis et le Malakassiotikos et qui appartient au Pinde septentrional (BRUNN, 1956).

Othris - Narthakion - Kalkodonion

Vers le Sud Est le graben de Thessalie occidentale se termine contre les reliefs mésozoïques et paléocènes (Flysch) du Narthakion et du Kalkodonion, qui sont des avant-postes de l'Othris. Ces montagnes, qui sont encore découpées selon les directions tectoniques indiquées ci-dessus, appartiennent à la zone sub-pélagonienne (BRUNN, 1956) et peuvent être considérées comme l'émergence du bed-rock situé au fond du graben de Thessalie occidentale. On y rencontre encore trois importants graben remplis de matériaux plio-pléistocènes à holocènes :

- la plaine de Xinias, à l'Ouest ;
- les collines du Haut Enipefs, à l'Est de Dhomokos, à l'Est ;
- le sillon quaternaire séparant le Narthakion du Kalkodonion, entre Vamvakou et Aerinon.

Collines plio-pléistocènes entre la Thessalie occidentale et la Thessalie orientale

La plaine de Thessalie occidentale se termine vers l'Est par des affleurements mésozoïques et paléocènes isolés qui prolongent le Kalkodonion et, plus au Nord, par des collines qui appartiennent au massif cristallin pélagonien. La limite entre les formations sub-pélagoniennes et le cristallin n'est pas très claire, car d'une part ces collines sont ennoyées dans des formations plio-pléistocènes à relief moutonné qui séparent la Thessalie occidentale de la Thessalie orientale, et d'autre part, on note un certain métamorphisme du sub-pélagonien (dans le flysch et les calcaires en particulier vers Kiparissos).

Tectoniquement, on peut situer la limite aux environs de Mikrovounon, mais ceci devrait être vérifié. Il semble qu'il y ait eu un déversoir du lac anciennement situé dans la partie sud est de la Thessalie occidentale, en direction de l'Est, entre Mikrovounon et Dhoxaras, mais ceci est à étudier plus en détail. D'autres déversoirs ont pu exister aussi à d'autres périodes du plio-pléistocène en divers endroits, passant par exemple vers Kilas et Elefterai, comme en témoignent les puits d'exploitation d'eaux souterraines en cours, près de ces villages. Il semble en effet que l'actuel passage du Pinios de Thessalie occidentale en Thessalie orientale, soit dû à des mouvements tectoniques très récents.

Vers l'Est des collines plio-pléistocènes intermédiaires, on trouve des formations plus anciennes (marnes, calcaires marneux), puis des affleurements cristallins, en particulier sur l'autoroute entre Kipseli et Mega Monastirion (séricitoschistes et marbres intercalés).

Massif pélagonien - Partie nord

Cette partie du massif pélagonien comprend les Antikhassia, Kamvounia et le Titaros, l'Olympe et le bas Olympe.

Les formations cristallines et les marbres triasiques ont été remaniés tectoniquement jusqu'à une date récente par un jeu de failles sensiblement parallèles aux directions tectoniques de base.

On rencontre dans ces montagnes un certain nombre de dépressions, dont beaucoup sont des graben assez récents, à remplissage plio-pléistocène et holocène lacustre, fluvial ou torrentiel :

- zone haute du pied de l'Olympe et du Titaros,
- plaine d'Elasson,
- plaines de Vlakhoyanni et de Dhamassi,

et peut-être même, les hautes plaines de Dheskati, Livadheron, Mega Eleftherokhon, Kariai et Kalipefki.

Ces montagnes assez complexes sont dominées par les calcaires ou marbres de l'Olympe, du Titaros et du massif de Dheskati, dont l'âge est discuté (IFP, GODFRIAUX).

Massif pélagonien - Partie sud

Cette partie du massif pélagonien comporte principalement la plaine de Thessalie orientale, graben complexe composé de graben et de horst élémentaires plus petits, et les chaînes bordières de l'Ossa et du Mavrovouni vers l'Est, du Mégavouni vers le Sud. Les chaînes bordières sont assez analogues à la partie nord du massif. Le remplissage de la plaine se décompose en deux grandes unités :

- cône de déjection du Titarissios au Nord,
- formations lacustres vers le Sud (ancien lac de Karla).

6.4.1.5. Examen critique du travail effectué et des résultats obtenus

Nous sommes donc arrivés à une carte géologique qui semble utilisable grosso modo pour une définition des aires élémentaires. Il y a cependant des lacunes assez importantes qui auraient probablement pu être évitées sans compléments de frais ni de délais grâce à une orientation plus précise du travail - rappelons qu'au moment de l'étude réelle, la méthodologie exposée en première partie n'était pas encore conçue clairement et qu'il était impossible de définir alors cette "orientation plus précise" -.

Examinons donc les lacunes :

en premier lieu les différents types de roches tels qu'ils sont décrits dans l'échelle stratigraphique de référence n'ont pas pu être différenciés de manière suffisamment précise. A titre d'exemple, le cortège ophiolitique et le cristallin n'ont pas été suffisamment examinés. Il aurait été nécessaire de distinguer sur le terrain - et donc sur la carte - entre les zones à prépondérance de dolérite, de gabbros, de péridotites peu ou pas serpentinisées, des zones très serpentinisées, car la fissuration et le grain de ces groupes de roches sont très différents. De même dans le cristallin, une différenciation nette aurait été utile entre zones à prépondérance de granite et/ou de gneiss, zones à prépondérance de schistes phylliteux ou sériciteux, zones à prépondérance de calcschistes (la karstification y semble en effet possible) et zones de roches ultrabasiques. Il existe des lacunes analogues pour les calcaires du Mésozoïque et pour le Plio-Pléistocène. Ces lacunes auraient pu être évitées sans accroissement de coût et de délais. Au contraire, des économies substantielles de temps auraient pu être réalisées si l'on avait suivi la procédure ci-dessous :

1°/ Sur la base des photographies aériennes existant à l'échelle 1/33 000 environ, exécution d'une analyse photogéologique complète de la région, avec orientation de l'analyse en fonction de l'échelle stratigraphique de référence. Ce travail aurait demandé environ deux mois à un laboratoire spécialisé. Pour certains points critiques, il aurait été possible d'utiliser certaines photographies existant à l'échelle 1/18 000 environ. Pour donner toute son efficacité à cette analyse, un spécialiste du laboratoire aurait été examiner sur place comment se traduisaient sur le terrain les faciès de l'échelle stratigraphique de référence, en une mission de deux semaines environ, effectuée avant l'analyse photogéologique proprement dite. En ce qui concerne la photo interprétation, il faut remarquer que le travail proposé ici n'est qu'un minimum acceptable et que l'exécution simultanée puis l'analyse de photographies aériennes en noir et blanc, couleur et infra-rouge auraient amené à des résultats bien plus valables. Ceci exige cependant un investissement et des délais d'environ trois fois supérieurs à ceux indiqués pour l'analyse des photographies aériennes existantes.

2°/ Ensuite, une équipe de deux géologues et un pédologue (ce dernier en raison de l'importance de la différenciation entre divers terrains meubles, et de la nécessité par ailleurs d'une carte pédologique), aurait contrôlé et éventuellement corrigé la restitution photogéologique en 5 à 6 mois de terrain et 2 à 3 mois de bureau, en levant dans leur détail les zones douteuses et en suivant des coupes-types choisies lors de l'analyse photogéologique.

3°/ Enfin, l'examen photogéologique aurait été repris en tenant compte des observations de terrain. On peut estimer la durée de ce travail à un mois et demi. Le temps total nécessaire à l'opération aurait été de 10 mois environ, ce qui est tout à fait compatible avec les délais de l'étude réelle. Le total d'hommes - mois employé selon ce schéma est moindre que celui qui a réellement été mis en œuvre, et les délais légèrement inférieurs.

Remarquons que dans le domaine de la carte géologique, le recours à l'automatisation n'a pas été abordé. Une automatisation est concevable, en particulier pour l'analyse photogéologique et le report des observations de terrain. Mais ces procédés sont d'ailleurs en cours de mise au point.

6.4.2. Mesures du niveau de la nappe phréatique dans les zones de terrain meuble

Lors de l'étude réelle, la notion de rétention n'avait pas encore été introduite en remplacement de celle d'évapotranspiration et la nécessité de définir une tranche superficielle de sol n'était pas apparue. Par conséquent l'importance accordée à la nappe phréatique a été bien moindre qu'il n'aurait été nécessaire dans l'optique de la méthode globale. La nappe phréatique n'avait d'intérêt alors que dans les zones où, du fait de la nature grossière des sols, elle pouvait être exploitée directement : partie amont des cônes de déjection du Pinios, de ses affluents en Thessalie occidentale, et du Titarissios. Et encore, comme le pas de temps adopté alors pour le calcul était l'année, et non la saison trimestrielle, il a semblé suffisant de déterminer très approximativement le niveau moyen annuel de la nappe phréatique, sans même qu'une étude corrélative avec les précipitations soit tentée. Je me suis donc borné à noter approximativement ce niveau en quelques points, et à l'extrapoler à toute la zone intéressée, en calant cette "position" de la nappe sur les niveaux des cours d'eau et des sources. Cette évaluation très grossière ne saurait en aucun cas suffire pour une application de la méthode globale de calcul du bilan telle qu'elle est exposée dans la première partie. Il y a là une lacune importante dans les données à disposition lors de l'étude réelle, que mes recherches ultérieures n'ont guère permis de combler. Je n'ai pu obtenir en effet comme renseignements, qu'une carte hydrogéologique de Thessalie occidentale (Kalergis, 1970), dans laquelle la position moyenne annuelle de la nappe était indiquée.

Il est bien net que ces données fragmentaires ne permettent pas de déterminer l'épaisseur de la tranche superficielle de sol selon le cheminement indiqué en 3.3.

Il aurait pourtant été aisé et peu coûteux de procéder à ces mesures de niveau phréatique en sélectionnant un certain nombre de puits existants dans les plaines centrales, les plateaux et les vallées habitées, et de faire exécuter ces mesures une fois par mois pendant la première année ou les deux premières années dévolues aux reconnaissances de la phase d'étude préliminaire, puis de continuer par la suite. Ces mesures auraient pu être confiées à l'agent chargé d'autre part des mesures hydrologiques dans la région ou dans une fraction de région. De plus l'exploitation des résultats de ces mesures est aisément automatisable, selon des procédés qui sont en passe de devenir classiques, en utilisant un couplage d'ordinateur de série scientifique et de table traçante.

6.4.3. Mesure de la résistivité du sol dans les zones de terrain meuble

Lors de l'étude réelle, il est apparu tout de suite que le levé géologique superficiel ne suffisait pas pour assurer une connaissance suffisante de la disposition du sous-sol dans les zones de terrain meuble. Pour pallier à cette lacune, un programme de reconnaissances géophysiques par sondages électriques a été mis au point, puis exécuté. Le but de ces reconnaissances n'était pas tellement de caractériser la partie superficielle du terrain que de définir la structure et la succession stratigraphique des terrains meubles de remplissage des plaines, plateaux et vallées importants, ainsi que la géologie du bed-rock antérieur à la sédimentation épicontinentale puis continentale qui a suivi le paroxysme tectonique de la fin de l'Eocène. Ces sondages électriques ont été effectués selon le quadrillage indiqué sur la planche n° 6 "Reconnaissances effectuées". Les distances maximales entre électrodes émettrices ont varié de 500 à 10 000 mètres selon les cas. La densité des sondages électriques a été différente de celle préconisée dans la première partie : plus faible dans les plaines principales, plus forte dans les zones périphériques. Mais ceci est réexaminé plus bas (point 7.2.1.2.).

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

La progression des écartements entre électrodes d'envoi de courant (les mesures étant effectuées selon la méthode Schlumberger), a permis de mesurer la résistivité superficielle. Malheureusement, et pour les mêmes raisons que celles indiquées en 6.4.2. ci-dessus, elle a été déterminée uniformément pour une épaisseur de 10 mètres, sans égard pour la position de la nappe phréatique. D'autre part dans un grand nombre de zones où l'épaisseur de terrain meuble n'est pas négligeable, il n'a pas été procédé à des sondages électriques, ce qui est dommage et aurait pu être fait aisément. Ces valeurs de la résistivité superficielle sont indiquées sur la planche n° 7, Indices géologiques superficiels (les terrains meubles - Résistivités superficielles (0 - 10 m). En particulier sur l'exemple de base, nous ne disposons d'aucune donnée géophysique sur les terrains meubles. Ce qui explique pourquoi je n'ai pas jugé utile de présenter des planches n° 6 e et 7 e.

Il aurait été facile et peu coûteux, si la méthode avait été clairement conçue lors de l'étude préliminaire réelle, de modifier légèrement la progression des écartements des électrodes d'envoi de courant,

dans les premiers mètres d'exécution du sondage électrique, de manière à multiplier les mesures et permettre, à l'aide de l'établissement d'un second diagramme de sondage électrique plus détaillé, pour sa partie superficielle, de calculer ultérieurement la résistivité de la tranche superficielle de sol, en tenant compte d'ailleurs de la position de la nappe phréatique au moment de l'exécution du sondage électrique et en corrigeant les résultats en conséquence. Il en aurait résulté un allongement de la durée d'exécution des sondages d'environ un quart d'heure à une demi-heure par sondage, ce qui est négligeable comme frais supplémentaires par rapport aux avantages que l'on aurait pu retirer de ces mesures plus serrées en surface, et à la durée totale des reconnaissances. Ceci sera à prendre en compte dans une étude régionale ultérieure. Il faut avoir conscience, en lisant ce qui précède, que la précision dans la détermination des profondeurs, sur les sondages électriques, est assez aléatoire et que ce qui est donné pour une profondeur de 10 mètres peut aussi bien correspondre à des profondeurs réelles de 7 mètres que de 12 à 13 mètres. Ceci fait ressortir l'intérêt d'un contrôle superficiel au moyen d'une bonne connaissance du niveau phréatique.

6.4.4. Mesures de la granulométrie, de la densité et de la teneur en eau in situ du sol dans la tranche superficielle. Mesures de l'ascension capillaire. Détermination de la porosité

L'imprécision quant à la profondeur déterminée par les sondages électriques aurait pu être compensée par l'exécution d'un certain nombre de sondages ou de puits superficiels d'étalonnage, effectués jusqu'à une profondeur supérieure à celle à laquelle on peut s'attendre à trouver le niveau minimum minimorum de la nappe phréatique. Mais, toujours pour les mêmes raisons, je n'ai pas porté attention à ce point, lors de l'étude réelle, et il m'a été impossible par la suite de compléter l'information en ce domaine.

En Thessalie, il n'aurait nulle part été nécessaire de pousser ces sondages au-delà de 25 mètres de profondeur. En général on aurait pu se limiter à 10 ou 15 mètres. La surface totale des zones où l'épaisseur de terrain meuble est importante ne dépassant pas 5 à 6 000 km^2, le nombre des sondages nécessaires aurait été de l'ordre de 18 à 20 sondages, soit une longueur totale de l'ordre de 300 mètres, à effectuer en diamètre 12 à 15 pouces, en percussion, avec échantillonnage remanié à la sonde à clapet (pour mesures granulométriques en laboratoire), et équipés en piézomètres pour permettre ultérieurement des mesures in situ périodiques au moyen de sondes radioactives, de la densité et de la teneur naturelle en eau du sol. Un tel programme de reconnaissances pouvait être effectué en trois mois et demi avec une seule foreuse. Si l'on compare ce que représente ce travail à celui de la campagne de reconnaissances géophysiques, et surtout à celui des reconnaissances effectuées sur les sites de barrage (respectivement 3 mois de 3 équipes spécialisées et 4 mois et demi d'emploi de 8 à 9 sondeuses) on voit qu'il n'y avait là aucune démesure avec le programme de reconnaissance déjà prévu.

Il aurait aussi été possible d'effectuer en ces puits, à l'aide d'un équipement en piézomètre et de la mesure de la teneur en eau in situ, une détermination expérimentale de l'ascension capillaire. La densité in situ étant connue et la granulométrie des terrains constituants étant déterminée, on aurait pu connaître la porosité et en déduire la teneur en eau correspondant à la saturation. On aurait pu aussi déterminer les mouvements de l'eau dans la tranche superficielle, ce qui aurait pu être utilisé pour effectuer des corrélations directes entre résisitivités mesurées et termes du bilan dans la tranche superficielle (rétention, infiltration directe). On aurait ainsi eu toutes les données nécessaires à la délimitation puis à la caractérisation de la tranche superficielle de sol selon les cheminements exposés en 6.3.2. et 6.3.3. ci-dessus. Ceci aurait entraîné des coûts supplémentaires non négligeables mais homogènes avec ceux des reconnaissances de l'étude réelle. Il n'y aurait pas eu d'accroissement des délais. Et il aurait été possible ainsi de valoriser au mieux l'ensemble des reconnaissances effectuées au sujet de la tranche superficielle de sol. Ces mesures de teneur en eau et de densité in situ sont au point depuis longtemps, mais leur exploitation pour l'étude des mouvements de l'eau dans la tranche superficielle est moins classique. Elle fait l'objet de recherches en plusieurs laboratoires et en particulier à Grenoble (laboratoire de Mécanique des Fluides).

6.4.5. Mesure du niveau de la nappe phréatique dans les zones d'affleurement rocheux - Mesure in situ de la fissuration, du grain et de l'ascension capillaire des roches caractéristiques

La lacune est ici totale en ce qui concerne les puits. Seuls les niveaux approximatifs des griffons des sources ont été déterminés lors de l'étude préliminaire réelle, ainsi d'ailleurs que les points de perte dans les rivières, à la traversée de calcaires karstiques.

Ces données sont nettement insuffisantes pour qu'une tentative de détermination de la position de la nappe dans les zones d'affleurements rocheux ait une signification. La mise en œuvre du programme indiqué en 3.3. n'aurait pourtant pas été coûteuse.

Quant à la fissuration, au grain et à l'ascension capillaire des roches caractéristiques de la région, il n'en a pas été question lors de l'étude réelle, et le degré de fissuration n'a été indiqué que de manière qualitative (voir à ce sujet l'échelle stratigraphique, au point 6.4.1.3.). Ceci aurait pourtant été possible avec des moyens légers, par exemple par photographie d'affleurements caractéristiques et analyse graphique de ces photographies par la suite.

D'autre part, il est nécessaire d'évaluer l'ascension capillaire dans les roches. Ceci peut être fait par analogie avec des résultats de mesures effectués ailleurs, et aussi à titre de contrôle, par mesures de la densité et de la teneur en eau au moyen de sondes radioactives dans certains sondages de reconnaissances des sites de barrage équipés en piézomètres, après un temps suffisant pour que l'influence de l'eau de forage devienne négligeable ; ces mesures, combinées avec des mesures de poids spécifique des roches, effectuées sur les carottes, permettent d'évaluer le volume des vides dans la roche et l'ascension capillaire. Elles permettent aussi, d'une manière similaire à celle qui a été indiquée pour les sols meubles, d'établir des relations locales de corrélation entre les caractéristiques physiques de la roche et donc, finalement, l'indice géologique superficiel et les termes du bilan dans la tranche superficielle (rétention, infiltration directe). Certes, ces mesures n'auront pas lieu pour toutes les roches de la région. Mais, si l'on considère que pour les roches non altérées la tranche superficielle de sol est moins importante que dans les sols meubles, ces mesures devraient suffire pour une étude préliminaire.

6.5. Délimitation de la tranche superficielle

En raison des lacunes dans le rassemblement des données obtenues lors de l'étude préliminaire réelle et par la suite, il est impossible de suivre le cheminement indiqué en 3.3.2. pour cette délimitation qui, remarquons-le en passant, se prête aisément à une procédure automatique de traitement. Nous avons vu cependant qu'il aurait été possible, sans accroître notablement les coûts et les délais, d'effectuer les mesures et les reconnaissances nécessaires au rassemblement de ces données. Pour permettre de continuer l'examen critique de la méthodologie exposée dans la première partie, nous supposerons arbitrairement que la tranche superficielle de sol a une épaisseur de 10 m environ, correspondant à la tranche pour laquelle la résistivité superficielle a été mesurée, ce qui n'est qu'un expédient destiné à permettre d'appuyer l'exposé sur l'exemple.

6.6. Caractérisation de la tranche superficielle de sol

Une "tranche superficielle de sol" a donc été définie arbitrairement en raison du manque de données. Nous avons vu qu'il aurait été possible de la délimiter plus précisément sans accroître ni coûts, ni délais au-delà du raisonnable. Dans la tentative de délimitation des aires élémentaires des B. V. U. de Thessalie, il nous faut maintenant examiner si il est possible d'attribuer à chaque type de roche ou de terrain meuble différencié sur la carte une valeur de l'indice géologique superficiel.

L'indice géologique superficiel a été introduit comme une manière commode de représenter les facteurs géologiques agissant pour la détermination des termes du bilan d'une aire élémentaire par un seul nombre. De ce fait, il est un facteur utile.

A chacune des valeurs de cet indice doivent correspondre des intervalles assez restreints de valeurs des facteurs géologiques agissants. Par conséquent, les valeurs des termes du bilan qui en dépendent seront aussi situées dans des intervalles restreints, tels que la valeur médiane de cet intervalle en soit représentative. Les écarts, c'est-à-dire la moitié des intervalles de valeurs possibles pour les termes du bilan doivent être alors compatibles avec la précision recherchée pour le bilan. Ceci revient à dire que plus on aura des valeurs possibles dans l'échelle des indices géologiques superficiels, plus les intervalles correspondants de valeurs possibles des termes du bilan seront réduits et plus le calcul sera précis. Pour que l'on puisse définir une échelle serrée de valeurs de l'indice géologique superficiel, dans un intervalle global de possibilités qui reste constant (les sols et roches de caractéristiques extrêmes restent les mêmes dans une région déterminée, quelle que soit la précision recherchée), il faut pouvoir définir assez précisément les facteurs géologiques croissants caractérisant chaque roche ou sol affleurant. Ceci impose une carte géologique très détaillée et des mesures assez nombreuses :

- de grain et de fissuration pour les roches non altérées ;
- de granulométrie et porosité pour les sols meubles.

Pour la Thessalie, ceci n'a pas été fait assez précisément pour être utile. La différenciation entre diverses sortes de roches et de sols a été assez approxiamtive et l'utilisation de la résistivité superficielle sans étalonnage corrélatif suffisamment serré dans certaines des zones où l'épaisseur de terrain meuble n'est pas négligeable, n'est qu'un palliatif partiel.

Pourtant, il a été possible de définir des indices géologiques superficiels peu précis sur la base de la carte géologique et des mesures de résistivité superficielle. Le calcul effectué lors de l'étude réelle a montré que cette subdivision selon une classe d'indices permettait une approximation raisonnable dans un calcul effectué pour un pas de temps annuel. Ceci n'est probablement plus vrai dans le cas d'un pas de temps trimestriel, mais nous ne pouvons guère espérer arriver à une subdivision plus fine, avec les données à disposition.

6.6.1. Indice géologique superficiel dans les zones de terrains meubles

En recherchant la classification la plus fine possible en fonction des données à disposition, sans préjuger des éventuelles possibilités ultérieures de regroupements lorsqu'il sera question de relier pratiquement les indices et les termes du bilan, je suis arrivé à l'échelle des indices géologiques superficiels pour les sols meubles indiquée dans le tableau 6.6.1.

Cette échelle est arbitraire et sa valeur est strictement locale. Elle est assez imprécise. Un levé géologique mieux orienté du fait de la connaissance de la méthode globale de calcul de bilans aurait amené à une meilleure différenciation des indices géologiques superficiels dans les terrains meubles. A l'aide de mesures de granulométrie et de la porosité des parties fines des sols, on serait sans doute parvenu à une subdivision mieux motivée et qui n'aurait pas forcément comporté plus de classes. Mais ceci n'a pas été fait. Il existe certes des relations entre la porosité ou la granulométrie et la résisitivité d'un sol (SCHOELLER, 1962 ; KLINKENKERG, 1951). Mais ces relations générales n'ont qu'une validité très relative et rien ne vaut une relation de corrélation expérimentale basée sur les résultats de mesures effectuées dans la région. Ceci nous ramène aux sondages préconisés en 6.4.4. dont l'utilité est ainsi vérifiée.

J'ai cependant utilisé cette échelle approximative pour l'élaboration d'une carte des indices géologiques superficiels dans les terrains meubles (planche n° 7).

6.6.2. Indice géologique superficiel dans les zones d'affleurements rocheux

En ce domaine aussi, les données recueillies sont trop imprécises pour que l'on arrive à définir une échelle d'indices géologiques superficiels, auxquels correspondraient des intervalles suffisamment réduits des valeurs des caractéristiques géologiques utiles pour que les valeurs des termes du bilan qui sont influencées par ces caractéristiques soient elles aussi comprises dans des intervalles assez petits pour que la valeur médiane de ces intervalles puisse représenter ces termes avec une précision suffisante.

Aucune mesure de la densité ni de la dimension des fissures n'ayant été tentée, il ne reste plus qu'à avoir recours à une différenciation des types de roches basée sur les observations qualitatives effectuées sur le terrain et reprises dans l'échelle stratigraphique de référence. Si la carte géologique avait été levée avec la précision nécessaire, une échelle d'indices assez cohérente, déduite de l'échelle stratigraphique de référence, aurait pu être appliquée avec de bonnes chances de représentativité.

Un examen attentif de cette échelle de référence amène en effet à définir les groupements suivants, qui ont une signification physique :

1°/ Groupe 1

Formations généralement aquicludes, donnant comme produits d'altération des argiles ou argiles faiblement sableuses :

- formations ultrabasiques pélagoniennes, sauf gabbros et calcschistes quand ils ont pu être différenciés ;
- serpentines ou ophiolites serpentinisées 6 ou oϕ -6 ;
- radiolarites, pélites argilomicacées et jaspes du Jurassique et calcaires mylonitisés du Koziakas (Jsh, Jp, Jj et J Km) ;

Tableau **6.6.1** : Indices géologiques superficiels dans les terrains meubles

Indice	Nature de la tranche superficielle	Position la plus fréquente	a %	ρ ohm.m
1M	Galets, graviers, sables peu de silts	anciens lits de cours d'eau encore sensibles dans le relief, dans les cônes de déjection.	**70**	**>300**
2M	Sables grossiers à fins faible proportion de silt et d'argile	plaines d'épandage de crues en tête des cônes de déjection.	**40**	**70 à 300**
3M	Sables moyens à fin, proportion de silt déjà notable	plaines d'épandage de crues à l'aval des zones d'indice 2 - vallées alluviales dans les formations cristallines gneissiques et calcaires du Pinde - certains cônes de déjection dans les formations schisto-gneissiques.	**32**	**20 à 100**
4M	Sables et sables silteux, ou faiblement argileux.	plaines d'épandage de crues à l'aval des cônes de déjection d'indice 3 - cônes de déjection dans les formations schisteuses, du flysch, et oligo-miocènes.	**24**	**15 à 60**
5M	Sables fins et sables silteux et argileux	cônes de déjection dans certaines formations schisteuses, les ophiolites du Koziakas, de l'Othris, et certaines formations pliocènes.	**18**	**15 à 50**
6M	Sables fins, avec une proportion notable de silt et/ou d'argile	niveaux pliocènes argilo-gréseux et gréso-conglomératiques alluvions provenant de l'Oligocène et du Miocène et des formations pliocènes Pml, Pmk, Pg.	**12**	**10 à 40**
7M	Sables argileux, argile, avec cailloux et sable	Terra Rossa et alluvions mélangés - niveaux plio-pléistocènes argilo-gréseux	**9**	**5 à 30**
8M	Silt sableux, argile sableuse	niveaux pliopléistocènes marneux et marno-calcaires.	**6**	**5 à 30**
9M	Argiles franches et silteuses	fonds de lacs asséchés, parties inférieures des grands cônes de déjection dans les plaines centrales.	**0**	**1 à 15**

a désigne une première appréciation de la proportion des précipitations qui alimentent la rétention. Cette première appréciation est basée sur les résultats des essais Lefranc dans les sondages de reconnaissance sur les sites de barrages et surles résultats d'essais d'absorption effectués dans la partie Sud-est de la Thessalie occidentale par le Service des Améliorations Foncières du Ministère de l'Agriculture.

- marnes pliocènes inférieures Pm_1 ;
- marnes et calcaires marneux à grosses perles P mK ;
- marnes lacustres plio-pléistocènes Pm_2.

2°/ Groupe 2

Formations conglomératiques bien cimentées, généralement aquicludes, roches très dures, quelques fissures surtout dans les montagnes :

- Oligocène supérieur - conglomérat des Météores $0_3\ C'_1$;
- Oligocène supérieur - conglomérat supérieur des Météores $O_3\ C_2$
- Oligocène supérieur - conglomérat de Fanari $O_3\ C_3$.

3°/ Groupe 3

Formations gréseuses, gréso-argileuses ou gréso-marneuses, avec quelques bancs conglomératiques, donnant comme produits d'altération des argiles ou limons sableux, voire des sables argileux, généralement aquicludes, avec cependant quelques sources, des fissures ou le long de couches plus poreuses (grès, conglomérats, calcaires éventuels...) :

- gabbros et dolérites pélagoniennes	UB'
- schsites cristallins	Sch
- Flysch albien du Pinde	Kf
- Flysch sub-pélagonien	FS
- Flysch ultra-pindique ou du Pinde	Fp
- marnes éocènes de Rizoma	Em
- Oligocène inférieur marneux et conglomératique	O_{1-2} m
- Oligocène supérieur, marnes d'Asprokklissia	O_3m_1
- Oligocène supérieur, grès de Fanari	O_3g
- Oligocène supérieur, marnes et marnes gréseuses de Fanari	O_3m_2
- Miocène marno-gréseux	Mm
- Plio-Pléistocène argilo-gréseux	Pg.

4°/ Groupe 4

Formations conglomératiques ou gréso-conglomératiques assez peu cimentées donnant des sols graveleux et caillouteux avec du sable mais peu d'argile comme terrain d'altération, se drainant bien, pouvant être aquifères :

- Oligocène de base, gréseux et conglomératique	$O_{1-2}g$
- Oligocène supérieur, conglomérat d'Ayiofillon	$O_3C''_1$
- Plio-Pléistocène gréso-conglomératique	PC_1
- Pliocène conglomératique post-glaciaire	PC_2.

5°/ Groupe 5

Formations cristallines grenues, à fissures, altérations sableuses ou sablo-argileuses, pouvant donner lieu à des sources de taille faible à moyenne :

- gneiss pélagonien	Gn
- granite pélagonien	γ
- diabases, diorites, gabbros, péridotites du cortège ophiolitique	δ ou π

6°/ Groupe 6

Calcaire en bancs assez minces, pouvant être karstique (karst de fissures, plutôt que karst de réseau hydrographique) :

- marbres intercalés dans le cristallin	Mri
- calcaires jurassiques en plaquettes avec jaspes intercalés	JKp

- calcaires crétacés en plaquettes, subpélagonien	Ksp
- calcaire éocène de base	Ek
- Oligocène supérieur, calcaire de Fanari	O_3k
- Miocène transgressif calcaire	Mk
- calcaire pliocène	Pk_1.

7°/ Groupe 7

Calcaires en masses épaisses, à karst de fissures plutôt que de réseau hydrographique net, dans lequel on rencontre un faciès géomorphologique de type lapiaz, plutôt que des dolines et gouffres :

- marbres "triasiques" pélagoniens	Mrm
- calcaires jurassiques d'Omvriaki	Jko
- calcaires crétacés marmorisés	Ksm
- calcaire crétacé sublithographique	Kss

8°/ Groupe 8

Calcaires en bancs épais ou grandes épaisseurs de calcaires en bancs assez minces, karstiques, mais avec une plus grande fréquence de dolines et de gouffres que dans les calcaires du groupe 7, ce qui traduit une probabilité plus grande de rencontrer un réseau hydrographique souterrain :

- calcaires massifs du Koziakas	Jkk
- calcaire de Thimiama	Kp

A chaque groupe ainsi défini pourrait donc correspondre un indice géologique superficiel qu'il faudrait ensuite relier aux termes du bilan influencés par les caractères géologiques de la tranche superficielle.

Malheureusement, nous avons vu en 6.4.1.5. que la carte géologique effectivement réalisée n'avait pas permis de différencier les affleurements aussi complètement que cela aurait été souhaitable, selon l'échelle stratigraphique de référence. J'ai donc été obligé d'adapter ces groupements de roches selon les imperfections de la carte ce qui m'a amené à modifier le mode de groupement comme suit :

Groupe 1 (indice 1 R)

Formations ultrabasiques généralement aquicludes (à l'exception des calcschistes) :

- formations ultrabasiques pélagoniennes	UB, sauf UB-K
- ophiolites	Oφ et composants
- radiolarites, pélites argilomicacées et jaspes du Jurassique	Jsh et composants
- marnes et calcaires marneux plio-pléistocènes	Pm_1, Pmk, Pm_2

(Ces dernières formations ont été pratiquement prises en considération dans les terrains meubles, car elles sont partout recouvertes d'une épaisseur de 2 à 3 m au minimum de terrains d'altération).

Groupe 2 (indice 2 R)

Formations marno-gréseuses, conglomératiques peu cimentées, à ciment argileux, zones mixtes (semi-aquicludes):

- Flysch albien ou paléocène	Kf, Fs et Fp
- Eocène subpélagonien marneux	Em
- Oligocène de base	O_{1-2}
- Oligocène, formations de Fanari	O_3f, $O_3\ C_3$
- Oligocène marno-gréseux	O_3m_1, O_3m_2
- Miocène marno-gréseux	Mm
- Plio-Pléistocène conglomératique	Pc_1, Pc_2
- Plio-Pléistocène argilo-gréseux	Pg

Certaines formations plio-pléistocènes (Pc_1, Pg), ont été assimilées, lors de l'étude réelle, aux terrains meubles et des reconnaissances géotechniques y ont été effectuées. Ceci n'est pas absolument injustifié et a été maintenu dans la planche 8.

Groupe 3 (indice 3 R)

Formations conglomératiques bien cimentées, généralement aquicludes ou semi-aquicludes :
- Oligocène supérieur, conglomérat des Météores $O_3C'_1$ $O_3C''_1$, O_3C_2

Groupe 4 (indice 4 R)

Ensemble des formations cristallines non ultrabasiques et non calcaires
Crs, Gn, Sch, δ

Ce groupe rassemble des formations hétéromorphes et dont le comportement hydrogéologique sera vraisemblablement très varié (en particulier en ce qui concerne les gneiss et les granites d'une part et la schistes sériciteux et chloriteux d'autre part). Les données à disposition sont trop imprécises pour qu'il soit possible de les séparer et je les ai considérées dans l'ensemble comme semi-aquicludes.

Groupe 5 (indice 5 R)

Formations calcaires, généralement karstiques :

- ultra-basique (marbres verts, calcschistes)	UB - K
- marbres pélagoniens	Mri, Mrm
- calcaires jurassiques	JK, JKp, JKK, JKo
- calcaires crétacés	Kp, Ks, Ksp, Ksm et Kss
- calcaires cénozoïques	EK, MK

J'ai donc utilisé cette échelle approximative pour effectuer des groupements sur la carte géologique. Ceci m'a amené aux planches n° 8.1, 8.2, 8.3 et 8.4. Indices géologiques superficiels (Roche). Cartes géologiques dans lesquelles le détail de la carte géologique est maintenu en filigrane.

6.6.3. Commentaires

En raison de lacunes expérimentales, nous voyons qu'il n'est guère possible de définir des indices géologiques superficiels valables pour les différents types de sols et de roches rencontrés en Thessalie. J'ai quand même établi ci-dessus des classes approximatives d'indices pour les sols meubles et les affleurements rocheux (planches n° 7 et 8).

Cette subdivision est très imparfaite, car ces groupes sont physiquement plus hétérogènes que ceux qui avaient été déduits de l'échelle stratigraphique de référence, mis nous sommes bien obligés de nous en contenter.

Ces indices, faute de corrélations expérimentales, ne correspondent pas à des intervalles égaux et successifs des caractères géologiques utiles des roches et des sols. De plus, ces intervalles irréguliers ne sont pas forcément suffisamment réduits pour que les valeurs médianes des termes du bilan qui en seront déduites soient significatives et suffisamment précises. Ceci aura pour conséquence de compliquer le calcul de réglage, et de diminuer ensuite la précision des calculs du bilan.

D'autre part, il y a une certaine ambivalence dans les indices, car certaines roches de l'échelle stratigraphique ont l'aspect superficiel de terrains meubles, en particulier dans les formations plio-pléistocènes. Dans ces formations on a, lors de l'étude réelle, effectué des reconnaissances géophysiques au même titre que dans les terrains meubles quaternaires, dont certains se trouvent classés, de manière souvent justifiée, dans les terrains meubles.

Malgré ces défauts importants, il est utile de prendre en considération cette échelle approximative des indices géologiques superficiels pour continuer l'essai critique d'application de la méthode. Il doit être bien clair, cependant, que lors d'une éventuelle application réelle de la méthode, il ne faudrait pas se contenter d'une détermination aussi imprécise, mais suivre les cheminements systématiques indiqués en 3.3 ci-dessus ; ce qui, nous l'avons vu, aurait pu être fait pour un coût et dans des délais non disproportionnés par rapport à ceux de l'étude réelle.

Remarquons que si les intervalles des valeurs des caractères géologiques utiles des roches et des terrains meubles peuvent être définis avec la précision minimale résultant de l'exécution du programme de sondages et de mesures esquissé au paragraphe 3.3, il serait tout à fait possible d'introduire des procédures automatiques pour la définition des indices géologiques superficiels et pour le découpage de la région en zones de mêmes indices géologiques.

6.7. Le critère de finalité

Nous avons vu dans la première partie que la finalité des aires élémentaires était un critère de délimitation des aires élémentaires (point 1.3.8.).

Nous allons examiner si les données à disposition pour la Thessalie permettent de délimiter des zones distinctes correspondant aux 4 types de finalité définis en 1.3.7. et s'il est possible, par conséquent, d'aboutir à une division des B. V. U. de la Thessalie en aires élémentaires.

6.7.1. Aires élémentaires de végétation naturelle et aires élémentaires aménageables

Si l'on excepte les agglomérations et les plans d'eau existants sur lesquels nous reviendrons, l'ensemble de la région peut être subdivisé en deux parties :
- partie non aménageable,
- partie aménageable (pour des cultures, forêts et élevages).

Examinons sans faire d'a priori quels critères physiques permettent de définir la partie non aménageable de la Thessalie.

On peut déjà penser à des critères topographiques : pente et altitude.

A partir d'une certaine pente moyenne, il n'est plus possible d'aménager un terrain. On ne peut pas envisager de reboiser une falaise, en vue de son exploitation. Mais les aires de falaises n'ont pas été identifiées dans l'analyse topographique et au fond, ce n'était pas nécessaire, car le découpage de la région en zones de pentes moyennes déterminées se traduit par une représentation des projections sur un plan horizontal. Et les projections des pentes très raides sont très réduites. Il n'est donc pas commode de tenir compte d'un critère de pente pour séparer les parties aménageables et non aménageables d'une région. Lors d'une étude d'avant-projet, il serait intéressant d'individualiser ces zones de falaises qui interviennent comme des discontinuités dans l'organisation d'un aménagement éventuel. D'autre part, selon la nature géologique du terrain, il existe des pentes limites au-delà desquelles il n'est plus possible de réaliser un aménagement agricole.

L'altitude joue un rôle, elle aussi. Au-dessus de 1 800 à 2 000 mètres, dans les latitudes de la Thessalie, il n'est pas intéressant de reboiser. La croissance des arbres ne serait pas satisfaisante et il y aurait risque de gel des plants. On peut considérer, de plus, qu'au-dessus de 1 000 mètres, en Thessalie, aucune culture ne peut raisonnablement être envisagée. Les alpages existant au-dessus de 1 800 mètres et où l'élevage transhumant pourra continuer à s'alimenter l'été ne sont pas à considérer comme une "culture".

Nous retiendrons donc deux critères limites de mise en valeur en ce qui concerne l'altitude :
- 1 000 m pour les cultures - y compris les pâturages artificiels ;
- 1 800 m pour les forêts et les alpages.

Nous ne tiendrons pas compte ici de l'exposition étant donné que la limite d'altitude adoptée ici est approximative. On peut ensuite rechercher des critères géologiques.

Il ne sera guère possible d'aménager les zones d'affleurements rocheux dont les produits d'altération sont délavés immédiatement, ou sont impropres à toute végétation autre qu'un maquis clairsemé. Ceci nous amène à éliminer de la partie aménageable de Thessalie les types d'affleurements suivants :

- affleurements calcaires (indice géologique superficiel 5 R), quelle qu'en soit la pente moyenne, car, en raison de la karstification, la terra rossa, produit d'altération des calcaires est entraînée dans les fissures des lapiaz ;

- affleurements de roches dures (granites) gneiss, schistes cristallins, conglomérats, péridotites, gabbros, etc.) où la pente est trop forte pour que les produits d'altération restent en place sur une épaisseur suffisante (roches d'indices géologiques superficiels 3 R et 4 R pour des pentes supérieures à 40 %).

Nous pourrions même abaisser la limite de la pente moyenne des terrains non aménageables à 20 % pour certaines de ces roches : Gn, δ , δ , π , $O_3 c''_1$, Pc_2, si la différenciation géologique avait été suffisamment précise. En effet, pour le gneiss, le granite, les roches ultrabasiques dures (gabbros et dolérites), les produits d'altération sont sableux ou argilo-sableux et donc assez facilement entraînés par le ruissellement, du fait de leur faible cohésion. Pour la péridotite, le conglomérat inférieur des Météores et les conglomérats pléistocènes post-glaciaires, les produits d'altération sont à base d'argile, mais l'imperméabilité des roches et leur grain fin amènent les produits d'altération à être très facilement entraînés par le ruissellement.

Les autres catégories de roches peuvent être aménagées pour des pentes supérieures à 40 %. Il y a probablement des critères de difficulté (et donc de coût) d'aménagement à faire intervenir, mais les données à disposition ne m'ont pas permis de faire la distinction entre ces deux sous-catégories possibles de la partie aménageable de la région.

Les zones où l'épaisseur de terrain meuble n'est pas négligeable peuvent être aménagées, sauf si le sol est trop salé, ce qui n'est nulle part le cas en Thessalie.

Un troisième type de critère possible est hydrogéologique. Dans le cas où la nappe phréatique est trop élevée (marais et zones avoisinantes, par exemple), il n'est pas possible de reboiser. Mais à part, dans le cas de marais, il est toujours possible de trouver une culture techniquement possible (coton, pâturages artificiels, ...). Il n'y a plus guère de marais en Thessalie après les travaux de drainage commencés entre les deux guerres mondiales et terminés avec l'assèchement du lac de Karla, après la seconde guerre mondiale. Il existe cependant le "lac" de Nesson, dans la plaine de Sikourion, qui est inondé pendant l'hiver et se dessèche pendant l'été.

Le drainage de ce marais serait possible moyennant un tunnel assez court en direction du bassin du Pinios. Nous le maintiendrons donc dans la partie aménageable de Thessalie.

On pourrait craindre d'autre part que dans les zones d'affleurement rocheux, celle où la nappe phréatique est trop basse, ne soient impropres à un aménagement. Les arbres à enracinements profonds poussent leurs racines jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 5 mètres, en général, et ils s'alimentent sur la rétention, qui peut être alimentée soit depuis le haut (précipitation), soit par ascension capillaire depuis la nappe phréatique. Comme il pleut en général en toutes saisons, en Thessalie, quoique de façon irrégulière, la rétention sera toujours alimentée soit par la pluie, soit par la nappe (sauf dans les calcaires, trop largement fissurés et éliminés par ailleurs pour des raisons géologiques). On n'a donc pas à éliminer de zones sur la base d'un critère de trop grande profondeur de la nappe phréatique - ou ce qui revient au même, de trop grande épaisseur de la tranche superficielle.

Sur la base des données à disposition, nous avons donc pu définir une subdivision de la Thessalie en trois parties :

- partie non aménageable,
- partie aménageable par boisements seulement,
- partie aménageable par cultures, boisements et élevages.

On aurait pu préciser dans les deux parties aménageables les zones d'aménagement facile et celles d'aménagement techniquement possible, mais délicat. Ceci aurait introduit un type de frontière de plus dans la subdivision du B. V. U. et rien ne permet de dire que ceci aurait été utile. Il vaut mieux rejeter cette caractéristique de plus ou moins grande facilité d'aménagement sur la partie agro-socio-économique de l'étude.

A titre de dernière remarque, indiquons que les critères indiqués ci-dessus pour la subdivision de la région en zone aménageable et zone non aménageable sont tels qu'une automatisation de la procédure est aisément réalisable de manière générale.

6.7.2. Aires élémentaires hydrographiques

6.7.2.1. Aires élémentaires hydrographiques naturelles

Il n'y a pas de lac d'importance en Thessalie. En raison de l'échelle d'étude, un grand nombre de cours d'eau sont trop étroits pour être pris en considération comme aires élémentaires hydrographiques. Le Pinios et le Titarissios, sur à peu près toute leur longueur peuvent être considérés comme des aires élémentaires hydrographiques naturelles. Il en va de même de certains tronçons du cours de Portaïkos, du Pliouris, de Kalendzis, du Karambalis, du Sofaditis, de l'Enipefs, et de quelques autres torrents mineurs, dans la partie amont de leur cône de déjection dans la plaine de Thessalie. Les limites de ces aires hydrographiques naturelles coïncident d'ailleurs avec celles de la carte géologique, sur laquelle les alluvions sablo-graveleuses actuelles ont été différenciées. La délimitation des aires hydrologiques naturelles n'introduit donc pas de frontières nouvelles dans la définition des aires élémentaires. Elle permet cependant d'éliminer des aires de la partie aménageable de la région.

La prise en compte automatique de ces aires hydrographiques naturelles est aisée et valable si la carte du réseau hydrographique est suffisamment précise.

6.7.2.2. Aires élémentaires hydrographiques artificielles

Ce sont les zones qui peuvent être éventuellement occupées par des retenues artificielles. Ceci nous ramène donc aux sites de barrage. Ce point avait déjà été abordé au moment de la délimitation des B. V. U., au chapitre 5.

Les sites de barrage encore en considération après la première élimination effectuée sont indiquées sur la planche n° 3 et récapitulés dans le tableau 6.7.2.2.a.

TABLEAU 6.7.2.2.a SITES DE BARRAGES RESTANT APRES LA PREMIERE ELIMINATION [voir planche N° 3]

CODE	NOM	CODE	NOM	CODE	NOM
300 01	Parapotamos	414 01	Theopetra	553 01	Filiadhon
313 01	Ambelia	421 01	Mouzaki	556 01	Kastri
314 01	Menkhori	421 02	Pili	566 02	Aloni
320 01	Kria Vrissi	426 01	Ayioneri	569 01	Paraskevi
323 01	Palio Dherli	426 02	Aforismos	578 01	Koutsofliani
322 01	Smoukovo	436 01	Likoudhi	576 01	Gondres
326 01	Kefalovrisson	440 01	Andria	636 01	Stefanovounon
326 02	Kaloudha	470 01	Yerakari	642 01	Perivolion
336 02	Megalos Lakkos - axe 2 -	513 01	Pournarion	643 01	Makro Livadhon
336 04	Paleomonastiro	514 01	Koudhro Tsouma	643 01	Nea Makrissi
336 05	Kaias	516 01	Vlakhoyianni I	643 03	Ayios Yeoryos
340 01	Matoneri	522 01	Dafnospilia	646 01	Toumbana
340 02	Kriminitsa	522 02	Rakhoula	652 01	Perivolion
350 01	Asprokklissia	537 01	Koudhro Magoula	686 01	Livadheron
412 01	Kedhros	543 01	Metallion	686 03	Akri

Ces 45 sites sont d'importance variable et localisés en diverses parties de la Thessalie. Ils ont fait l'objet d'examens géologiques complémentaires, qui ont comporté la plupart du temps une cartographie géologique plus détaillée que le travail géologique d'ensemble, quelquefois même des reconnaissances géophysiques (sismique réfraction) et par sondages mécaniques avec échantillonnage continu, exécution d'essais d'eau et équipement en piézomètres sur les sites et en certains points critiques des retenues, par puits de reconnaissances, prélèvements d'échantillons et essais de mécanique des sols (identification) sur les zones envisagées pour les matériaux de construction. Les levés géologiques ont été effectués au 1/10 000 sur les principaux sites de barrage et au 1/50 000 ou 1/20 000 (agrandissement du 1/50 000) pour les sites de moindre importance.

J'ai rassemblé dans le tableau 6.7.2.2.b les caractéristiques principales des barrages examinés, les traits principaux des reconnaissances effectuées, leurs résultats, les conclusions géologiques quant à l'intérêt et à la possibilité de construire l'ouvrage, quelques remarques quant à l'utilité des reconnaissances effectuées, avec appréciation de l'intérêt de la construction de l'ouvrage basée sur la proximité des aires d'utilisation possibles et une proposition technique de maintien en considération ou d'élimination de l'aménagement.

(1) Reconnaissances effectuées lors d'études antérieures

Tableau 6.7.2.2.b. Caractéristiques principales des barrages examinés

Identification des sites					Reconnaissances effectuées																Conclusions géotechniques								Utilisation			Proposition technique
					Leves geologiques				Geosismique				Sondages mecaniques						Materiaux de construction		Remarques	Retenue			Site		Materiaux		Ouvrage envisageable					
					retenue		site		retenue		site		retenue			site						etancheite	stabilite	engravement	fondations	etancheite	type	quantite	type	hauteur limite m	distance km	type	remarques	
N°	Code	Nom	Cours d'eau	Bassin versant km2	echelle	S Km2	echelle	S Km2	profils	L km	profils	L km	Nb	Pmax m	Tot m	Nb	Pmax m	Tot m	puits	essais													
1	30001	Parapotamos	Pinios		1/50.000	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Reconnaissances insuffisantes	Correcte	Correcte	Assez Faible	Correction en RG Delicates en RD	Correcte	Terre Enrochements	Non limitative	Enrochements zonés	—	2 à 5 km Centrale de pied	Irrigation Electricité	Plaine de Ghoni, en complément d'eaux souterraines	Site retenu
2	31301	Ambelia	Enipefs	521	1/50.000	30	1/10.000	10	— 5	— 6,7	— —	— —	— 4	— 80	— —	5 5	77 80	300 291	— 10	— (1) 30	Reconnaissances anciennes - une enquête locale aurait permis d'éliminer ce site	Correcte	Mauvaise (risque sismique)	Moyen	Mauvaises (risque sismique)	Correcte	Terre Enrochements	Non limitative	Ouvrage déconseillé		—	—	—	Site éliminé
3	31401	Neokhori	Neokhoritis	162	1/50.000	35	1/10.000	5	—	—	2	0,6	—	—	—	—	—	—	10	20	Reconnaissances un peu légères. Un ou deux sondages mécaniques auraient été utiles	Correcte	Correcte	Assez fort	Correctes - Alluvions épais	Correcte (appui) Traitable (Calluvions)	Graviers Argile	Non limitative	Terre, zonée	—	1-10 km 30 km	Irrigation Alimentation Urbaine	Thessalie occidentale Larissa	Site retenu
4	32001	Kria Vrissi	Pinios	983	1/50.000	206	1/10.000	10	— —	— —	6	4,5	— —	— —	— —	12 6	81 96	517 373	— 11	— (1) 25	Reconnaissances excessives pour une étude préliminaire.	Correcte	Correcte	Assez fort	Correctes - Forte épaisseur d'alluvions	Correcte (appui) Traitable (Calluvions)	Graviers Argile	Non limitative	Terre zonée	75 m env. (Topo)		Irrigation Alimentation Urbaine	Thessalie occidentale et orientale	Site retenu
5	32201	Smoukovo	Sofaditis	382	1/50.000	24	1/10.000	4	— —	— —	5	— 0,7	2 —	50 —	70 —	24 3	80 100	925 270	18 —	30 (1) —	Reconnaissances excessives pour une étude préliminaire.	Correcte	Correcte	Assez fort	Correctes	Correcte	Rocher Argile (calcaire)	Non limitative	Béton contreforts	120 m env. (Topo)	10 km min	Irrigation	Thessalie occidentale (partie Sud)	Site retenu
6	32301	Palio Dherli	Enipefs	405	1/50.000	24	1/10.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Reconnaissances insuffisantes.	Correcte	Correcte	Assez fort	Corrections	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau central	—	20 km min.	Irrigation	Thessalie occidentale (partie Est)	Site retenu
7	32601	Kefalovrisson	Titarissios	686	1/50.000	40	1/10.000	16	—	—	—	—	—	—	—	3	60	114	—	—	Les levés géologiques auraient suffi	Mauvaise (Karst)	Correcte	Fort	Corrections	Mauvaise	Non reconnus	—	Ouvrage déconseillé		—	—	—	Site éliminé
8	32602	Kaloudha	Voulgara	476	1/50.000	12	1/10.000	6	—	—	—	—	11	90	621	—	—	—	10	20	Les sondages mécaniques pourraient être remplacés par de la géophysique	Correcte	Correcte	Assez fort	Correctes	Correcte	Rocher Argile	Non limitatives	Enrochements à noyau central	85 m env. (Topo)	5 à 30 km	Irrigation Alimentation Urbaine	Titarissios - Thessalie orientale	Site retenu
9	33602	Megalos Lakkos	Voulgara	276	1/50.000	12	1/10.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Reconnaissances à peine suffisantes.	Correcte	Correcte	Moyen	Correctes	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau en masque	36 m env. (Karst)	2 à 10 km	Irrigation	Plateau d'Olimbos - Pompage nécessaire	Site retenu
10	33604	Paleomonastiro	Elassonitikos	209	1/50.000	33	1/10.000	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	15	Reconnaissances suffisantes pour une étude préliminaire.	Correcte	Correcte	Moyen	Correcte	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau central	—	6 à 10 km	Irrigation Alimentation Urbaine	Plaine d'Elasson Elanon	Site retenu
11	33605	Knias	Lianopotamo	179	1/50.000	10	1/10.000	5	—	—	—	—	—	—	—	2	70	140	10	20	Sondages superflus pour une étude préliminaire	Correcte	Correcte	Moyen	Correcte	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau central	—		Irrigation Alimentation Urbaine	Relais éventuel de Kaloudha 326 02	Site retenu
12	34001	Matoneri	Malakassio-tikos	168	1/50.000	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Reconnaissances à peine suffisantes. Il aurait fallu rencontrer les marnes	Correcte	Correcte	Assez fort	Correcte	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau central	—		Irrigation	Vallée du Malakassiotikos. Deux zones 340-02	Site éliminé
13	34002	Kriminitsa	Malakassio tikos	158	1/50.000	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Assez fort	Correcte	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochement à noyau central	—		Irrigation	Est économiquement plus intéressant	Site retenu
14	35001	Asprokklissia	Mourganis	213	1/50.000	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Assez faible	Correcte	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau en contrefort	—	0 - 10 km	Irrigation	Vallée du Mourganis - Fort double emploi avec 340-01. Plus intéressant	Site éliminé
15	41201	Kedhros	Sofaditis	111	1/50.000	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Assez fort	Correcte	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau central	60 m env (Topo)	0 - 14 km	Irrigation	Thessalie occidentale (partie Sud)	Site retenu
16	41401	Theopetra	Litheos	116	1/50.000	42	1/10.000	9	—	—	3	1,9	—	—	—	12	80	573	10	20	Reconnaissances assez lourdes, justifiées par les problèmes posés	Correcte	Correcte	Moyen	Problème d'alluvions	Problème d'alluvions	Rocher, Alluvions, argiles	Non limitative	Enrochements à noyau central	60 à 65 m. (Topo)	0 - 50 km	Irrigation Alimentation Urbaine	Site complémentaire de Kria Vrissi 320-01. Ne se justifie pas isolément	Site retenu
17	42101	Mouzaki	Pliouris	142	1/50.000	32	1/10.000	4	—	—	5	1,2	—	—	—	5	115	442	10	20	δ°	Correcte	Correcte	Assez fort	δ°	δ°	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau central	—	0 - 50 km	Irrigation Alimentation Urbaine	Thessalie Occidentale	Site retenu
18	42102	Pili	Portaikos	127	1/50.000	25	1/10.000	4	—	—	—	—	—	—	—	6	90	513	10	15	δ°	Correcte	Correcte	Assez fort	δ°	δ°	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements à noyau central	70 m env. (Topo)	0 - 50 km		A coupler en dérivation par tunnel avec Mouzaki 421.01	Site retenu
19	42601	Ayioneri	Elassonitikos	148	1/50.000	12	1/10.000	5	—	—	—	—	—	—	—	2	50	100	10	20	Même remarque que pour Knias 336-05	Correcte	Correcte	Moyen	Bornes	Borne	Rocher Argile	Non limitative	Contreforts ou enrochement	50 m. (Topo)	3 - 10 km	Irrigation	Plaine de Vlakhoyianni (Titarissios)	Site retenu
20	42602	Aforismos	Paleomandano	81	1/50.000	9	1/10.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Même remarque que pour Matoneri 340-01	Correcte	Correcte	Assez fort	Corrections	Borne	Alluvions Argile	Non limitative	Terre zonée	—	0 - 10 km	Irrigation	δ°	Site retenu
21	43601	Likoudhi	Lianopotamo	143	1/50.000	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Correcte	Rocher Alluvions Argile	Non limitative	Enrochements à noyau central	—	0 - 6 km	Irrigation	Plateau d'Olimbos Pompage nécessaire	Site retenu
22	44001	Andria	Klinovitikos	108	1/50.000	6	—	—	—	1-	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Assez fort	Corrections	Correcte	Alluvions Argile	Non limitative	Terre zonée	—	0 - 6 km	Irrigation	Situation analogue à 340-02, pour la Klinovitikos	Site retenu
23	47001	Yerakari	Mikanis	88	1/50.000	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Bornes	Borne	Rocher Argile à 5 km	Non limitative	Béton	—	0 - 6 km 3 - 10 km	Irrigation	Plaine de Koniskos Vallée du Mourganis	Site retenu
24	51301	Pournarion	Kakkara	54	1/50.000	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	—	0 - 20 km	Irrigation	Thessalie occidentale (Partie Sud-est)	Site retenu
25	51401	Kondhro Tsouma	Mourgaya	53	1/50.000	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Borne	Rocher Argile	Non limitative	Enrochement	—	2 - 8 km	Irrigation	Thessalie occidentale (Partie nord)	Site retenu
26	51601	Vlakhoyanni 1	Smoliotikos	58	1/50.000	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Borne	Rocher Argile à 4 km	A reconnaître	Enrochement	—	2 - 8 km	Irrigation	Plaine de Vlakhoyanni (Titarissios)	Site retenu
27	52101	Dafnospilia	Kalendsis	65	1/50.000	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Borne	Rocher Alluvions Argile	Non limitative	Enrochements	—	1 - 10 km	Irrigation	Thessalie occidentale (Partie Sud)	Site retenu
28	52102	Rakhoula	Karambalis	58	1/50.000	7	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Correcte	Petit problème d'alluvions Rocher Alluvions Argile	Non limitative	Enrochement	40 m env (Topo)	1 - 10 km	Irrigation	δ°	Site retenu
29	53701	Kondhro Magoula	Karaman	46	1/50.000	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Bornes	Borne	Rocher Argile	Non limitative à reconnaître	Enrochements	—	3 - 6 km	Irrigation	Thessalie Orientale	Site retenu
30	54301	Metallion	Zarmando Rema	43	1/50.000	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Probable Correcte	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	35 m env (topo)	0 - 5 km	Irrigation	Plateau de Dhomokos	Site retenu
31	55301	Filiadhon	Vergorrema	46	1/50.000	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Assez fort	Mauvaises	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Ouvrage déconseillé					Site éliminé
32	55601	Kastri	Paleomandano	57	1/50.000	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Faible	Corrections	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	45m env. (topo)	0 - 5 km	Irrigation	Haute zone de Dhonkati (exemple de base)	Site retenu
33	56602	Aloni	Sarandoporou Rema	44	1/50.000	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Correcte	Correcte	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	—	2 - 10 km	Irrigation	Plateau d'Olimbos	Site retenu
34	56901	Paraskevi	Potamia Rema	24	1/50.000	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Faible	Corrections	Corrections	Rocher Argile	Non Limitative	Enrochements	—	0 - 5 km	Irrigation	Haute zone de Dhonkati (Partie ouest)	Site retenu
35	57001	Koutsofliani	Malakassio tikos	26	1/50.000	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Corrections	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	—	0 - 15 km	Irrigation	Topographiquement mieux placé de 340-02	Site retenu
36	57601	Gondres	Mouradha	33	1/50.000	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Faible	Corrections	Corrections	Rocher	Non limitative	Enrochements	—	0 - 6 km	Irrigation	Haute zone de Dhonkati (exemple de base)	Site retenu
37	63601	Stefanovounor	Affluent de l'Elassonitikos	6	1/50.000	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Reconnaissances suffisantes pour une étude préliminaire	Correcte	Correcte	Faible	Corrections	Corrections	Rocher	Non limitative	Enrochements	—	0 - 3 km	Irrigation	Plaine d'Elasson (Partie sud)	Site retenu
38	64201	Perivolion 1	Boughazi Rema	12	1/50.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Corrections	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	—	0 - 5 km	Irrigation	Plaine de Xinias.	Site retenu
39	64301	Makro Livadhon	Palamou Rema	11	1/50.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Corrections	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	35 m env (topo)	0 - 3 km	Irrigation	Plateau de Dhomokos	Site retenu
40	64302	Nea Makrisi	Klimato Rema	11	1/50.000	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Corrections	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	40 m env (topo)	0 - 3 km	Irrigation	Plateau de Dhomokos	Site retenu
41	64303	Ayios Yeoryos	Zarmando Rema	10	1/50.000	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Corrections	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	35 m env (topo)	0 - 3 km	Irrigation	Plaine de Xinias	Site retenu
42	64601	Toumbana	Papoutsi Rema	11	1/50.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Faible	Corrections	Corrections	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	50 m env (topo)	0 - 6 km	Irrigation	Plateau d'Olimbos Pompage nécessaire	Site retenu
43	65201	Perivolion2	Dhereliotis Rema	14	1/50.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Moyen	Corrections	Problème d'alluvions	Rocher Argile	Non limitative	Enrochements	—	0 - 3 km	Irrigation	Plaine de Xinias	Site retenu
44	68601	Livadheron	Mokratis Rema	16	1/50.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Faible	Corrections	Corrections	Rocher	Non limitative	Enrochements	—	0 - 4 km	Irrigation	Haute zone de Livadheron	Site retenu
45	68603	Akri	Mouradha	5	1/50.000	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	δ°	Correcte	Correcte	Faible	Corrections	Corrections	Rocher	Non limitative	Enrochements	—	0 - 3 km	Irrigation	Haute zone de Livadheron	Site retenu

On peut définir les surfaces potentielles de retenue en utilisant les fiches physiques de retenue telle que celle de la figure 5.2.1 et en déterminant les volumes de stockage au moyen d'une seconde approximation hydrologique moins grossière que pour la première élimination, basée sur les cartes d'isohyètes établies durant l'étude. D'autre part, le niveau de retenue varie au cours d'une année et même d'un pas de temps élémentaire, selon l'exploitation ou le remplissage. Il y a là une source d'erreurs systématiques qu'il me paraît difficile d'éviter mais dont l'influence sera minime, lors d'une étude préliminaire à tout le moins.

Ces aires ne seront pas forcément des aires élémentaires hydrologiques. D'abord, ce n'est pas parce qu'un barrage réservoir est possible, qu'il sera obligatoirement construit. Et c'est l'intérêt justement d'un modèle hydrologique global permettant des calculs répétitifs de bilan, qu'il permet d'envisager successivement et rapidement toutes les éventualités de construction d'ouvrages de retenue. Ensuite, certaines retenues auront des surfaces trop petites pour qu'il soit significatif de les considérer comme des aires élémentaires distinctes. Ceci est examiné plus en détail au point 6.8 ci-dessous.

Du tableau 6.7.2.2 b il ressort que les reconnaissances effectuées ont été assez mal équilibrées dans l'optique d'une recherche de données pour un calcul de bilan hydrologique et hydrogéologique régional préliminaire. Il n'y a pas là critique de ce qui a été fait, mais examen critique. Le problème de l'aménagement de la Thessalie, tel qu'il était posé en 1966 était lui-même déséquilibré car il portait principalement sur les grands barrages. Et il a été traité comme tel. Ceci était déjà un progrès par rapport aux études précédentes, car c'était la première fois que le problème se rapportait à l'ensemble de la région (à l'exception, il est vrai, du périmètre de Mitropolis, près de Kardhitsa qui était déjà en cours d'aménagement avec les eaux du barrage de la Megdova - situé hors du bassin versant de la région).

C'était aussi la première fois que les eaux souterraines étaient jointes au problème des grands barrages pour une étude régionale de l'ensemble de la région. Il n'y a donc pas ici critique de ce qui a été fait - et ce, d'autant plus que le résultat recherché, c'est-à-dire un plan régional d'aménagement des plaines correspondant à un optimum économique - a été atteint. Mais le problème posé était encore mal équilibré. Il n'était pas possible, dans ce cadre, de prendre en considération les éventuels reboisements et aménagements des vallées de montagne, qui pourtant consommeront des quantités d'eau non négligeables et modifieront les conditions du bilan à l'aval. Ces problèmes "périphériques" ne constituent peut-être pas un élément prépondérant dans la recherche d'un optimum économique d'aménagement régional : les surfaces aménageables des plaines sont à première vue bien plus importantes et la population y est bien plus nombreuse. Et pourtant, en examinant simultanément la carte des pentes et la carte géologique, on voit à l'évidence que la surface aménageable dans les régions montagneuses (voir point 6.7.1) est loin d'être négligeable.

D'autre part, le bois, en particulier dans les régions méditerranéennes, est un produit rare, coûteux et la plupart du temps importé d'Europe du Nord ou d'Europe orientale. On peut alors se demander s'il était justifié de négliger ces parties montagneuses dans une étude de rentabilité d'aménagement régional. Cette question peut se poser de manière encore plus aiguë si l'on considère l'aspect humain du problème : les montagnes du Pinde et la massif cristallin du Nord de la Thessalie ont très longtemps été des zones de peuplement relativement importantes. Ce peuplement était de type nomade et semi-nomade (Tsarakatsanes et Valaques), et les activités de ces populations étaient essentiellement l'élevage (ovins, caprins et à un moindre degré, bovins), et à titre secondaire, la forêt. Il m'a été donné de voir l'effort entrepris dans les bassins proches de la région étudiée (Metsovon-Perivolion)et du haut Akheloos (Tria Potamia - Ghardiki) dans les domaines du reboisement, de l'exploitation forestière et de l'élevage.

Ainsi, près de Metsovon, les pâturages d'été bénéficient de l'apport d'eau de lacs collinaires et un élevage bovin de qualité est en plein développement. Il me semble qu'il y a dans ces zones montagneuses un potentiel très intéressant, économique et humain, de développement, qui aurait dû être pris en compte dans une étude d'aménagement régional. J'ajouterai que les populations citées sont dynamiques, laborieuses et inventives et qu'il se pose, depuis de nombreuses années, un grave problème de migration de populations (qui s'est traduit par un surpeuplement anarchique des agglomérations et en particulier d'Athènes, et par des implantations dans la plaine - Neon Perivolion, Neon Monastirion en bordure de la plaine de Karla, Aghia Triada au-dessus de Skotoussa aux environs de Farsala, etc. - avec tous les problèmes sociaux que cela pose). A ce problème s'ajoute celui du sous-développement économique des communautés restant dans la montagne, générateur de mécontentement politique (les montagnes du Pinde et du Nord de la Thessalie ont été, à titre d'exemple, l'un des foyers et aussi l'un des derniers bastions de la résistance communiste durant la seconde guerre mondiale et la guerre civile qui lui a fait suite (1946-1949).

Sans aller plus loin dans la digression, concluons qu'il aurait été opportun de prendre en compte ces régions montagneuses dans une étude de développement régional. Et comme il apparaît à l'examen des tableaux récapitulatifs des caractéristiques et des reconnaissances effectuées sur les sites de barrage, de l'exposé des points 6.7.2 et 6.7.3, et des paragraphes 6.1 à 6.5, cela aurait été possible, de manière à peu près acceptable sur la base des données rassemblées lors de l'étude réelle. Moyennant une orientation légèrement différente des reconnaissances géologiques, géophysiques et géotechniques, cette prise en compte aurait eu la précision nécessaire et suffisante pour la mise en œuvre de la méthode globale de calcul du bilan hydrologique, sans accroissement excessif de délais ni de coûts.

En ce qui concerne l'automatisation de cette partie du travail de préparation des données pour le calcul du bilan, la remarque faite au sujet de l'examen géologique rapide des sites non éliminés pour des raisons économiques, et hydrologiques, est encore valable. Il se peut que des programmes de traitement du détail de l'information géologique et géotechnique soient réalisables. Mais ces programmes ne seront pas intégrables aisément à la programmation automatique du choix des sites, et donc de la délimitation des aires élémentaires. Il y a nécessairement une discontinuité dans l'automatisme, car les critères de décision pour le choix ou le rejet d'un site de barrage sont nombreux et leur définition n'est pas constante. Ce choix doit donc être fait par des spécialistes, de manière "manuelle". Ces décisions peuvent ensuite être injectées simplement dans le programme général éventuel de délimitation des aires élémentaires car il y a une question simple ne pouvant avoir que deux réponses : oui ou non.

6.7.3. Aires élémentaires urbaines et industrielles

Nous avons vu dans la première partie (points 1.3.7. et 2.4.) qu'il n'était pas nécessaire de distinguer les agglomérations essentiellement agricoles et que leur consommation en eau - et les rejets d'eaux usées de leur population - était à répartir sur la surfaces des aires élémentaires aménageables dépendant de cette agglomération. Seules les agglomérations mixtes, c'est-à-dire vivant de l'agriculture, de l'agro-industrie des autres industries et qui comportent un secteur administratif, judiciaire et d'instruction publique important doivent être individualisées en tant qu'aires élémentaires. Pour la Thessalie, le problème est simple : les agglomérations à prendre en compte séparément sont les chefs-lieux de département (Nomos) : Larissa, Trikala, Kardhitsa, et d'arrondissement (Eparchie) : Elasson, Deskati, Tirnavos, Velestinon, Aghia, Palamas, Kalambaka, Farsala et Domokhos, soit 12 agglomérations. En fait, on doit distinguer deux parties dans chaque agglomération :

- les parties existant actuellement, ou "noyaux" ;
- les parties, "satellites", situées à proximité du "noyau" qui font actuellement partie des zones aménageables ou de végétation naturelle et qui peuvent être urbanisées ou industrialisées dans des étapes ultérieures de développement.

La délimitation des "noyaux" aurait été très aisée sur la base des documents à disposition lors de l'étude préliminaire réelle. En plus des cartes au 1/50 000 et au 1/20 000 nous disposions de photographies aériennes. Le problème se ramenait à une simple manipulation graphique.

Le choix des parties satellites qui peuvent être urbanisées ou industrialisées aurait aussi été aisé. Par comparaison entre les photographies aériennes prises à plusieurs années d'intervalle, par entretien avec les responsables des aménagements urbains de ces agglomérations et par examen des conditions géologiques et hydrogéologiques, il aurait été aisé de les définir. Je n'ai eu à ma disposition lors de la préparation de l'application critique de la méthode globale, objet de cette étude, que les cartes au 1/50 000 et au 1/20 000. Aucune indication des tendances du développement urbain ne nous a été communiquée. Malgré ces bases incomplètes, j'ai quand même fait un choix, à titre de tentative, assez arbitrairement.

La délimitation des aires élémentaires urbaines et industrielles résulte donc de deux démarches :

- une démarche topographique et éventuellement géotechnique, pour la détermination du noyau et des aires satellites possibles ;
- un choix parmi ces satellites possibles, de ceux qui seront effectivement urbanisés dans le cas de calcul envisagé.

Ces deux démarches peuvent aisément être automatisées. La première le serait de manière analogue à ce qui a été exposé pour les B. V. U., selon des critères différents. La seconde le serait sous une forme de décision. Comme l'on doit envisager un calcul pour chaque cas d'extension urbaine retenu comme possible, le problème est élémentaire.

6.8. Le découpage de la Thessalie en aires élémentaires - Résultats - Commentaires

6.8.1. Le découpage en aires élémentaires

6.8.1.1. Contraintes de dimensions pour les aires élémentaires

Nous avons examiné dans les parties précédentes du chapitre 6 comment on pouvait pratiquement déterminer les valeurs des critères choisis en 1.3.8. pour la délimitation des aires élémentaires. Nous avions constaté en 1.3.8. que l'adoption de nombreux critères de découpage aurait pour conséquences de compliquer l'opération et de multiplier de manière excessive le nombre des aires élémentaires. Une comparaison de la carte des pentes et de la carte géologique confirme cette constatation et permet de contrôler que retenir la pente moyenne comme critère de découpage aurait entraîné une complication injustifiée du découpage : en effet, le tracé des limites entre roches affleurantes et alluvions sur la carte géologique est souvent très voisin du tracé de la limite entre les classes de pentes 4 (10-20 %) et 5 (20 - 40 %). Mais ces tracés ne concordent pas. Ils sont très proches et s'entrecroisent de telle manière que l'on aurait eu, en maintenant ces deux critères de découpage, un chapelet d'aires élémentaires souvent minuscules sur le pourtour des zones de terrain meuble. Il en serait résulté un enchevêtrement très complexe d'aires élémentaires dans les partie montagneuses, lors de l'utilisation du chevelu des crêtes pour organiser les aires élémentaires à l'amont de ce chapelet d'aires élémentaires minuscules, de manière à ce que le calcul cumulatif soit possible pour le bilan. Ce type de chapelet, indépendamment de la complication du calcul qu'il aurait entraîné, aurait été fort probablement illusoire, car il aurait été presque entièrement situé dans la frange d'incertitude du tracé des frontières, même si ce dernier est automatisé avec beaucoup de soin.

Il est donc indispensable que les aires élémentaires ne soient pas trop petites. Il y a là une recherche de la taille minimale à partir de laquelle le bilan élémentaire d'une aire sera du même ordre de grandeur que l'incertitude sur l'aire immédiatement à l'aval.

Il ne faut pas non plus qu'elles soient de taille excessive, car à partir d'une certaine dimension, l'attribution à l'ensemble d'une surface de valeurs pondérées des facteurs utiles n'a plus aucune signification. Nous avons déjà vu en 1.3.8. que la pondération des indices géologiques superficiels était une procédure dangereuse, car une surface composée par exemple pour une moitié de calcaire (indice 5 R) et pour l'autre moitié de terre argileuse (indice 9 M) ne pourra être caractérisée de manière pondérée sans que l'on ait recours à la correspondance entre indices géologiques superficiels et termes du bilan, avant l'exécution des calculs de réglage. La méthode y perdrait beaucoup en précision et son intérêt serait alors très discutable.

De manière analogue, on ne peut accepter qu'une grande surface d'indice géologique superficiel sensiblement constant et de même finalité soit une seule aire élémentaire, même si elle débouche entièrement sur une surface analogue, c'est-à-dire d'indice géologique superficiel et de finalités constantes.

En effet, caractériser l'ensemble d'une telle surface par une pente moyenne pondérée sera peu représentatif et ce d'autant plus que la répartition sur cette surface de zones appartenant à des classes de pentes différentes sera plus irrégulière. De plus, même si les pentes étaient régulièrement réparties sur cette surface, des indices géologiques phréatiques et profonds, agronomiques et climatiques ainsi que les valeurs des précipitations et de la température de l'air obtenues par pondération sur toute cette surface risquent fort de ne pas être représentatifs avec une précision suffisante et le calcul perdra de sa valeur.

D'autre part, les conséquences qu'aura l'eau affluente sur une aire aval seront différentes selon que cette eau arrive dans la partie amont ou la partie aval de cette aire. Comme on ne peut guère tenir compte de cette différence dans la méthode globale exposée dans la présente étude, il faut réduire autant que possible les dimensions des aires élémentaires. Ceci doit se faire par une recherche de compatibilité entre l'impératif de précision minimale acceptable et celui de complication minimale du calcul. Le premier de ces deux impératifs variera selon la phase d'étude en cours. On peut admettre à titre d'exemple qu'une imprécision de 10 % sur la détermination des facteurs utiles sera acceptable lors d'une étude préliminaire. L'imprécision résultante sur les termes du bilan sera du même ordre de grandeur. Pour les phases ultérieures de l'étude, la précision devrait atteindre 5 %. Ces chiffres limites devront d'ailleurs être contrôlés lors d'applications pratiques.

L'impératif de complication non excessive du calcul dépendra des caractéristiques de l'ordinateur utilisé. Le calcul du bilan soit se faire en deux étapes :

- calcul des bilans possibles pour chaque B. V. U. ;
- recherche des combinaisons possibles à l'échelle de la région (ou de la fraction de région en cours d'étude) entre bilans de B. V. U.

Ce calcul se fera par cumuls répétitifs, pour diverses hypothèses de dotations, et donc pour divers ensembles equidistants de valeurs de paramètres choisis dans des intervalles de valeurs plausibles (voir point 2.4.). A condition de ne pas vouloir choisir un ensemble de valeurs différentes pour chacune des aires élémentaires, on peut déjà limiter la complication du calcul et la durée du passage en ordinateur pour un B.V.U. : on diminue le nombre des calculs répétitifs. Ceci est au fond raisonnable. En effet, il serait peu plausible d'envisager dans un même B. V. U. des dotations différentes pour deux aires de mêmes caractéristiques physiques. Ceci amènerait à une complexité inextricable du schéma d'aménagement et à des impossibilités pour l'étude agro-socio-économique. Ceci est en tous cas absolument vrai pour une étude préliminaire. Dans les phases ultérieures de l'étude, on peut envisager une diversification prudente des dotations. De toute manière, un calcul de bilan sera une simulation de situation pour un jeu d'hypothèses déterminées en ce qui concerne les dotations, les prélèvements et les rejets. Il n'y aura pas à rechercher la combinaison optimale entre les bilans élémentaires, mais à les agglomérer par cumul d'amont vers l'aval en vérifiant à chaque pas cumulatif qu'un certain nombre de contraintes sont respectées à l'aval. Le nombre d'aires élémentaires est donc déterminé par la capacité de l'ordinateur. Comme nous avons accepté des dimensions maximales différentes pour les B. V. U. de montagne et ceux de plaine, nous aurons des dimensions moyennes différentes pour les aires élémentaires de chacun de ces types de B. V. U., à nombre égal d'aires élémentaires.

Nous pouvons admettre que ce nombre limite d'aires pour un ordinateur scientifique point trop élaboré, sera de l'ordre de 50 à 60 aires élémentaires: ceci pour fixer les idées. Dans ces conditions les dimensions des aires élémentaires seront susceptibles de varier entre environ 0,5 et 6 km^2 pour les B. V. U. de montagne, 1 et 20 km^2 pour les B. V. U. de plaine. Ceci en théorie. Examinons sur l'exemple thessalien comment ceci peut être appliqué, en cherchant de plus à éviter que les dimensions des aires élémentaires d'un même B. V. U. soient trop hétérogènes.

6.8.1.2. Application pratique des critères de finalité - Règles d'adaptation

Malgré les lacunes expérimentales et les imperfections mécaniques de tracé, j'ai établi une carte des pentes et une carte géologique du bassin de Dheskati Valanidha (planches n° 5 et 8 e), préalablement découpé en B. V. U. Il y a sur cet exemple de base une aire "noyau" urbaine et industrielle : Dheskati, et 4 aires hydrologiques artificielles possibles :

- 426-02 Aforismos
- 556-01 Kastri
- 576-01 Gondres
- 686-03 Akri.

Considérons a priori que ces surfaces doivent être individualisées en tant qu'aires élémentaires. En vertu du principe du calcul nous devons admettre que le ruissellement arrivant à ces aires ne peut venir que d'un nombre entier d'aires élémentaires amont. Les bassins versants délimités par les lignes de crête intersectrices extrêmes de ces aires élémentaires, seront donc constitués par un nombre entier d'aires élémentaires. Ceci peut être considéré comme un début de découpage des B. V. U. et a été indiqué sur la planche n° 9e-1. Superposition des lignes critères de délimitation des aires élémentaires. Mais ceci ne suffit pas et j'ai aussi reporté sur la planche n° 9 e-1 les limites entre zones d'indices géologiques superficiels différents, les limites entre zones de classe de pente 5 et 6 dans les terrains d'indice géologique superficiel 4 R (il n'y a pas d'indice 2 R), et la courbe de niveau 1 000 m limite entre deux types distincts d'aménagements agricoles possibles (cultures, reboisement) a été accentuée en trait gras.

Il semble raisonnable de poursuivre la tentative de délimitation des aires élémentaires en continuant l'examen du critère de finalité.

L'extension urbaine de Dheskati (voir planche n° 4 e) ne peut être raisonnablement envisagée que vers l'Ouest ou vers l'aval, en direction de la Mouradha. Ceci donne deux aires urbaines et industrielles possibles :

- l'une est la continuation vers l'Ouest jusqu'à la limite du B. V. U. de l'agglomération actuelle ;
- l'autre est limitée par le prolongement des limites est de l'agglomération actuelle et ouest de l'aire précédente jusqu'au bord de la rivière. Ceci est reporté sur la planche n° 9 e - 1.

Ces nouvelles aires élémentaires n'introduisent pas de nouvelles lignes de crête limites de groupes d'aires élémentaires.

Examinons maintenant la limite entre aires élémentaires aménageables et aires de végétation naturelle.

Les affleurements calcaires ne sont pas aménageables. Leur limite est donc forcément une limite entre aires élémentaires différentes. Il y a cependant un problème de taille minimale d'un affleurement calcaire à partir de laquelle la prise en considération de cet affleurement comme aire élémentaire n'aura pas de conséquences sensibles sur le bilan de l'aire immédiatement à l'aval. Ceci est traité plus loin. L'autre critère de séparation entre parties aménageables et non aménageables d'un B. V. U. est un critère de pente : classe de pente 6 dans les terrains d'indice géologique superficiel 4 R. Si nous examinons les parties de l'exemple de base appartenant à cette catégorie, nous constatons que :

- il existe de nombreuses enclaves de taille très réduite (moins de 0,5 km^2) et des digitations très minces (moins de 300 m) isolées dans des zones de classe de pente 5 ;
- il existe des surfaces où l'on a une juxtaposition très complexe d'éléments appartenant à la classe de pente 5 et d'éléments appartenant à la classe de pente 6 ;
- il y a dans les zones où la classe de pente 6 est prépondérante des enclaves et des digitations très minces appartenant à la classe de pente 5.

Si l'on veut appliquer avec rigueur ce critère de pente, on se trouve très vite devant un grand nombre de très petites aires élémentaires, ce qui, nous l'avons vu, doit être évité.

Il faut donc ici chercher à adapter ce critère de manière à le rendre commode. Ceci peut se faire sur la base de raisonnements élémentaires concernant les possibilités techniques d'aménagement. A titre d'indication, je suggère les règles d'adaptation suivantes pour déterminer si une aire est à considérer comme aménageable ou non :

Règle 1

tant que la proportion des enclaves ou digitations appartenant à la classe de pente 6 ne représentera pas plus de 40 % de la surface totale considérée, et ce à condition que ces enclaves ou digitations soient régulièrement réparties sur l'ensemble de la surface, cette surface devra être considérée comme aménageable.

Règle 2

Réciproquement, la même règle s'applique pour des enclaves appartenant à la classe 5 dans une surface où la classe 6 est prépondérante.

Règle 3

Si les enclaves ou digitations sont irrégulièrement réparties, on devra subdiviser la surface totale considérée en éléments sur lesquelles les enclaves ou digitations seront régulièrement réparties.

Règle 4

Une fois cette subdivision effectuée on tracera le chevelu des crête nécessaire et suffisant pour rendre possible le calcul cumulatif d'amont vers l'aval. Ce tracé doit se faire d'aval vers l'amont de manière à respecter la règle d'arrivée sur une aire aval d'un nombre entier d'aires situées plus à l'amont.

Après tracé du chevelu de crêtes, on appliquera aux surfaces ainsi individualisées les règles 1 à 4 une nouvelle fois.

En ce qui concerne l'affectation à une zone déterminée d'un type d'aménagement ou d'un autre (culture ou reboisement), on constate de manière analogue l'existence d'enclaves ou de digitations appartenant à la classe de pente 5 et limitées d'un côté par la courbe de niveau 1 000 m et de l'autre par la ligne de séparation entre classes de pente 5 et 6. Ici aussi, il y a un risque de multiplication excessive des aires élémentaires. Si par exemple, comme dans le B. V. U. 161-20: on rencontre des surfaces réduites qui appartiendraient à la zone cultivable, mais qui sont encadrées vers le haut par une zone boisable et vers le bas par une zone non aménageable, il est raisonnable de rattacher ces surfaces à la partie boisable plutôt qu'à la partie aménageable.

De manière analogue, il se peut que des surfaces de taille réduite et qui seraient classées théoriquement dans la partie boisable soient bornées vers le haut par une surface non aménageable, alors que vers le bas elles sont bornées par une surface cultivable. Le problème peut se poser de la même manière si la surface non aménageable correspond à un affleurement calcaire et non plus à une zone de classe de pente 6 dans une surface d'indice géologique 4 R.

De même, quand une surface réduite cultivable, boisable ou non aménageable théoriquement se trouve encadrée entre une surface d'une autre nature et une limite de B. V. U. et que l'autre versant est de la même catégorie que la surface réduite.

On peut alors aussi envisager des règles de choix basées sur des raisonnements simples quant à l'intérêt d'un aménagement. Toujours à titre d'indication, je suggère les règles suivantes :

Règle 5

Toute surface d'un seul tenant inférieure à 0,5 km^2, appartenant théoriquement à la zone cultivable et comprise entre une zone non aménageable et une zone boisable sera assimilée à la zone boisable.

Règle 6

Toute surface d'un seul tenant inférieure à 0,5 km^2 appartenant théoriquement à la zone boisable et comprise entre une zone non aménageable et une zone cultivable sera assimilée à la zone non aménageable.

Règle 7

Toute surface d'un seul tenant comprise entre une zone de catégorie différente et une limite de B. V. U. sera assimilée à la zone de catégorie différente sous-jacente si sa superficie est inférieure à 10 % de l'aire élémentaire aval immédiate ou à 0,5 km^2.

Ces règles sont suggérées par la situation de l'exemple de base, qui peut être considéré comme un cas moyen en zone montagneuse. Elles sont assez arbitraires et dans une étude pratique utilisant la méthode globale de calcul de bilan hydrologique et hydrogéologique, il sera nécessaire de les revoir en fonction de données techniques à fournir par les ingénieurs de génie rural. Elles m'ont cependant permis de résoudre au moins partiellement le problème de la simplification du tracé des limites entre aires élémentaires. Leur utilisation m'a amené au tracé des limites indiquées sur la planche n° 9 e 2 - Application des règles d'adaptation des critères de finalité des aires élémentaires.

6.8.1.3. Application pratique du critère géologique - Règles d'adaptation

Cette adaptation n'est malgré tout pas suffisante pour que l'on puisse considérer le problème du découpage en aires élémentaires comme résolu. Il nous faut maintenant examiner les critères géologiques et leur application pratique.

Nous avons retenu comme critère géologique de délimitation des aires élémentaires les limites entre zones d'indices géologiques superficiels différents. J'avais reporté ces limites sur la planche n° 9 e 1 et l'ai repris sur la planche n° 9 e 2. L'examen de ces limites montre que l'on risque fort, en les appliquant sans adaptation, de se trouver devant une multiplication excessive des aires élémentaires, comme pour une application stricte des critères de finalité.

Si les indices géologiques superficiels avaient pu être définis de manière tout à fait satisfaisante (point 6.6.) chacun d'eux représenterait un mode de répartition de l'eau dans la tranche superficielle distinct des autres et ce de manière beaucoup plus contrastée que les divers modes de répartition correspondant - toutes autres choses égales par ailleurs - aux différentes classes de pentes ou aux différents indices agronomiques et climatiques. Malgré les défauts de l'échelle d'indices proposée en 6.6. (voir point 6.6.3.), on peut s'attendre encore à des contrastes assez nets entre les modes de répartition de l'eau dans la tranche superficielle selon l'indice géologique superficiel. Ce qui diminue la valeur de cette échelle est plutôt l'hétérogénéité à l'intérieur d'un groupe caractérisé par un même indice et l'irrégularité des contrastes entre indices successifs.

Examinons ceci plus en détail sur l'exemple de base. Les indices superficiels que l'on rencontre ici sont les suivants :

Sols meubles :

1 M 3 M 4 M 6 M 7 M 8 M

Roches :

1 R 2 R 4 R 5 R

Les surfaces d'indice 1 M sont des lits mineurs de cours d'eau (Mouradha, Paleomandano, Titarissios). Ils sont en général étroits et inclus dans des surfaces plus étendues d'indice 3 M, à l'exception du Titarissios, plus large (au minimum 150 m, au maximum 600 m), et qui est bordé par des surfaces d'indices différents, de part et d'autre. Il y a là un problème d'hétérogénéité de dimensions des aires élémentaires.

Les surfaces d'indices 1 M, 3 M, 4 M, 7 M sont des formations alluvionnaires ou de produits d'altération plus ou moins en place dans les cuvettes du relief. Elles sont toutes de taille assez grande et de forme assez régulière pour ne pas poser de problème. En réalité, il existe probablement des affleurements de terrains

meubles qui auraient pu être rattachés à l'un ou l'autre de ces indices dont la taille est bien plus réduite, mais en raison du caractère approximatif du levé géologique lors de l'étude réelle, ces affleurements ont été laissés de côté et assimilés aux formations rocheuses encaissantes.

Les surfaces d'indices 6 M et 8 M correspondent à des formations meubles plio-pléistocènes et auraient aussi bien pu être classées dans les indices 2 R ou 1 R.

A part une longue digitation dans le B. V. U. 062-10 il n'y a pas de problème de forme ni de dimensions pour ces surfaces.

Il n'y a donc qu'une toute petite surface d'indice 1 R sur l'exemple de base, à l'aval du B.V.U. 164-10. Cette surface mesure 0,2 km^2 et se trouve entre la limite du B. V. U. et des formations d'indice 2 R, par conséquent assez proches de 1 R. On peut sans risque d'erreur sensible l'assimiler à cette surface.

Les surfaces d'indice 2 R sont au contraire assez fréquentes. Elles correspondent à des formations conglomératiques pléistocènes post-glaciaires (cônes de déjection fossiles) et ont des formes assez généralement décomposables en deux types :

- la partie amont du cône fossile, comprend des tronçons allongés d'alluvions anciennes graveleuses cimentées selon le tracé des vallées. Elles se présentent en général sous la forme de digitations entre des massifs calcaires (marbres) d'indice 4 R. On doit donc s'attendre à un contraste violent du schéma de répartition de l'eau dans la tranche superficielle entre ces surfaces et le marbre voisin ;

- la partie aval est en général triangulaire, de tracé plus régulier et de dimensions plus importantes. Elle devra en général être considérée comme un groupe d'aires élémentaires distinctes.

Dans ces formations, le problème est donc relatif à la partie amont étroite. Il est analogue à celui qui a été constaté pour les formations meubles d'indice 1 M.

En ce qui concerne les surfaces d'indices 4 R et 5 R, qui forment l'essentiel de l'ossature de la géologie locale, on constate d'assez grandes étendues homogènes distinctes appartenant à l'une ou l'autre de ces formations, et des enclaves de taille réduite ou des digitations minces de l'une ou l'autre de ces formations dans des surfaces d'indice différent. Le problème est analogue à celui qui se posait au sujet d'enclaves ou indentations dans l'examen de l'application pratique des critères de finalité. Ici aussi il y faut rechercher des règles d'adaptation et ceci passe par une étude de l'influence d'une telle enclave sur le bilan de l'aire aval.

Examinons donc les problèmes posés l'un après l'autre. D'abord, en ce qui concerne les surfaces longues et étroites d'indice 1 M, nous constatons que tant que leur largeur ne dépasse pas 150 m et qu'elles sont incluses dans une surface plus grande d'indices 3 M, 4 M, ou autre, elles jouent un rôle de collecteur du ruissellement sur cette surface et de transmission de ce ruissellement vers l'aval. Les échanges par infiltration vers les eaux souterraines sont peut-être importants, mais ceci dépend essentiellement de la perméabilité plus ou moins forte de la formation encaissante. Comme les formations d'indice 1 M sont en général très perméables, tout se passe ou presque comme si elles n'existaient pas. Comme de plus pour de telles largeurs il est rare que l'épaisseur de ces alluvions grossières soit importante, on peut assimiler l'inferoflux dans ces alluvions au ruissellement effluent sans risque d'erreur appréciable.

Par contre, à partir du moment où la largeur du lit mineur dépasse 150 m (cette limite est assez arbitraire et devra être contrôlée et éventuellement corrigée dans un calcul de réglage, lors d'une application pratique de la méthode) et surtout à partir du moment où l'épaisseur des alluvions devient importante, on ne peut plus négliger cette surface et l'assimiler aux formations encaissantes.

A titre indicatif, et sous réserve de correction lors d'une application pratique de la méthode réelle, nous pouvons énoncer la règle d'adaptation suivante :

Règle 8 :

Toute surface d'indice 1 M - ou 2 M(1) - longiligne et de largeur inférieure à 150 m, traversant une surface d'indice différent peut être assimilée à la surface encaissante.

En ce qui concerne les digitations éventuelles de formations 6 M ou 8 M entrant dans d'autres formations (dans le cas présent, il s'agit d'une digitation d'indice 6 M dans une surface d'indice 5 R), tout

(1) - Les conditions sont analogues.

dépend du contraste entre indices. Dans le cas présent, il s'agit vraisemblablement d'une écaille tectonique de largeur moyenne 200 m et d'indices très contrastés. On n'aura donc pas le droit de négliger cette digitation sauf si l'utilisation nécessaire et suffisante du chevelu des crêtes amène à un fractionnement longitudinal important de cette digitation. En ce cas, on est ramené au problème des enclaves de taille réduite. Si la largeur de cette digitation avait été moindre, on aurait vraisemblablement pu négliger cette digitation en tant qu'aire, mais, au cas où il s'agit d'une écaille tectonique se prolongeant en profondeur, il aurait fallu la considérer comme une frontière entre aires élémentaires, car elle joue un rôle de barrage dans la propagation des écoulements souterrains. On voit alors qu'il aurait mieux valu classer cette digitation dans les roches dures et lui donner l'indice 2 R.

S'il ne s'agit pas d'une écaille tectonique se prolongeant en profondeur (ceci peut être vérifié par des reconnaissances géophysiques par sysmique réflexion et quelques sondages) on peut appliquer à la règle 8 en modifiant son énoncé.

Règle 8":

Toute digitation superficielle (ne pouvant jouer un rôle de barrage ou de drain préférentiel pour les eaux souterraines) entrant dans une surface d'indice différent pourra être négligée si sa largeur n'excède pas 150 m, dans le cas où le contraste entre indices est très important, et 300 m si les indices sont très peu contrastés. Cette règle n'est pas valable si l'utilisation du chevelu des crêtes amène à un fractionnement important de cette digitation. Dans le cas d'une écaille tectonique, on peut énoncer une règle différente applicable aussi si les formations encaissantes sont d'indices différents de part et d'autre.

Règle 9 :

Toute écaille tectonique longiligne et étroite entrant dans une formation d'indice géologique superficiel différent ou entre deux formations d'indices géologiques superficiels différents et suffisamment profonde pour pouvoir jouer un rôle de barrage ou de drain préférentiel dans les écoulements souterrains.

- doit être considérée comme une aire élémentaire distincte ou être rattachée à la surface plus large adjacente de même indice si elle joue un rôle de barrage ou de drain préférentiel et si son épaisseur dépasse 150 m ;
- doit être considérée comme une frontière entre aires élémentaires si elle joue un rôle de barrage et si son épaisseur est moindre que 150 m ;
- peut être assimilée à l'une ou l'autre des formations encaissantes si elle joue un rôle de drain et si son épaisseur est moindre que 150 m.

Cette troisième possibilité est analogue à la règle énoncée plus bas au sujet de l'utilisation du réseau hydrographique et sa justification apparaîtra alors (règle 10). La limite de 150 m est assez arbitraire et devra être éventuellement corrigée lors d'une application pratique de la méthode globale de calcul du bilan. Cette règle est importante et susceptible d'applications nombreuses, en particulier dans le Pinde et le Koziakas. Sur l'exemple de base, elle peut être appliquée aussi à l'écaille tectonique de Crs dans les marbres, non loin de l'écaille qui nous a servi pour établir cette règle.

Les tronçons longilignes à l'amont des surfaces d'indice 2 R sont des digitations superficielles entrant dans des surfaces d'indices différents et la règle 8' leur est applicable.

Reste le problème des enclaves de nature géologique distinctes des formations encaissantes. Il peut s'agir d'enclaves très perméables, semi-perméables ou imperméables dans des surfaces enclavantes différentes. Pour évaluer la répartition de l'eau dans la tranche superficielle de telles enclaves, nous ne disposons pas de résultats expérimentaux dans la région, mais nous pouvons admettre que les conclusions de D.J. BURDON (1961), sur le massif du Pamasse Ghiona, un peu au Sud de la Thessalie, sont applicables ici.

Examinons les répartitions dans la tranche superficielle selon BURDON dans une enclave et une aire enclavante dont les surfaces sont dans une proportion de 1 à 5 pour des précipitations de 1 000 mm et 500 mm :

6 cas sont à considérer :

- enclave calcaire dans une formation semi-perméable,
- enclave calcaire dans une formation imperméable,
- enclave semi-perméable dans une formation calcaire,
- enclave semi-perméable dans une formation imperméable,
- enclave imperméable dans une formation calcaire,
- enclave imperméable dans une formation semi-perméable.

Les répartitions de l'eau dans la tranche superficielle ont été établies par BURDON à l'échelle de l'année. Elles portent sur des termes différents de ceux qui sont adoptés ici pour le bilan élémentaire. Je les ai indiquées dans le tableau 6.8.1.3 a ci-dessous.

TABLEAU 6 8 1 3 a

FORMATION	CALCAIRE	SEMI PERMEABLE	IMPERMEABLE
EVAPOTRANSPIRATION	51,2 %	64 %	70,0 %
RUISSELLEMENT	3,6 %	16 %	24,9 %
INFILTRATION	45,2 %	20 %	5,1 %

A l'aide de ces pourcentages, nous allons évaluer les différences dans la répartition de l'eau dans la tranche superficielle de l'ensemble enclave + aire enclavante selon que l'on considère séparément l'enclave ou que l'on assimile cette enclave à l'aire enclavante.

Pour ce, on n'a pas le droit de se borner à additionner les résultats bruts de l'application des pourcentages de répartition aux surfaces. Selon le caractère des terrains constitutifs de l'enclave et de l'aire enclavante, la répartition des apports de la première à la seconde sera modifiée à la frontière entre ces deux éléments ou à son voisinage immédiat. Pour l'évaluation en cours et en première approximation nous pouvons admettre que les modifications seront telles qu'indiquées dans le tableau 6.8.1.3. b.

TABLEAU 6.8.1.3.b

ENCLAVE	AIRE ENCLAVANTE	APPORT	TRANSFORMATION % Ruissellement	TRANSFORMATION % Infiltration
Calcaire isolé en profondeur	Semi permeable	ruissellement	44	56
		infiltration	56	44
Calcaire non isolé en profondeur	Semi permeable	ruissellement	44	56
		infiltration	0	100
Calcaire isolé en profondeur	Impermeable	ruissellement	83	17
		infiltration	89	11
Calcaire non isolé en profondeur	Impermeable	ruissellement	83	17
		infiltration	0	100
Semi permeable isolé en profondeur	Calcaire	ruissellement	7	93
		infiltration	0	100
Semi permeable non isolé en profondeur	Calcaire	ruissellement	7	93
		infiltration	0	100
Semi permeable isolé en profondeur	Impermeable	ruissellement	83	17
		infiltration	89	11
Semi permeable non isolé en profondeur	Impermeable	ruissellement	83	17
		infiltration	0	100
Impermeable	Calcaire	ruissellement	7	93
		infiltration	0	100
Impermeable	Semi permeable	ruissellement	44	56
		infiltration	0	100

Ceci m'a permis d'évaluer, en première approximation les répartitions dans la tranche superficielle, indiquées dans le tableau 6.8.1.3.c, selon que l'on considère l'enclave séparément ou que l'on assimile cette enclave à l'aire enclavante. De cette évaluation, j'ai déduit l'écart en pourcentage entre les deux éventualités et le rapport minimal admissible des surfaces de l'enclave, si l'on veut que l'écart soit de l'ordre de l'erreur admise sur la détermination des termes du bilan dans une étude préliminaire, soit 10 %.

1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11
ENCLAVE	AIRE ENCLAVANTE	TERMES DE REPARTITION	Enclave separee Repartition brute	Repartition transformee	Enclave assimilee	Aire enclavante	Total 4 6	Total 5 6	Difference 8 7	Ecart Rapport 9/8	Rapport de surfaces 2/1 minimal
Calcaire isole en profondeur	Semi permeable	evapotranspiration	512	-	640	3200	3712	3840	+128	+3,3	5,7
		ruissellement	36	269	160	800	1069	960	-109	-11,4	
		infiltration	452	219	200	1000	1219	1200	-19	-1,6	
Calcaire non isole en ,profondeur	Semi permeable	evapotranspiration	512	-	640	3200	3712	3840	+128	+3,3	11,2
		ruissellement	36	20	160	800	820	960	+140	+14,6	
		infiltration	452	468	200	1000	1468	1200	-268	-22,3	
Calcaire isole en profondeur	Impermeable	evapotranspiration	512	-	700	3500	4012	4200	+188	+4,5	6,2
		ruissellement	36	432	249	1250	1682	1499	-183	-12,2	
		infiltration	452	56	51	250	306	301	-5	-1,7	
Calcaire non isole en profondeur	Impermeable	evapotranspiration	512	-	700	3500	4012	4200	+188	+4,5	68,-
		ruissellement	36	30	249	1250	1280	1499	+219	+12,2	
		infiltration	452	458	51	250	708	301	-407	-135	
Semi permeable isole en profondeur	Calcaire	evapotranspiration	640	-	512	2560	3200	3072	-128	-4,2	5,8
		ruissellement	160	11	36	180	191	216	+25	+11,6	
		infiltration	200	349	452	2260	2609	2712	+103	+3,8	
Semi permeable non isole en profondeur	Calcaire	evapotranspiration	640	-	512	2560	3200	3072	-128	-4,2	5,8
		ruissellement	160	11	36	180	191	216	+25	+11,6	
		infiltration	200	349	452	2260	2609	2712	+103	+3,8	
Semi permeable isole en profondeur	Impermeable	evapotranspiration	640	-	700	3500	4140	4200	+60	+1,4	2,1
		ruissellement	160	311	249	1250	1561	1499	-62	-4,2	
		infiltration	200	49	51	250	299	301	+2	-0.7	
Semi permeable non isole en profondeur	Impermeable	evapotranspiration	640	-	700	3500	4140	4200	+60	+1.4	28,2
		ruissellement	160	133	249	1250	1383	1499	+116	+7.8	
		infiltration	200	227	51	250	477	301	-176	-58,5	
Impermeable	Calcaire	evapotranspiration	700	-	512	2560	3260	3072	-188	-6,1	4,4
		ruissellement	249	17	36	180	197	216	+19	+8,8	
		infiltration	51	283	452	2260	2543	2712	+169	+6,2	
Impermeable	Semi permeable	evapotranspiration	700	-	512	3200	3900	3840	-60	-1,6	2,6
		ruissellement	249	110	36	800	910	960	+50	+5,2	
		infiltration	51	190	452	1000	1190	1200	+10	+0.8	

TABLEAU 6.8.1.3.c

Il ressort de ce tableau que le rapport minimal admissible entre les surfaces de l'aire enclavante varie de 2,1 à 11,2 dans tous les cas sauf deux, qui sont ceux d'une enclave calcaire ou perméable communicant avec une formation perméable en profondeur située sous l'aire imperméable. Dans ces deux cas, si l'on acceptait les critères de base de l'évaluation du rapport minimal de surfaces, on serait amené à prendre en considération des surfaces enclavées minuscules, ce qui rendrait le calcul pour le moins incommode.

Mais si l'on réfléchit plus avant à la nature des phénomènes, on voit que dans ces deux cas, les critères choisis ne sont pas valables. On n'a pas le droit de comparer l'infiltration d'une enclave perméable ou semi-perméable non isolée à l'infiltration directe dans une aire imperméable enclavante. Car

l'aquifère sous-jacent reçoit de l'eau d'ailleurs et ce qui importe c'est de comparer l'influence de la prise en compte de cette infiltration depuis l'enclave sur la possibilité de prélever de l'eau souterraine pour l'utiliser sur l'aire enclavante.

Pour ceci, il faut faire un raisonnement différent de celui qui nous a amené aux rapports minimaux du tableau 6.8.1.3.c.

Pour que prélever de l'eau souterraine sous une aire élémentaire déterminée présente quelque intérêt, il faut que la capacité de production soit supérieure à une certaine limite, qui doit être considérée dans l'étude du bilan hydrologique et hydrogéologique comme une donnée fournie par les agronomes, les sociologues et les spécialistes en hydraulique urbaine et industrielle. Admettons que cette limite soit 400 mm pour l'année, répartis sur toute la surface de l'aire. Dans ces conditions, le critère limite de prise en considération d'une enclave est celui-ci :

l'infiltration depuis l'enclave doit être au minimum égale à 10 % de cette consommation limite, en supposant que le complément d'eau souterraine est fourni à l'aquifère par d'autres aires élémentaires voisines de l'aire considérée.

Ceci revient à dire que la quantité d'eau infiltrée dans l'enclave doit être telle qu'elle correspond à une lame d'eau de 40 mm sur l'ensemble de l'aire enclavante.

Le rapport minimal de surface dépend ici de la quantité des précipitations (alors que dans le raisonnement précédent, il n'en dépendait pas, ce qui est assez approximatif, d'ailleurs).

J'ai donc évalué ce rapport pour plusieurs valeurs de la quantité annuelle des précipitations, sur la base des répartitions de BURDON. Les résultats de cette évaluation sont rassemblés dans le tableau 6.8.1.3.d.

TABLEAU 6 8 1 3 d

ENCLAVE 1	AIRE ENCLAVANTE	PRECIPITATIONS mm. 200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
CALCAIRE	IMPERMEABLE	2,3	4,6	6,9	9,2	11,5	13,8	16,1	18,4
SEMI PERMEABLE	IMPERMEABLE	1,1	2,3	3,4	4,6	5,7	6.8	8,0	9,1

1 non isolee

Les rapports minéraux ainsi déterminés sont plus commodes à utiliser.

Il n'est guère possible de déduire des raisonnements précédents des règles générales précises pour déterminer si une enclave peut être assimilée à l'aire enclavante ou non. Les limites sont variables selon les types d'enclaves et de terrains enclavants et dans certains cas selon la pluviométrie. Elles devront être déterminées pour chaque région à étudier. J'ai tenté cependant d'exprimer la procédure ci-dessus en une règle générale.

Règle 10 :

Une enclave d'indice géologique superficiel différent de celui de l'aire enclavante peut être négligée et lui être assimilée, si les conditions suivantes sont satisfaites :

1° - Dans le cas d'une enclave imperméable le rapport des surfaces de l'aire enclavante et de l'enclave doit être tel que l'écart relatif entre les termes du bilan dans la tranche superficielle, déterminés d'une part en supposant que l'enclave est de même nature que l'aire enclavante et d'autre part en la considérant selon son caractère propre, rapporté aux termes correspondants du bilan dans l'aire enclavante et l'enclave supposée assimilée, doit être au plus égal à la limite d'imprécision admise pour la détermination des termes du bilan.

2° - Dans le cas d'une enclave non imperméable superficielle, ne communicant pas en profondeur avec une couche non imperméable s'étendant sous une fraction supérieure à 50 % de la surface de l'aire enclavante, le critère est le même que celui qui a été défini en 1°.

3° - Dans le cas d'une enclave non imperméable communicant en profondeur avec une couche non imperméable s'étendant sous une fraction supérieure à 50 % de la surface de l'aire enclavante, le rapport des surfaces de l'aire enclavante et de l'enclave doit être tel que le rapport entre l'infiltration directe descendante dans l'enclave et la quantité minimale qu'il est techniquement raisonnable de prélever

pour l'utiliser sur l'aire enclavante est égal ou inférieur à la limite d'imprécision admise pour la détermination des termes du bilan.

4° - L'évaluation des termes du bilan pour la détermination de ces critères limites peut être faite pour l'année, sur la base des résultats d'expériences locales ou d'extrapolation de résultats connus dans des cas semblables.

Indépendamment de cette tentative de généralisation de la procédure de simplification par assimilation d'enclaves géologiques aux aires enclavantes, j'ai appliqué les critères définis dans les tableaux 6.8.1.3 c et 6.8.1.3.d, à l'exemple de base, ce qui m'a amené au tracé de frontières complémentaires indiqué sur la planche n° 9 e 3: Application des règles de simplification des limites géologiques des aires élémentaires.

6.8.1.4. - Corrections de forme des aires élémentaires

La subdivision selon les critères des tableaux 6.8.1.3 c et 6.8.1.3 d, pourrait à la rigueur être considérée comme la subdivision finale en aires élémentaires. Pourtant, on constate une assez grande disparité entre les étendues des aires ainsi définies. Et surtout certaines de ces aires sont très allongées le long du réseau hydrographique. Ceci risque d'entraîner des déséquilibres préjudiciables à la précision du bilan et m'a amené à fractionner encore les surfaces homogènes trop allongées de manière à obtenir des aires élémentaires plus compactes et moins déséquilibrées.

Nulle part, sur l'exemple de base, il n'a été nécessaire d'avoir recours au réseau hydrographique comme limite d'aire élémentaire. Et si l'on considère l'ensemble de la région, on voit que, comme pour la délimitation des B.V.U., ce n'est pas à proprement parler des tronçons de réseau hydrographique qui doivent jouer le rôle de frontière entre aires élémentaires, mais les crêtes des digues de protection le long des cours d'eau des plaines, ce qui nous ramène au chevelu des crêtes. La correction de formes indiquées ci-dessus m'a finalement permis de subdiviser encore les aires résultant de l'application des critères des tableaux 6.8.1.3 c et 6.8.1.3 d et d'établir une subdivision commode des B. V. U. de l'exemple de base en aires élémentaires (planche n° 9 e 4).

6.8.2. Commentaires

Je n'ai pas jugé nécessaire de poursuivre la tentative de découpage à l'ensemble de la région, car ceci n'aurait vraisemblablement rien ajouté à la méthode. L'application des règles définies à l'aide de l'exemple de base auraient permis de le faire, mais il faut remarquer que pour que ce découpage soit valable, il faut que :

1° - la carte des pentes soit correctement établie, ce qui impose le recours à une procédure automatique ;

2° - la carte géologique et la carte des indices géologiques superficiels ne souffrent pas des défauts et lacunes constatés lors de l'examen de celles qui ont été établies pour la Thessalie ;

3° - pour que le découpage en aires élémentaires soit valable il faut que les critères de simplification du tracé soient basés sur des données moins arbitraires que celles que j'ai adoptées ici. Même si ces bases paraissent plausibles, je ne pense pas qu'il serait utile de poursuivre l'exercice sans avoir des bases fondées sur des études primaires rapides en matière d'économie de l'aménagement, d'agronomie, d'hydraulique urbaine et industrielle permettant de définir des limites acceptables de simplification du tracé.

Malgré ces réserves, le découpage en aires élémentaires effectué sur l'exemple de base peut être considéré comme représentatif.

Il me reste à examiner la commodité d'utilisation de ces aires élémentaires par un calcul à l'ordinateur. Sont-elles trop nombreuses pour chaque B. V. U. ? Leurs surfaces sont-elles trop disparates ? Y en a-t-il de trop petites qu'il conviendrait de négliger ? Y a-t-il une manière commode de les prendre en compte, par exemple un cheminement cumulatif analogue à celui qui est proposé pour les B. V. U. dans le calcul régional ? Est-il possible d'envisager une automatisation de la procédure de découpage des B. V. U. en aires élémentaires, de manière analogue à la procédure de découpage de la région en B. V. U. ? Autant de points qui sont abordés ci-dessous.

6.8.2.1. Nombre des aires élémentaires

La densité du découpage des B. V. U. en aires élémentaires telle qu'elle apparaît sur la planche 9 e 4 indique clairement que rien ne s'oppose à leur prise en compte par l'ordinateur dans des sous-programmes de

calcul de bilan de B. V. U. Au contraire, le nombre maximal d'aires élémentaires est plutôt très en dessous de la capacité d'un ordinateur de type scientifique. Il n'y a donc rien de prohibitif dans le nombre d'aires élémentaires pour un calcul répétitif de bilan.

6.8.2.2. Surfaces des aires élémentaires

La taille des aires élémentaires n'a au fond rien à voir avec la commodité de leur prise en compte. Quelle que soit la taille il suffit que ses caractères soient suffisamment constants pour être représentés chacun par un nombre, pour qu'une aire élémentaire soit de prise en compte commode.

Il est possible cependant que certaines soient trop petites pour que leur prise en considération amène à une réaction sensible du modèle mathématique. Ces aires trop petites ne font alors qu'alourdir le calcul. Il est cependant très délicat d'évaluer sans qu'un modèle réel ait été élaboré, la taille minimale critique d'une aire élémentaire. Je laisserai donc la question sans réponse pour le moment et propose que lors des premières applications éventuelles de la méthode, un réglage de sensibilité soit effectué sur certains B. V. U. pilotes de manière à définir pour la région en cours d'étude la surface minimale critique des aires élémentaires.

6.8.2.3. Procédure de calcul du bilan hydrologique d'un B. V. U.

Si l'on considère un B. V. U. quelconque de la région, on voit immédiatement que le calcul de bilan selon un programme basé sur l'organigramme du bilan élémentaire (voir point 2.1 de la première partie) ne peut être que cumulatif, selon une procédure "en boule de neige" analogue à celle qui a été décrite au sujet du schéma de calcul du bilan régional. Ceci amène à la nécessité d'une indexation ou d'un codage des aires élémentaires qui peut être calqué sur celui qui a été proposé pour les B. V.U. Je n'insisterai pas sur ce sujet, qui relève plus de la programmation que de l'examen critique du rassemblement des données.

6.8.2.4. Automatisation du découpage des B. V. U. en aires élémentaires

Nous avons vu que la définition de la carte des pentes était réalisable selon un processus automatique, préférable à une définition manuelle, à cause de la plus grande fidélité de détermination des limites entre zones de pentes moyennes déterminées. Le rassemblement des données géologiques et la définition des indices géologiques superficiels peuvent aussi comporter des programmes de calcul automatique:

- traitement, classement et groupement des résultats des levés géologiques des mesures des caractères géologiques et de la résistivité superficielle ;
- traitement des mesures du niveau de la nappe phréatique et de l'évolution de ce niveau, de l'ascension capillaire et délimitation de la tranche superficielle ;
- la définition de l'indice géologique peut aussi être automatisée et cette automatisation aura pour conséquence un écartement plus régulier de ces indices et une plus grande fidélité dans la détermination que le traitement manuel de l'information ;
- la subdivision de la région en parties aménageables ou non, la délimitation des aires élémentaires hydrologiques naturelles sont automatisables ;
- la définition des aires élémentaires hydrologiques artificielles possibles peut aussi être traduite dans un programme sous forme de codage d'une décision quant au site, puis de définition topographique de l'aire en fonction de résultats hydrologiques approximatifs ;
- et nous avons vu que la définition des aires urbaines et industrielles est, elle aussi, automatisable.

L'examen de la procédure de simplification du tracé des frontières entre aires élémentaires montre que, à condition que les critères de simplification soient clairs, par exemple du type des instructions contenues dans les règles 1 à 10 du point 6.8.1., l'automatisation est possible à l'aide d'une combinaison d'ordinateur scientifique et de table traçante.

L'ensemble du découpage des B. V. U. en aires élémentaires pourra donc être traité de manière automatique, ce qui est d'ailleurs souhaitable, pour des raisons d'économie de temps d'une part et de fidélité dans l'application des critères de découpage d'autre part.

Il faut cependant remarquer que cette automatisation sera moins simple que celle de la délimitation des B. V. U. et que les interruptions dans ce déroulement automatique pour permettre aux ingénieurs chargés de l'étude de faire un choix, seront probablement plus nombreuses.

Mais l'automatisation est possible et souhaitable techniquement. Comme il apparaît qu'elle comportera une majorité de programmes standard utilisables pour n'importe quelle région, cette automatisation est aussi très certainement souhaitable économiquement. Et ce, d'autant plus qu'elle sera possible sans accroissement excessif des coûts ni des délais nécessaires pour le rassemblement des données. Il y a cependant en ce domaine un gros travail de recherche bibliographique, et de coordination et d'adaptation éventuelle des programmes déjà existants de part et d'autre et une certaine recherche appliquée pour la mise au point des programmes ou parties de programmes non encore existants.

6.8.2.5. Commentaires

Il apparaît donc que le découpage de la Thessalie en aires élémentaires au moyen des données à disposition au moment de l'étude réelle et des reconnaissances légèrement différentes aurait été possible, mais sans que ces modifications de programme entraînent d'accroissement excessif des coûts et des délais. Ce découpage est une base pratique et apparemment commode pour un traitement à l'ordinateur des données, pour chaque B. V. U. considéré séparément dans un sous-programme de bilan de B. V. U.

Il reste cependant encore à rechercher la limite de sensibilité au-dessous de laquelle une aire élémentaire ne vaut plus d'être considérée. Ceci est un problème spécifique de chaque région à étudier, et de chaque phase d'étude, et devra donc être inclus dans les procédures de réglage des modèles.

CHAPITRE 7 - CARACTERISATION DES AIRES ELEMENTAIRES

7.1. Facteurs topographiques utiles

Les facteurs topographiques utiles retenus comme caractéristiques des aires élémentaires sont :

- la pente moyenne du terrain, qui a été utilisée pour le découpage de la région en B. V. U. et des B. V. U. en aires élémentaires. Ce facteur a été examiné aux chapitres 5 et 6. Nous n'y reviendrons pas ;
- la densité linéaire du réseau hydrographique, définie comme le rapport entre la longueur du réseau hydrographique de l'aire élémentaire et sa surface.

Il faut aussi considérer la surface, l'altitude moyenne et l'exposition de l'aire élémentaire qui sont des bases physiques du problème, et servent pour la définition de la frontière entre zones aménageables et non aménageables de la région.

7.1.1. Densité linéaire du réseau hydrographique

Ce facteur utile n'a pas été pris en considération lors de l'étude réelle. Sa détermination pour chaque aire élémentaire ne posait pourtant aucun problème. Il aurait suffi, après délimitation des aires élémentaires de considérer le chevelu des thalwegs, de mesurer la longueur de ce chevelu dans chaque aire, la superficie de l'aire et de faire le rapport des résultats des deux mesures, puis de placer les résultats obtenus en mémoire.

Les mesures qui seraient fastidieuses et assez longues à la main, pourraient aisément être effectuées par des procédés automatiques, à la table traçante, ce qui permet un gain de temps appréciable et les calculs peuvent être effectués directement par l'ordinateur. Nous n'insisterons pas plus sur ce problème, et le considèrerons comme en principe résolu.

7.1.2. Surface, altitude moyenne et exposition des aires élémentaires

Je ne citerai ces points que pour mémoire, car la mesure des surfaces d'aires est un procédé déjà classique par calcul automatique. Il en est de même pour leur altitude moyenne et leur exposition.

7.2. Facteurs géologiques utiles

Les facteurs géologiques utiles retenus comme caractéristiques des aires élémentaires sont :

- l'indice géologique superficiel, qui est un critère de délimitation des aires élémentaires, dont il a été question au chapitre 6. Nous n'y reviendrons pas ;
- l'indice géologique phréatique ;
- les indices géologiques profonds.

Ces indices sont des tentatives de représentation commode par un seul chiffre des caractères géologiques utiles des tranches phréatiques et profondes du sous-sol, selon un procédé analogue à ce qui a été exposé au sujet de l'indice géologique superficiel. Ces caractères géologiques utiles ont été choisis car physiquement ils ont une influence sur les termes du bilan (infiltration directe et des eaux de ruissellement, eaux souterraines, prélèvements, rejets).

Le découpage systématique du sous-sol en tranches successives n'avait pas été envisagé lors de l'étude réelle. Examinons cependant si les données à disposition alors et celles qui ont été obtenues depuis, permettent d'appliquer les cheminements définis dans les tableaux du paragraphe 3.7. de la première partie.

7.2.1. Reconnaissances et mesures

7.2.1.1. La carte géologique

Ce point a été traité en 6.4.1. et nous n'y reviendrons pas. Les lacunes constatées pour la tranche superficielle de sol sont aussi importantes pour les tranches profondes.

7.2.1.2. Reconnaissances géophysiques

Les reconnaissances géophysiques par sondages électriques décrites au chapitre 6 (point 6.4.3) ont été effectuées avec des écartements d'électrodes d'envoi de courant suffisantes pour que l'exploration atteigne le bed-rock antérieur au Cénozoïque récent (limite Flysch - Eocène récent).

Malheureusement, ces reconnaissances n'ont été effectuées que dans les deux plaines centrales et certaines zones périphériques. D'autre part, la densité des reconnaissances a été plus faible dans les plaines principales et plus forte dans les zones périphériques reconnues, qu'il n'est préconisé dans le tableau du paragraphe 3.7 de la première partie.

Tableau 7.2.1.2: Nombre N de sondages électriques nécessaires dans les BVU périphériques

Code	Nom du BVU	N
000 10	Haut Klinovitikos	3
000 30	Haut Ion	6
101 10	Malakassiotikos	5
101 20	Mikanis	3
101 30	Klinovitikos	3
102 40	Mourganis Pinios	8
110 10	Plouris	5
110 20	Portaikos	3
121 10	Xinias	15
140 20	Litheos	10
240 10	Rakha	10
060 40	Haut Paleomandano	8
060 50	Haute Mouradha	6
060 60	Haute Mokratis	5
060 80	Akri	4
160 20	Galougavra	5
164 10	Haut Titarissios	6
279 10	Ghoni	10
280 10	Ayia	10
090 10	Kariai	5
090 20	Ag Paraskevi	5
090 30	Kallipefki	3
	Total	138

Le resserrement des reconnaissances géophysiques dans les plaines aurait entraîné un doublement du nombre des sondages. Il n'aurait cependant pas été nécessaire de pousser la reconnaissance jusqu'au bed-rock sur tous ces sondages supplémentaires, dont une moitié environ aurait pu être limitée à un écartement maximal entre électrodes émettrices de 1000 m (profondeur d'exploration 200 à 300 m, théoriquement, selon la résistance superficielle). Grosso-modo, ceci aurait entraîné la nécessité d'une équipe "lourde" de géophysique électrique pendant 3 mois. L'accroissement de coût n'est pas négligeable, mais il n'y aurait pas eu d'accroissement de délais, sauf pour le traitement de l'information, à moins que celle-ci ne soit automatique, ce qui est souhaitable et déjà courant dans la pratique des reconnaissances pétrolières. La précision supplémentaire obtenue dans la connaissance du sous-sol aurait été sans commune mesure avec les frais.

Dans les zones périphériques, réduire la densité des sondages électriques n'aurait amené qu'à des mécomptes, en raison de la dimension réduite de ces zones. Il vaut mieux, par conséquent, généraliser cette densité plus grande des sondages électriques de faible écartement entre électrodes émettrices pour les zones où l'épaisseur de terrain meuble n'est pas négligeable et dont les dimensions sont réduites. Pour moins de 30 km^2 par exemple, on peut maintenir une maille kilométrique, et adapter selon les cas pour des zones plus étendues, pour atteindre la densité préconisée en 3.7. à partir de 150 km^2.

Il aurait été nécessaire d'autre part, d'étendre les reconnaissances aux autres zones où l'épaisseur du terrain meuble n'est pas négligeable.

Ceci aurait entraîné un coût supplémentaire pour les reconnaissances. En effet, cette extension des travaux aurait porté sur les B. V. U. et comporté les travaux indiqués dans le tableau 7.2.1.2 (sondages électriques de AB maximum 500 m).

L'exécution de ce travail aurait demandé 20 à 25 jours de travail pour une équipe légère. L'accroissement de coût est donc faible. Quant aux délais globaux de l'étude, ils n'auraient pas été modifiés, car les reconnaissances géophysiques ont été effectuées en même temps que les sondages de reconnaissances pour les barrages et terminées bien auparavant.

Dans le cas de l'étude réelle, en raison des lacunes en ce qui concerne les sondages d'étalonnage, j'ai comparé les résultats des mesures géophysiques aux résultats hydrauliques et géologiques des points existants et suis arrivé à l'échelle approximative suivante d'indices géophysiques, que l'on peut assimiler en première approximation à des indices géologiques.

indice	Résistivité ohm.m.	Signification probable
1	> 1000	Dépôts grossiers
2	70-100	Dépôts alluviaux moyens à grossiers
3	35- 70	Dépôts alluviaux alternés, composés de bancs grossiers aquifères en proportion importante (supérieure à 50 %) et de bancs imperméables
4	20- 35	Dépôts alluviaux alternés, analogues à l'indice 3, avec une probabilité moindre de rencontrer des bancs aquifères
5	10- 20	Dépôts alluviaux fins, de manière générale, avec une faible possibilité de rencontrer des bancs aquifères
6	0- 10	Dépôts alluviaux fins argilo-silteux.

Ce classement se double d'un classement parallèle dans les formations plio-pléistocènes continentales, que j'ai affecté du signe '.

7.2.1.3. Sondages d'étalonnage de la géophysique

Nous avons déjà dit que l'étude réelle été orientée principalement vers l'étude des grands barrages et le problème des eaux souterraines est venu s'y greffer, en position secondaire. L'exécution de sondages pour permettre l'étalonnage des reconnaissances géophysiques dans les plaines et zones où l'épaisseur de terrain meuble n'était pas négligeable n'a donc pas été prévue dans le programme des reconnaissances. Cette lacune assez grave n'a pu être que très partiellement compensée par les données à disposition qui étaient les suivantes :

- 1 sondage de reconnaissance pétrolière à Agnanderor avec carottage électrique et aux rayons X de profondeur 910 m (A_1 sur la planche 7) ;
- 2 sondages de reconnaissance hydrogéologique sur le cône de déjection du Pinios :
  - l'un à Vassiliki : H_1 de profondeur 154 m,
  - l'autre à Peristera : H_2 de profondeur 150 m.

Les résultats d'un grand nombre de puits exécutés par le Service des Améliorations Foncières du Ministère de l'Agriculture ont été mis à la disposition d'Electro-Watt. Il s'agit de :

- 6 puits dans la partie de la plaine de Karla appartenant au département (Nomos) de Volos ;
- 69 puits situés principalement dans les deux plaines principales de Thessalie occidentale et orientale, dans le département de Larissa ;
- 3 puits situés dans la partie du département de Lamia (Phtiotide) qui est physiquement rattachée à la Thessalie (voir l'introduction de la 2e partie) ;
- 25 puits dans le département de Kardhitsa, presque tous dans la plaine de Thessalie occidentale ;
- 19 puits dans le département de Trikala, tous sur le cône du Pinios.

Les logs lithologiques de ces sondages avaient été laissés à la responsabilité du chef sondeur et ne présentaient aucune homogénéité.

Les identifications des terrains traversés étaient si hétérogènes qu'aucune corrélation, même grossière, n'a pu être faite entre ces sondages. La seule utilisation géologique qui a pu en être faite a été l'identification du bed-rock dans quelques cas peu fréquents (Pinias dans le B.V.U. 257-20 en particulier où un sondage a atteint le marbre et quelques sondages dans le Sud Est du B.V.U. 281-10) ce qui a été

utile pour préciser la distinction entre gneiss et marbre dans le prolongement du massif pélagonien sous les plaines.

L'utilisation des résultats des puits du Service des Améliorations Foncières a été rendue plus délicate encore par le fait qu'ils n'étaient pas repérés en coordonnées ni altitude et que leur localisation sur une carte au 1/50 000 a été très approximative. La profondeur des ces puits variait de 40 à 300 m.

Nous aurions pu avoir communication des résultats d'un très grand nombre de puits privés (environ 5 000) par l'intermédiaire de la banque agricole, qui en avait financé l'exécution. Vu le manque de temps et de moyens d'une part, et le doute probablement plus grand quant à la valeur des logs géologiques que pour les puits du Service des Améliorations Foncières d'autre part, nous avons renoncé à utiliser ces données. Pourtant, à condition de les filtrer soigneusement et de les traiter ensuite par des procédés automatiques, leur prise en compte aurait été possible sans accroître les délais. Une enquête topographique aurait permis de préciser la position de ces puits.

Nous avions d'autre part comme données à disposition les résultats d'une étude effectuée en 1961 par l'ingénieur italien ZORZI sur les eaux souterraines de Thessalie, et dans laquelle les résultats de 422 puits privés et publics étaient analysés.

Cette étude ayant été basée sur les résultats obtenus au Service des Améliorations Foncières et à la Banque Agricole, sa validité était aussi douteuse que celle des résultats des puits cités plus haut.

Enfin, nous avions à notre disposition les résultats d'une étude des eaux souterraines effectuée par un bureau anglais, ADSCO, en 1951, sur la zone de Trikala-Kardhitsa. Cette étude se basait, d'une part sur des résultats obtenus au Service des Améliorations Foncières et à la Banque Agricole, dont la validité pouvait être mise en doute et d'autre part sur les résultats des reconnaissances effectuées durant l'étude :

- géophysique par sondages électriques, dont la portée atteignait 200 m de profondeur environ ;
- 22 sondages de reconnaissances dont les logs géologiques pouvaient être acceptés, mais dont la position topographique n'était que très approximativement connue.

A part le sondage pétrolier, les deux puits hydrogéologiques de l'Institut de Géologie et de Sub-surface et les 22 sondages d'ADSCO, tous concentrés dans la partie ouest de la Thessalie occidentale, nous n'avions donc pas de données valables pour essayer de trouver des relations correctes entre les résistivités mesurées et les caractères géologiques utiles.

Nous avons cependant utilisé les résultats de ces sondages, recherché des corrélations (voir point 7.2.2 ci-dessous) et les avons extrapolées à l'ensemble de la région. Cette manière d'agir était assez risquée, mais il n'y avait aucune autre possibilité à l'époque. Il aurait pourtant été possible d'éviter cette lacune et d'exécuter des sondages ou des puits de reconnaissances selon la densité de 5 à 6 puits pour 2 000 km^2 qui est indiquée en 3.7.

Quel aurait été le "poids" de ces reconnaissances supplémentaires, en volume de travail et en délais ? Il aurait fallu exécuter, approximativement :

- 10 sondages de 350 m de profondeur, en percussion, à la boue, avec analyse continue des cuttings, échantillonnages occasionnels, carottage électrique pour étalonnage de la résistivité mesurée depuis la surface, essais d'eau rapide (soupapage, par exemple), après nettoyage du sondage et équipement en piézomètre dans la plaine de Thessalie occidentale ;

- 8 sondages analogues et de même profondeur au maximum, quelquefois moindre (au minimum 100 m dans la partie sud est de la plaine), en Thessalie orientale ;

- en moyenne 2 sondages analogues de 150 m de profondeur dans chacun des B. V. U. suivants : (en fait, de 1 à 3) :

121-10 : Xinias, 132-10 : Haut Enipefs, 240-10 : Rakha, 155-10 : Moyen Enipefs, 257-20 : Zarkos, 060-10 : Haut Elassonitikos, 060-20 : Lianopotamo, 061-20 : Haute Voulgara, 164-10 : Haut Titarissios, 165-10 : Moyen Titarissios, 250-10 : Krannon, 270-10 : Zapion, 270-20 : Eleftherai, 279-20 : Ghoni, 280-20 : Sikouron.

1 à 2 sondages analogues de 50 m de profondeur dans chacun des B. V. U. suivants :
000-30 : Haut Ion (2), 101-10 : Malakassiotikis (2), 102-40 : Mourganis-Pinios (2), 110-10 : Pliouris (1), 060-40 : Haut Paliomandano (1), 060-60 : Haute Mokhratis (1), 160-10 : Smoliotikos (1), 160-20 : Galougavra (1), 020-10 : Kariai (1).

Ceci amène à un total de :
15 sondages de 350 m de profondeur
33 sondages de 150 m de profondeur
12 sondages de 50 m de profondeur moyenne;
soit un total de 10 800 m de sondage environ. Ceci représente l'emploi de 12 foreuses pendant 6 mois environ. Le coût est donc loin d'être négligeable. Il est de l'ordre du double du volume des reconnaissances effectuées pour les barrages. Il aurait cependant été possible de trouver ce matériel sur le marché locla et le délai nécessaire de 6 mois est compatible avec les délais de l'étude réelle, car, ces reconnaissances auraient pu être exécutées en même temps que celles effectuées sur les sites de barrages.

Le problème est donc de juger si l'investissement supplémentaire que représentent ces sondages d'étalonnage est justifié ou non.

Dans l'optique de l'étude réelle, axée, nous l'avons vu, sur les barrages et dans laquelle seule une estimation rapide était prévue, en ce qui concerne les eaux souterraines, un tel investissement n'était pas à envisager. Si le problème avait été posé différemment, de manière globale, comme il l'est ici, dans le but de permettre une étude d'aménagement de l'ensemble de la région, avec recherche suffisamment précise de l'optimisation de l'exploitation de l'eau (souterraine et de surface), l'investissement aurait été nécessaire, car il représente un minimum pour une connaissance suffisante des conditions géologiques des terrains meubles et du bed-rock de la plaine. Ces sondages auraient considérablement limité les dangers résultant d'extrapolations.

Grâce à ces sondages, le bilan aurait été suffisamment précis et sûr pour que l'importance des ajustements ultérieurs, le risque d'erreur dans l'implantation des puits d'exploitation soit raisonnable.

Si l'on compare d'autre part le coût de ces reconnaissances supplémentaires au coût admissible d'un aménagement sur ces surfaces, on voit que ces reconnaissances représentent au plus quelques pourcents de ce coût (environ 2 %). Et si l'on compare les avantages et utilisations techniques possibles (voir point 1.2) du modèle hydrologique régional que ces reconnaissances permettent de bâtir puis d'utiliser avec les limites des résultats de l'étude réelle et surtout le fait que ces reconnaissances n'auront servi qu'une fois, l'hésitation n'est plus possible.

Si donc le problème avait été posé de manière globale, cet investissement nécessaire aurait paru justifié et aurait vraisemblablement été pris en considération.

7.2.1.4. Etude stratigraphique et tectonique dans les zones d'affleurements rocheux (nappes libres et captives)

Cette étude a fait partie des travaux de compilation, de contrôle et de levés de la carte géologique de la Thessalie. Les affleurements calcaires ont été nettement distingués des autres roches au cours de ce travail et nous avons vu au sujet de l'étude de l'indice géologique superficiel que 8 groupes de roches ont été distingués sur la base de l'échelle stratigraphique de référence, puis réduits à 5 en raison des insuffisances de la carte géologique. On peut admettre que leurs réactions à l'eau (superficielle et souterraine) seront différentes d'une groupe à l'autre et approximativement les mêmes à l'intérieur d'un même groupe.

Nous avons examiné au chapitre 6 les lacunes et les défauts de cette procédure et ne reviendrons pas sur ce sujet.

De la carte géologique il ressort clairement qu'il n'y a pas de structure telle que l'on ait des nappes captives intéressantes dans le rocher. Par contre, il y aura vraisemblablement communication entre systèmes karstiques et aquifères alluviaux et ce problème doit être examiné.

7.2.2. Délimitation et caractérisation des tranches phréatiques et profondes

Nous venons d'examiner les lacunes des reconnaissances et mesures effectuées lors de l'étude réelle. Elles sont assez importantes et les investissements nécessaires pour les combler ne sont pas négligeables. Les délais n'auraient pas été modifiés, à condition que les diverses procédures de traitement automatique des données aient été au point, ce qui n'était pas le cas, et ne l'est d'ailleurs toujours pas.

Cependant, ces lacunes sont moins "paralysantes" que celles qui ont été constatées au sujet de la tranche superficielle de sol, au moins pour les zones de terrain meuble. Des reconnaissances électriques

ont été faites sur les deux plaines centrales et sur une grande partie des zones périphériques. Il est intéressant d'examiner comment les résultats de ces reconnaissances auraient pu être utilisés pour délimiter et caractériser les tranches phréatiques et profondes de ces zones de terrain meuble. Nous examinons ensuite à quels résultats il est possible d'aboutir en ce qui concerne les zones d'affleurements rocheux.

7.2.2.1. Zones de terrains meubles

Le point faible dans les données est l'absence de renseignements suffisants pour établir des corrélations valables entre résistivités mesurées et facteurs géologiques agissants.

Par définition, la tranche phréatique est limitée vers le bas par le premier niveau aquiclude que l'on rencontre en descendant. De manière analogue les tranches profondes sont délimitées par un aquiclude supérieur et un aquiclude inférieur. On pourrait à la rigueur essayer d'appliquer ces définitions sur chaque sondage électrique (S-E) et tenter des corrélations. Malheureusement les résultats d'un S-E, traduits en résistivités réelles représentent la pondération sur une épaisseur souvent importante de couches multiples de natures très diverses. Isoler un aquiclude sur un S-E quelconque et prétendre le suivre par interpolation d'un S-E à l'autre est dangereux et illusoire. Les résistivités traduisent un caractère d'ensemble du sous-sol sur cette épaisseur et c'est tout.

La multiplication des sondages d'étalonnage permettrait peut-être de subdiviser plus précisément ces épaisseurs caractérisées par une seule valeur de la résistivité. Mais dans une étude préliminaire tout du moins, ce que l'on cherche n'est pas de préciser la longueur et la position du crépinage de chaque puits envisagé, mais de définir la probabilité pour un puits de rencontrer des couches aquifères susceptibles de produire tel ou tel débit, et de lier cette probabilité au coût d'exécution et d'exploitation du puits. Mais alors il n'est pas commode de conserver le concept de couche profonde - ou phréatique - d'épaisseur variable située à une profondeur variable, même si ceci correspond à une image fine de sous-sol de la région. On peut par contre subdiviser arbitrairement le sous-sol en tranches d'épaisseur constante et évaluer par pondération la résistivité de chaque tranche, et donc les caractères hydrogéologiques utiles de ces tranches.

Pour les zones dans lesquelles des reconnaissances géophysiques ont été effectuées, l'interprétation a donc comporté une traduction en résistivités réelles des milieux traversés par chaque sondage électrique, puis une détermination des résistivités moyennes de chaque tranche de sol successive de 50 m d'épaisseur jusqu'à 250 m de profondeur, dont nous verrons plus loin (points 7.2.2 et 7.2.3) comment elles ont été exploitées .

Cette méthode de pondération a été appliquée à la Thessalie, ce qui m'a amené aux planches n° 10, 11, 12, 13 et 14, résistivités pondérées - Essai de caractérisation géologique des tranches phréatiques et profondes. On peut considérer ces planches comme une première définition et caractérisation de ces tranches. La question peut se poser de savoir si des tranches de 50 m étaient un choix valable ou non. On ne peut répondre à cette question qu'après avoir traité un problème concret avec suffisamment de données de base. Lors de l'étude réelle j'avais tenté une pondération générale sur toute l'épaisseur du sous-sol meuble, car à l'époque je n'avais pas introduit la notion de tranches géologiques successives. Cette question restera donc sans réponse pour le moment.

Il faut d'autre part faire les remarques suivantes :

- les lacunes d'étalonnage introduisent une certaine incertitude en ce qui concerne la validité de l'interprétation physique des classes de résistivité. Lors de l'étude réelle, avec un pas de temps annuel et une délimitation moins fine du sous-sol, ceci était encore acceptable. Si l'on veut arriver à un bilan suffisamment précis, en appliquant la méthode globale exposée ici, ceci n'est plus acceptable, car le risque d'erreur devient trop grand;

- certaines limites des zones d'indices géophysiques présentent des anomalies (en particulier vers Larissa, en Thessalie orientale et à l'Est de Kardhitsa en Thessalie occidentale). J'ai essayé de les interpréter géologiquement mais n'ai pas toujours réussi. Ainsi je n'ai pas pu donner d'explication pour l'anomalie en Thessalie occidentale. On peut imaginer que celle du voisinage de Larissa correspond à un ancien lit de Pinios, mais ce n'est pas certain ;

- il y a aussi dans le tracé des limites de ces planches des indéterminations, en particulier vers les limites des plaines et de nombreuses imprécisions qu'une densité plus grande de sondages électriques aurait permis d'éviter ;

- enfin, du fait que les échelles de résistivités se recouvrent pour les formations meubles et les formations plio-pléistocènes plus cimentées, il y a une incertitude quasi totale dans les grandes plaines, quant à la position de la surface de séparation entre ces deux types de formations. Ceci aurait pu être évité

grâce à des sondages d'étalonnage et à l'exécution de reconnaissances par géophysique sismique.

La valeur de la résistivité finale et la profondeur approximative de la profondeur à laquelle cette résistivité a été atteinte ont été d'autre part déterminées .

En l'absence de résultats de sondages de reconnaissances l'interprétation de ces profondeurs et de ces résistivités est très hasardeuse. Une résistivité finale supérieure à 180-200 ohm/m peut désigner un gneiss ou un marbre. Une résistivité finale de 60 ohm/m peut aussi bien s'interpréter comme du Flysch, certaines formations ophiolithiques ou comme appartenant au Néogène marin. J'ai cependant tenté une interprétation structurale basée sur la carte géologique et les résultats des rares sondages existants (voir points 7.2.1.3 et 7.2.2.2) (planche n° 15).

Il y a probablement encore d'autres incertitudes, que nous allons examiner plus bas. Mais il est encourageant de constater que, si nous avions eu des correspondances valables entre résistivités et facteurs géologiques agissants, il aurait été aisé de délimiter et caractériser la tranche phréatique et les tranches profondes surtout si elles sont conçues comme des tranches successives d'épaisseur égale.
Ajoutons que la tentative de découpage effectuée pour la Thessalie a été faite sans recours à l'ordinateur, ce qui ajoute à l'imprécision. Une procédure automatique serait ici aisément concevable, car les critères sont chiffrés et peu nombreux.

D'autre part, même sur une base aussi peu précise que le tableau du paragraphe 7.2.1.2, il aurait été possible d'aboutir à un découpage plus fin dans les plaines centrales si la densité des sondages électriques avait été plus importante et d'effectuer ce découpage et cette caractérisation des tranches dans les zones où il n'y a pas eu de reconnaissances électriques lors de l'étude réelle.

Il reste cependant à signaler un défaut important de ce découpage et de cette caractérisation que l'exécution de sondages d'étalonnage aurait permis d'éviter. Le contraste électrique entre les terrains meubles et les roches n'est pas toujours très net. La surface de séparation entre ce que j'ai appelé le bed-rock d'âge antérieur au Flysch a été déterminée approximativement. Mais cette recherche avait un but structural et de délimitation du karst enfoui. La différenciation entre terrains meubles et niveaux cénozoïques récents ou pléistocènes n'a pas été possible. Or les résistivités sont analogues :

- pour des conglomérats, des gneiss, du calcaire et pour des niveaux de galets et graviers, des sables, des grès et certains schistes cristallins ;

- pour les argiles, sableuses ou non, et les marnes, sableuses ou non, les pélites, le Flysch et certains schistes cristallins, mais ici les conséquences sont moins fâcheuses.

Il y a donc une incertitude quasi-totale en ce qui concerne le plancher de la tranche profonde la plus basse des terrains meubles.

Cette incertitude a pu être levée partiellement en Thessalie occidentale grâce aux sondages dont nous avions les résultats et dans le plateau d'Olimbos (B. V. U. 060-10, 060-20, 060-70, 061-10, 062-20) où ces formations affleuraient presque partout. Dans la plupart des cas, nous avons de bonnes raisons de supposer que ce plancher est situé en dessous de la profondeur économique limite de forage de puits d'exploitation, mais ceci est assez subjectif, et aurait pu être mieux fondé si des sondages de reconnaissances avaient été exécutés selon le schéma indiqué en 3.3 et précisé en 7.2.1.

7.2.2.2 Zones rocheuses

Ces zones rocheuses doivent être subdivisées en zones enfouies sous des terrains meubles et zones affleurantes.

Pour les zones affleurantes, nous avons vu qu'il n'y a pas de tranche profonde. La tranche superficielle n'a pas pu être délimitée, et par conséquent la tranche phréatique n'a pas pu l'être non plus. On peut cependant maintenir, en première approximation, pour la tranche phréatique l'échelle d'indices géologiques définie pour la tranche superficielle, avec tous les défauts et incertitudes qu'elle comporte. Le problème hydrogéologique principal dans les affleurements rocheux de Thessalie était le karst, et les affleurements calcaires ont été délimités plus précisément que les autres, mais pour les autres types de roches l'incertitude résiduelle est trop grande pour que des conclusions soient possibles. Un examen géologique plus précis tel que celui qui a été recommandé en 6.4.4. aurait probablement permis de combler cette lacune.

En ce qui concerne la géologie des roches cachées par des épaisseurs non négligeables de terrain meuble, nous avons vu qu'il y avait incertitude en ce qui concerne les formations cénozoïques récentes et pléistocènes, de type continental. Dans ces formations il y a cependant des niveaux aquifères, dont les caractéristiques sont différentes de celles que l'on rencontre dans les terrains meubles et il aurait

été nécessaire de lever cette incertitude. Ceci me permet d'insister sur l'intérêt qu'aurait eu l'exécution des sondages d'étalonnage de la géophysique.

D'autre part, une manière rapide, légère et assez digne de confiance pour éliminer cette incertitude aurait été l'exécution, en même temps que les reconnaissances électriques, de reconnaissances géophysiques par sismique réfraction, qui auraient permis, en particulier dans la partie nord-ouest (cône de Pinios) de la Thessalie occidentale de différencier les niveaux d'alluvions grossières et les niveaux conglomératiques sous-jacents. Le contraste des vitesses aurait été moins net dans la différenciation entre alluvions fines et niveaux plio-pléistocènes argileux, ou gréso-marneux, mais ceci est moins important. L'intérêt de la sismique aurait aussi été très net pour la partie nord de la Thessalie orientale (cône du Titarissios) et dans la plupart des plaines périphériques, pour permettre une différenciation entre alluvions (ou Plio-Pléistocène) et socle cristallin (marbres, gneiss ou schistes). La différenciation entre calcaires et Flysch, ou calcaires et ophiolites ou radiolarites, aurait été plus précise aussi, si l'on avait combiné la sismique réfraction et la reconnaissance électrique dans les plaines périphériques. Il y aurait eu possibilité de recoupements et contrôles des interprétations des deux modes de reconnaissances. Il ne faut cependant pas croire que cette combinaison de deux modes de reconnaissances géophysiques aurait été une panacée et en particulier, il est probable que l'incertitude marbre-gneiss n'aurait pas pu être levée par cette combinaison.

Reste à examiner son "poids". Le volume de travail qu'auraient représenté ces reconnaissances sismiques peut être évalué à 4 mois d'une équipe sismique (2 géophysiciens, 1 artificier, 5 à 6 manœuvres, un appareillage "lourd"). Ces travaux ne sont donc pas hors de proportion avec les reconnaissances effectuées lors de l'étude réelle. Quant aux délais, ils n'auraient pas été affectés car ces reconnaissances sismiques auraient aisément pu être effectuées parallèlement aux autres travaux géophysiques et de sondages.

Un autre problème hydrogéologique relatif aux roches enfouies sous des épaisseurs non négligeables de terrain meuble était celui des prolongements des systèmes karstiques sous les plaines. Ce problème a été traité avec une certaine attention lors de l'étude réelle. Ceci a comporté une utilisation des résultats géophysiques électriques et l'établissement d'une carte structurale et d'hydrogéologie karstique (planche n° 15). Cette carte aurait pu être précisée grâce à une densité plus grande de sondages électriques dans les plaines centrales et surtout à l'exécution des sondages d'étalonnage de la géophysique. Ces sondages auraient permis, sur le pourtour des plaines, de distinguer entre marbres et gneiss dont les résistivités sont du même ordre. Pour lever cette incertitude, le seul moyen a été l'extrapolation sous les plaines des affleurements calcaires combinée avec une exploitation logique des discontinuités tectoniques décelées par la géophysique. Ce sujet a été traité plus en détail dans un article (BAJARD et GIRELLI, 1969) et je n'insisterai pas à ce sujet.

7.2.2.3. Commentaires

Les reconnaissances effectuées lors de l'étude réelle n'auraient pas permis la délimitation et la caractérisation géologique des tranches phréatique et profonde, pour l'ensemble de la Thessalie, avec une précision et une certitude suffisantes pour que l'application de la méthode globale de calcul du bilan hydrologique découlant de l'exposé de la première partie soit possible.

Pourtant les résultats de ces reconnaissances ont montré que :

- si l'on avait effectué des sondages d'étalonnage de la géophysique et donc pu établir par interpolations basées sur l'ensemble de la région des correspondances entre résistivités et facteurs géologiques agissants des terrains meubles (granulométrie, porosité, perméabilité) la délimitation et la caractérisation des tranches phréatique et profonde auraient été possibles, avec une précision suffisante ;

- elles l'auraient été d'autant plus que moins de zones périphériques auraient été négligées lors des reconnaissances électriques et des sondages d'étalonnage ;

- les incertitudes auraient été encore moins grandes si l'on avait combiné des reconnaissances par sismiques réfraction aux reconnaissances électriques dans les deux plaines centrales et disposé des résultats des sondages d'étalonnage ;

- on aurait pu aussi améliorer sensiblement la précision des connaissances géologiques en repérant sur le terrain une proportion raisonnable (20 % par exemple) des puits de reconnaissance et /ou d'exploitation effectués par le Service d'Améliorations Foncières du Ministère de l'Agriculture et financés par la Banque Agricole et en exploitant les résultats par des procédés automatiques. L'exploitation de ces informations n'aurait été pratique que si l'on avait pu utiliser des processus automatiques de traitement. Mais ces processus sont, soit de conception simple, soit déjà standardisés.

- En pratique, la délimitation et la caractérisation des tranches géologiques successives devient aisée si l'on généralise la modification de la définition de ces tranches en les supposant d'épaisseur égale sur toute l'étendue des zones de terrain meuble.

Il y aurait donc eu d'une part accroissement du coût des reconnaissances, qui aurait triplé, grosso-modo, par rapport à l'étude réelle et d'autre part économie probable sur le temps d'analyse et d'exploitation des informations. Le résultat obtenu aurait été une connaissance beaucoup plus précise de la géologie de la région et de son sous-sol. Elle aurait été en tout cas suffisamment précise pour permettre l'exécution répétitive de calculs valables et significatifs du bilan pour diverses hypothèses d'aménagement, chose qui était très loin d'être possible avec les reconnaissances effectuées lors de l'étude réelle et auparavant. De plus ces reconnaissances auraient été utiles pour l'élaboration des modèles sub-régionaux d'avant-projet, puis de projet et enfin de management.

7.3. Facteurs hydrogéologiques utiles

Les facteurs hydrogéologiques utiles retenus comme caractéristiques des aires élémentaires sont :

- les niveaux ou la charge hydrostatique des nappes profondes, libres ou captives ;
- la classe chimique des eaux.

Examinons si les données à disposition lors de l'étude réelle auraient été suffisantes pour que l'utilisation de la méthode découlant de la première partie ait une signification et une précision suffisantes.

7.3.1. Niveaux et charges hydrostatiques des nappes

Les résultats des puits de reconnaissance exécutés par l'IGSR, ADSCO, le Service des Améliorations Foncières et les résultats de puits privés ou publics analysés par ZORZI comportaient des valeurs du niveau statique, des débits de pompage et des abaissements correspondant à ces débits. Il n'est pas certain que toutes ces données étaient valables. Leur nombre est tel, cependant qu'il aurait été tout à fait concevable de les analyser selon un processus automatique, en déduire des cartes d'isopièzes et de procéder à un filtrage, automatique ou manuel, des données non valables par examen des incompatibilités et des invraisemblances. Ceci n'a pas été fait car la méthode n'était pas conçue clairement et le problème n'était pas posé dans l'optique globale envisagée ici. Cependant, la confiance à accorder à ces données à disposition n'était pas absolue et il aurait été indispensable de les contrôler, après une première exploitation automatique. Ce contrôle aurait pu être fait au moyen de 6 à 8 puits de reconnaissance et d'essais de pompage, répartis judicieusement (3 en Thessalie occidentale, 2 en Thessalie orientale, 3 dans les zones périphériques par exemple), et de l'utilisation des niveaux piézométriques mesurés dans les sondages d'étalonnage de la résistivité (voir paragraphe 7.2) et dans des puits ou forages existants. Ces reconnaissances de contrôle auraient permis, par réutilisation des programmes d'exploitation des données après "injection" des données nouvelles, de juger de la validité des données précédentes non éliminées et, éventuellement de procéder à une nouvelle élimination.

Ce travail supplémentaire d'analyse, de traitement de l'information et de reconnaissance de contrôle est loin d'être négligeable. Les reconnaissances seules auraient comporté environ 4 mois de travail pour une foreuse et un équipement pour les essais de pompage, plus l'utilisation de programmes, aisément standardisables, ou déjà standard. Mais ces travaux ne sont pas démesurés, encore une fois, et les résultats escomptés sont sans commune mesure avec ceux qui ont été obtenus.

7.3.2. Classe chimique des eaux

Lors de l'étude réelle, nous disposions de 280 analyses d'eaux de surface et souterraine, réparties sur l'ensemble de la Thessalie. Un examen rapide de ces résultats nous a montré que toutes les eaux analysées étaient correctes pour l'irrigation, sauf un échantillon profond dans l'Est de la Thessalie orientale et que presque tous étaient corrects pour la consommation humaine. Nous n'avons donc pas poussé l'examen plus avant étant donné le fait que la partie hydrogéologique de l'étude réelle n'était qu'un corollaire, devant permettre de juger de la nécessité de barrages réservoirs.

Il aurait été commode et peu coûteux de rechercher des données plus abondantes auprès du Service des Améliorations Foncières et des diverses administrations chargées des adductions urbaines, par exemple, et d'examiner ces résultats, soit manuellement, soit par l'intermédiaire de programmes simples d'ordinateur.

Je n'insisterai pas à ce sujet et admettrai que en Thessalie, pratiquement toutes les eaux sont utilisables (moyennant épuration bactérienne éventuelle des eaux usées urbaines).

7.4. Facteurs agronomiques utiles

Le seul facteur agronomique retenu comme utile dans la première partie est l'indice géologique, qui est défini comme une manière commode de représenter par un seul chiffre des associations de valeurs représentatives des caractères agronomiques utiles, c'est-à-dire des parties constantes des facteurs agronomiques agissants :

. espèce
. densité
. âge moyen ou originel

} de la végétation.

Cette définition d'indice est semblable à celle des indices géologiques (voir point 3.5.).

Lors de l'étude réelle, la notion d'indice agronomique n'avait pas été introduite. Je n'avais donc pas porté attention à cet aspect du problème. Par la suite, j'ai essayé, mais sans succès de réunir des données.

Je ne peux donc pas utiliser l'exemple thessalien pour l'examen critique de l'exposé de la première partie. Tout au plus pourrai-je indiquer que l'analyse stéréoscopique des photographies aériennes existantes au 1/33 000 et au 1/18 000 aurait permis une première ébauche de découpage régional en zones caractérisées par l'espèce, la densité et l'âge de la végétation. Cette première ébauche aurait été facilement contrôlée et complétée, au moyen d'un nombre réduit de levés sur le terrain. On serait ainsi arrivé à une définition des indices agronomiques de la région dans son état naturel, déjà assez précise, au moyen d'un effort peu important. On peut en effet évaluer le volume de travail nécessaire à 1 mois d'analyse photographique, 2 mois de contrôle sur le terrain et 1 mois de travail de synthèse pour 1 ingénieur agronome, soit 4 mois de travail systématique. Ceci est tout à fait compatible avec les dimensions de l'étude réelle.

Cette étude aurait été encore meilleure si elle avait pu être basée sur une couverture de la région par photographies aériennes effectuées simultanément en noir et blanc, couleur et infrarouge, préconisée par ailleurs pour la géologie (voir point 6.4.1.5).

7.5. Facteurs climatologiques utiles

Trois facteurs climatologiques utiles ont été retenus dans la première partie :

. l'indice climatique,
. la quantité totale de précipitations,
. la température de l'air.

L'indice climatique est une caractéristique physique constante de l'aire élémentaire. Envisagé de manière analogue à l'indice géologique, il est une manière commode de représenter par une seule valeur les correspondances entre des associations de valeurs des 8 facteurs agissants et des 2 facteurs utiles variables (voir points 3.6 et 3.7).

Les 8 facteurs agissants sont les suivants :

. quantité de pluie,
. quantité de neige,
. intensité de pluie,
. intensité de neige,
. température de l'air,
. humidité de l'air,
. agitation de l'atmosphère,
. nébulosité.

TABLEAU 7.5.1: STATIONS CLIMATOLOGIQUES (PRECIPITATIONS ET TEMPERATURE DE L'AIR) (voir planche n° 19)

STATION	Grandeur&années de mesure précipitations	Grandeur&années de mesure température	auto-rité
AKHILLION	1907-08		a
ALMYROS	1906-08 1913-14 1916-17 1919-30		a
	1932-33 1936-40 1942		b
ANAVRA	1952-66		c
ANAVRA (GOURA)	1933-41		
ARMENION	1909-11		
ARYITHEA	1961-65		d
AYIA	1963-64	1963-64	e
AYIOFILLON	1933-42 1951-66		c
BEZOULA A	1951-66		c
BEZOULA B	1933-42		b
BEZOULA C	1961-65		d
DHOMOKOS A	1908 1910-12 1919-20 1923-24		a
	1930-31		b
DHOMOKOS B	1955-66		c
DHOMOKOS C	1904-11		
DRAKOTRIPA	1962-65		d
ELASSON	1951-66		c
ELATI A (TYRNA)	1908-11		a
ELATI B (TYRNA)	1951-53 1956-57 1959 1962 1964		c
ELATI C (TYRNA)	1961-65		d
EVANYELISMOS	1904-11		a
FARKADHON A (STATION)	1901-06 1908-11		a
FARKADHON B	1951-66		c
FARSALA A	1903-10		a
	1958 1961-65	1958-65	b
FARSALA B	1958-66		c
FOURNA A	1950-63	1960-64	e
FOURNA B	1961-65		d
GARDHIKI	1933-39 1941-42		b
KALAMBAKA A	1915-40 1950-62 1964	1957-65	c
KALAMBAKA B	1904-11		a
KARDHITSA	1903-10		a
	1937-40 1942		b
KARITSA	1961-65		d
KATAFITON	1961-65		d
KVISTON	1961-65		d
KOUTSCHERON	1904-08		a
KRAISOMILIA	1961-66		c
LARISSA	1899-1915 1918-26 1928-40 1949-65	1899-1915 1918-26 1928-40 1949-65	a b
LIVADHION A	1933-40		b
LIVADHION B	1951-65		c
LOUTRON (KALAMBRESSION)	1901-05 1908		a
MALAKASSION A	1904-11		a
MALAKASSION B	1933-42 1951-53 1955-66		c
METEORA A	1934-38 1940-41		b
METEORA B	1951-56 1959-66		c
METSOVON	1961-65	1961-64	d
MOLOKHA	1961-65		d
MORFOVOUNI	1904-11		a
MOUKHA	1963-65		d
MOUZAKI	1961-66		c
PALEOKHORI	1961-65		d
PEFKOFITON	1960-64		e
PILI	1933-40 1942		c
PITSIOTA	1961-65		d
RAKHOULA	1961-65		d
RAPSANI	1933-42		c
RENDINA A	1933-42		c
RENDINA B	1951-53 1955 1959 1961-65		c
SERVIA	1936 1938		b
SOTIRION	1951-66		c
SPILIA	1933-37 1939-41 1951-66		c
STOURNAREKA	1961-65		d
THRAPSIMION	1904-08		a
TYRNAVOS	1904-08 1951-66		c
TRIKALA	1899-1905 1908-11 1913-15 1917-29	1899-1905 1907-11 1913-15 1917-29	a
	1931 1933-40 1943-65	1933-40 1943-65	b
TRILOFOS	1931-42		b
ISARITSANI	1916-17 1920-21 1923 1930-34		a b
VAKHARI	1961-65		d
VATHILAKKOS	1961-65		d
VATHYRENA	1961-65		d
VERDHIKOUSSA	1951-65		c
VOLOS	1899-1902 1906 1909-11 1916-26	1904-05 1899-1906 1908-12 1916-26	a
	1930-40 1956-65	1930-40 1956-64	b
YANNOTA	1933-42		b
YANNOTA	1951-65		c
ZAPPION	1923-42		b

Autorité chargée des mesures:
a Service météorologique de l'Observatoire national
b Service météorologique national
c Service hydrologique du Ministère des Travaux publics
d Electricité de Grèce
e Institut de recherches forestières

Les deux facteurs utiles variables sont :

. la quantité totale des précipitations,
. la température de l'air.

Nous allons examiner ci-après les résultats de mesures climatologiques à disposition et verrons si ces données étaient suffisantes pour permettre une représentation commode et significative des 3 facteurs utiles.

Comme il s'agit ici d'une étude préliminaire nous aborderons le problème selon la méthode statistique.

7.5.1. Les mesures climatologiques en Thessalie

En Thessalie, un grand nombre d'administrations ou d'autorités diverses effectuent ou ont effectué des mesures climatologiques en de nombreuses stations réparties inégalement dans la région.

Ces mesures avaient été concentrées et partiellement exploitées par STYLIANOPOULOS-ANTONOPOULOS, dans le livre "Observations hydrologiques" paru à Athènes en 1946, qui utilise la plus grande partie des mesures effectuées avant la deuxième guerre mondiale.

J'ai utilisé ce livre et pris en considération les résultats des mesures effectuées dans toutes les stations dont j'ai pu trouver trace, et qui sont indiquées sur la planche n° 16.

J'ai classé dans le tableau 7.5.1. les différentes stations utilisées dans la précédente étude.

7.5.2. Examen critique des données

Nous disposons d'assez nombreuses mesures des quantités globales de précipitations pour 73 stations, réparties sur des périodes diverses entre 1899 et 1966 ; ces stations sont géographiquement assez mal réparties. 48 de ces stations se trouvent installées dans les montagnes du Pinde et à ses environs immédiats. Les 28 autres sont réparties inégalement dans le reste de la région. Elles relèvent de 6 autorités différentes.

En ce qui concerne les températures, par contre, nous ne disposons de mesures qu'en 10 stations, heureusement assez dispersées pour qu'une utilisation de ces données soit envisageable à l'échelle régionale.

En quelques rares stations, on dispose, sur peu d'années, de mesures de la température du sol et de mesures d'évaporation sur 24 heures ; c'est le cas des 4 stations de l'Institut des Recherches Forestières du Ministère de l'Agriculture, situées dans les montagnes. En quelques autres stations, comme celles de l'Office National des Tabacs, on mesure l'insolation, mais les mesures sont trop isolées et portent sur trop peu d'années pour que l'on puisse essayer de les utiliser.

Il en va de même des rares mesures de nivosité, nébulosité, hygrométrie et des vents qui ont été faites en certaines stations à certains moments. Il existe quelques rares pluviographes, mais pas de nivographes. Nous avons donc été obligés, pour l'étude réelle de ne tenir compte que des éléments climatologiques suivants :

- quantités globales des précipitations, sans pouvoir différencier entre pluie, neige et interception horizontale ;
- intensités des précipitations, que nous ne pouvons apprécier que par le nombre de jours de pluie durant une période donnée, et sans pouvoir apprécier plus nettement l'intensité des épisodes pluvieux ;
- températures de l'air.

Nous ne disposons pas de données en nombre suffisant pour tenter de déterminer :

- la répartition des précipitations en pluie et neige ;
- l'intensité des précipitations ;
- l'humidité de l'air;
- l'agitation de l'atmosphère ;
- la nébulosité.

Il y a donc là une grave lacune, car l'indice climatologique ne peut pas être évalué. Qu'aurait-il fallu faire pour pallier ce défaut ?

Avant d'aborder la réponse à cette question, il est utile d'examiner la valeur des mesures de précipitations et de températures. Ceci permettra d'envisager globalement les travaux qui auraient permis d'avoir des données climatologiques suffisantes.

L'exactitude et la précision des mesures dépendent de 2 facteurs :

. l'observateur,
. l'instrument de mesure.

Les mesures effectuées par le Service Météorologique de l'Observatoire National, puis par le Service Météorologique National peuvent être considérées comme tout à fait valables, en raison du bon entretien de l'équipement et de la formation technique correcte des observateurs. Les mesures effectuées par l'Electricité de Grèce sont aussi satisfaisantes pour des raisons analogues.

Les mesures effectuées par le Service Hydrologique du Ministère des Travaux Publics et l'Institut des Recherches Forestières sont beaucoup plus sujettes à caution. Les observateurs ne sont dans ces deux cas que des habitants des localités et non des employés des services responsables. Leur niveau d'éducation ne peut garantir ni la lecture correcte des appareils, ni leur entretien satisfaisant, ni le report exact des résultats. En particulier, il n'est pas absolument certain que les observateurs procèdent à la fusion des précipitations solides. Ceci introduit un doute sur la valeur des mesures qui est très délicat à lever.

Nous voyons donc que les données à disposition ne sont pas toutes d'une égale valeur, ce qui ajoute encore au caractère aléatoire de leur utilisation.

En tout cas, cette situation complexe me semble tout à fait représentative du cas moyen, et nous verrons plus loin comment il est possible d'exploiter ces données brutes de manière à en obtenir des représentations significatives, utilisables pour un clacul de bilan.

Revenons à l'examen des lacunes.

Pour qu'une évaluation de l'indice climatologique soit possible au niveau de l'étude préliminaire, il aurait fallu disposer de résultats de mesures des 8 facteurs agissants en un nombre suffisant de stations et pendant une durée suffisante.

Comment cela aurait-il pu être réalisé en Thessalie, et quelle aurait été la durée minimale acceptable de mesures ?

Il nous faut envisager le problème dans l'ordre inverse des questions : la durée de mesures possibles dans le cadre d'une étude préliminaire conditionne les mesures à effectuer.

L'étude réelle a duré 22 mois. Raisonnablement pour une région de la taille de la Thessalie, il faut compter que l'étude préliminaire ne doit pas durer moins de deux ans, reconnaissances incluses. Il ne faut pas non plus l'étaler trop dans le temps, car ces délais finiraient par repousser trop loin la mise en œuvre de l'aménagement. On peut admettre une durée maximale acceptable de 3 ans, approximativement.

Même en supposant que toutes les procédures qui pouvaient être automatisées l'ont été, l'exploitation des données, c'est-à-dire le calcul des bilans possibles, puis le choix agro-socio-économique entre ces bilans possibles nécessitera environ 8 mois de travail. Il reste donc 16 à 28 mois pour la préparation des programmes de reconnaissances et leur exécution. Ceci nous amène à conclure que les mesures climatologiques complémentaires à effectuer pour une étude préliminaire pourront être effectuées pendant 1 à 2 ans, à condition que le programme des mesures à effectuer soit prêt très rapidement et que le matériel nécessaire soit disponible et installé sans retard.

Une durée de mesures de 1 an est le minimum strictement acceptable pour qu'une première ébauche de correspondances entre facteurs agissants et facteurs utiles ait quelque signification. Deux ans seraient préférables, mais ceci ne sera pas toujours compatible avec les exigences du planning général de développement régional. Remarquons que ces correspondances peuvent être perfectionnées lors des avant-projets. En effet, il suffit pour cela de continuer les mesures pour l'ensemble de la région et de reprendre les résultats bruts en considération pour chaque fraction de région dont l'étude d'avant-projet a été entreprise.

La question de la durée des mesures ayant été résolue, quelles sont les mesures à exécuter, et les stations à équiper ?

Si l'on considère la disposition des stations de mesures climatologiques en Thessalie (planche n°16), on voit que les mesures des quantités globales de précipitations et de températures de l'air devraient être multipliées. Il serait utile de prévoir l'installation d'une vingtaine de stations pluviométriques classiques supplémentaires principalement dans les plaines principales et les montagnes du Nord Est. Ceci atténuerait le déséquilibre dans la densité des stations pluviométriques qui a été noté plus haut.

Chaque station pluviométrique classique existante devrait être équipée d'un thermomètre à minimums et maximums.

A ces équipements "classiques" supplémentaires ne correspondraient pas des investissements hors de proportion avec le but de l'étude, ni en personnel, ni en matériel. Un effort très important devrait cependant être entrepris pour que la qualification des agents de mesure, la qualité du matériel et les méthodes de mesure, d'enregistrement et d'entretien du matériel soient homogénéisées pour l'ensemble de la région.

En second lieu il faudrait installer une dizaine de stations de mesure des facteurs agissants du climat, répartis de manière régulière dans la région, en tenant compte des altitudes. Le coût de ces installations complémentaires n'est pas négligeable. Mais il est sans commune mesure avec les avantages qui découleront de la possibilité de calculer les bilans hydrologiques et hydrogéologiques avec une précision suffisante. Les facteurs climatologiques sont les principaux éléments physiques variables en fonction du pas de temps qui seront introduits dans le calcul. Même si tous les éléments caractéristiques des aires élémentaires ont été déterminés correctement, le bilan ne vaudra rien si ces éléments physiques variables ne sont pas connus avec une précision suffisante.

Nous allons maintenant examiner comment les données à disposition en Thessalie auraient pu être utilisées approximativement pour déterminer les facteurs climatologiques utiles et ce, au prix de quelle approximation.

7.5.3. Homogénéisation des valeurs ponctuelles de précipitations

Il est classique d'homogénéiser les valeurs annuelles des précipitations en se basant sur des lois de correspondance entre deux stations voisines, l'une étant prise comme station de référence et l'autre ramenée à la station de référence. La correspondance suit en général une loi de proportionnalité pour les précipitations.

Il faut donc rechercher les relations de correspondance entre stations pour les valeurs de chaque catégorie de trimestre, T_1, T_2, T_3, T_4, car rien ne permet d'espérer que la même loi de correspondance entre deux stations soit valable quelle que soit la saison. Ceci conduit à éliminer les stations où l'on dispose de trop peu de mesures, où à ne les considérer que sous toutes réserves. Au-dessous de cinq années de mesures, cette corrélation n'offre plus de sécurité.

En Thessalie ceci se produit pour 6 des 73 stations prises en considération dont malheureusement les 3 stations du Sud de la plaine de Thessalie orientale, Akhillion, Armenion et Ayia. Pour la station de Elati 1 dans le Koziakas, les valeurs mesurées à Elati 2 et 3 sont suffisantes pour pallier ce manque.

Pour la station de Dhrakotripa pour laquelle nous ne disposons que de deux ans de mesures j'ai recherché la comparaison avec une station proche où l'on dispose d'une bonne base : Bezoula et ai de ce fait considéré comme relativement significatives les moyennes corrigées de cette manière.

Enfin pour la station de Servia, où nous ne disposons que de deux années de mesures, j'ai effectué l'homogénéisation au plus proche avec la station de Livadhion, et comparé à ce que donnait une homogénéisation avec Larissa. Les résultats obtenus sont assez discordants.

Pour les autres stations j'ai considéré 3 stations de base, Larissa, Trikala et Volos et ai rapporté dans un premier temps Trikala et Volos à Larissa, pour laquelle nous disposions de 56 années de mesure, alors que pour Trikala, nous en avons 53 et pour Volos 46.

J'ai donc calculé pour ces 3 stations la moyenne brute, la moyenne homogénéisée sur Larissa, les écarts types, noté les extrêmes et essayé de dégager la tendance. Les résultats de ces déterminations sont donnés dans le tableau 7.5.3 a :

Tableau 7 5 3 a : Valeurs statistiques homogènes des précipitations pour les trois stations de base

STATION	LARISSA				TRIKALA				VOLOS			
TRIMESTRE	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
moyenne brute mm	131	119	64	193	248	147	68	332	142	105	58	184
rapport correctif	1	1	1	1	1,92	1,26	1,09	1,69	1,06	0,83	1,00	1,02
moyenne homogène mm	131	119	64	193	252	149	70	326	140	99	63	196
écart type mm	58	54	48	69	104	67	54	114	64	48	40	82
coefficient de variation %	44	46	75	36	41	46	78	35	45	46	68	42
minimum mm	24	24	3	60	86	31	1	97	51	18	1	69
maximum mm	297	353	170	381	547	306	204	633	329	253	119	397

De l'examen de ces valeurs, nous pensons déjà déduire les remarques suivantes :

- le climat de Thessalie est très irrégulier, d'une année à l'autre. Les cœfficients de variations sont très forts, et les extrêmes très écartés de la moyenne. Mais géographiquement les cœfficients de variation sont voisins pour les 3 stations de base. J'ai donc pris pour l'ensemble de la Thessalie des cœfficients de variation de 44,5 % pour le 1er trimestre, 45;7 % pour le 2e trimestre, 76,4 % pour le 3e trimestre et 35,4 % pour le 4e trimestre;

- les valeurs de précipitations non négligeables du 3e trimestre correspondent principalement aux pluies du mois de septembre, les précipitations de juillet et août étant quasi nulles.

Pour l'évaluation des tendances, j'ai considéré les moyennes de groupes de 5 années pour lesquelles des mesures ont été effectuées entre 1900 et 1965 et ai rassemblé les résultats dans le tableau 7.5.3 b ci-dessous, en valeurs moyennes brutes puis rapportées à la moyenne significative d'ensemble pour la station. Puis j'ai reporté ces résultats dans le diagramme du tableau 7.5.3 c.

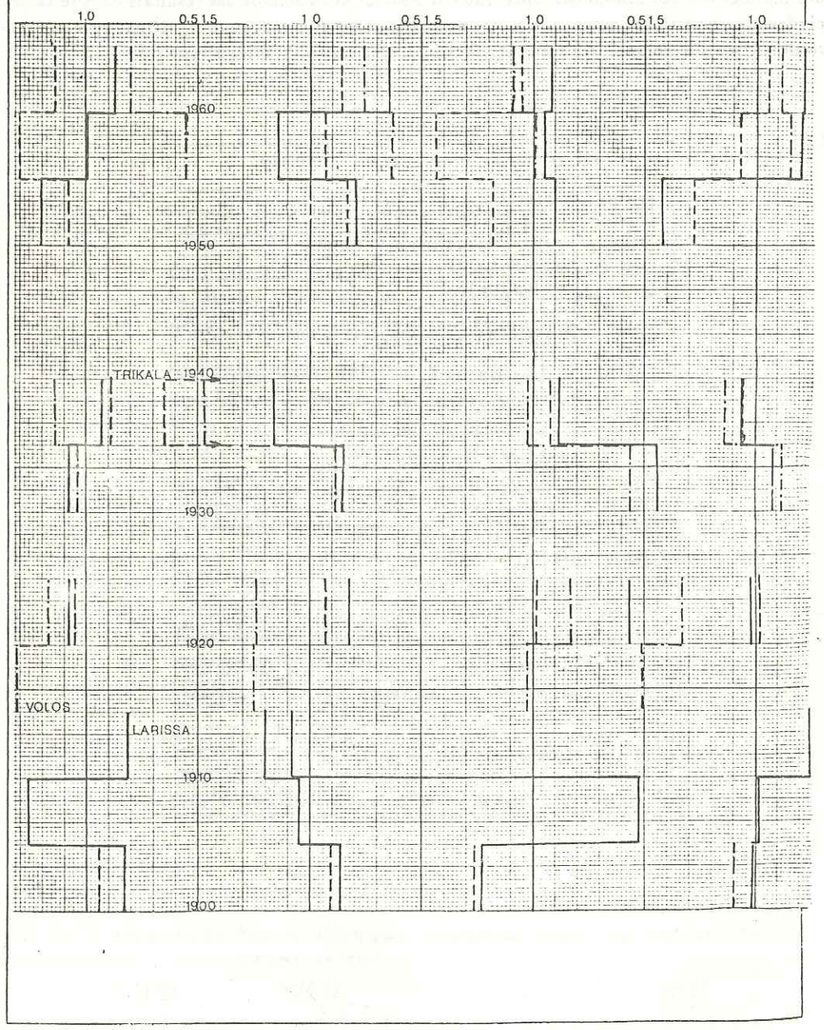
Tableau 7.5.3 b : Recherche des tendances climatiques (précipitations)

	Station	LARISSA				TRIKALA				VOLOS			
	Trimestre	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
MOYENNES mm	1901.05	108,9	102,1	78,2	136,6	332,4	132,7	86,4	364,7				
	1906.10	164,9	124,2	32,8	183,8								
	1911.15	106,3	142,9	132,0	143,4								
	1916.20									184,9	131,1	93,4	177,7
	1921.25	141,6	97,8	35,4	136,9	262,0	135,1	66,7	385,9	166,0	129,7	48,6	245,7
	1926.30												
	1931.35	141,2	100,6	27,8	177,1					146,9	92,2	32,7	161,5
	1936.40	128,8	137,3	55,7	203,3	221,2	244,2	62,6	343,9	151,1	153,7	53,5	208,9
	1941.45												
	1946.50												
	1951.55	147,0	93,7	57,1	274,2	268,3	121,1	80,3	423,5				
	1956.60	130,0	134,8	60,4	152,6	229,5	136,1	63,6	354,3	77,9	66,3	57,7	154,8
	1961.65	113,7	86,0	58,6	149,0	224,0	125,9	77,0	310,0	113,1	79,3	63,3	162,6
RAPPORT AUX MOYENNES GLOBALES	1901.05	0,85	0,86	1,23	1,01	0,94	0,91	1,26	1,10				
	1906.10	1,26	1,05	0,52	0,38								
	1911.15	0,81	1,20	2,08	0,75								
	1916.20									1,31	1,19	1,02	1,51
	1921.25	1,08	0,82	0,56	1,02	1,05	0,93	0,98	0,98	1,17	1,24	0,83	1,33
	1926.30												
	1931.35	1,08	0,85	0,44	0,92					1,04	0,88	0,56	0,88
	1936.40	0,33	1,16	0,88	1,06	0,83	1,67	0,92	1,06	1,14	1,47	1,02	1,14
	1941.45												
	1946.50												
	1951.55	1,20	0,79	0,90	1,42	1,03	0,83	1,18	1,28				
	1956.60	0,99	1,14	0,95	0,79	1,30	0,93	1,14	1,07	0,55	0,63	0,93	0,84
	1961.65	0,87	0,64	0,92	0,78	1,14	0,86	1,09	0,94	0,80	0,76	1,03	0,88

TABLEAU 7.5.3.c

Précipitations
étude des tendances

rapports entre les moyennes quinquennales et globales



L'examen de ces diagrammes ne permet pas de conclure à autre chose qu'une grande hétérogénéité de précipitations (fait déjà constaté lors de l'examen des écarts-types) avec une tendance générale horizontale. On pourrait évidemment faire apparaître des variations de croissance et de décroissance si l'on compare les valeurs extrêmes et les valeurs médianes de la série, mais il ne me semble pas que l'on puisse, sans risquer les extrapolations hasardeuses, essayer de prévoir les oscillations de tendance pour les 50 années à venir. On peut donc se demander s'il vaut la peine de considérer les tendances.

L'analyse statistique de ces trois stations de base nous permet de conclure ceci :

- comme il est probable que les variations climatiques saisonnières ou annuelles seront amorties dans un programme d'exploitation de l'eau, soit par des tockages superficiels, soit par une utilisation planifiée des eaux souterraines et une organisation de la réalimentation des nappes, il me semble définitivement préférable d'aborder le problème des bilans régionaux au moyen de l'hydroclimatologie statistique et de réserver l'analyse séquentielle à des problèmes plus locaux de recherche de lois de transfert pour des périodes réduites de mesures de dimensionnement des retenues pour justement parvenir à la régulation interannuelle souhaitée ou encore de dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues, et de réalimentation des nappes ;
- dans ces conditions, les écarts ont beaucoup moins d'importance, dans une étude de bilan, que les moyennes.

Leur plus grande utilité, dans une étude préliminaire devrait être recherchée dans la direction d'une première évaluation du dimensionnement des ouvrages ou de la limitation des programmes d'exploitation des eaux souterraines, pour éviter, par exemple, des rabattements trop forts après des périodes de sécheresse. Ces points sont annexés dans l'élaboration du bilan de base et ne concernent que l'organisation de l'exploitation dans le cadre de ce bilan de base ;

- en tous cas la subdivision en trimestres donne une idée déjà nette des variations au cours de l'année, ce qui devrait permettre sans complications de calcul démesurées, de suivre la nature de plus près dans l'évaluation du bilan.

7.5.4 Etablissement des cartes d'isohyètes

Après l'étude de ces 3 stations de base, j'ai calculé les moyennes homogénéisées des autres stations et ai rassemblé les résultats dans les cartes d'isohyètes des planches 17-1, 17-2, 17-3 et 17-4 et le tableau 7.5.4.

A propos de ces isohyètes, il faut remarquer que même avec un nombre de stations relativement grand, comme en Thessalie, on ne peut pas tracer les isohyètes avec une grande sécurité. Ceci conduit à essayer, pour les déterminations des quantités de précipitations, à tenir compte aussi des valeurs ponctuelles, en particulier pour les grandes surfaces comprises à l'intérieur d'une même courbe isohyète. L'accroissement du nombre de stations de mesures proposé en 7.5.1. permettrait de réduire cette imprécision.

D'autre part le calcul a été effectué à la main. Un gain de temps et une précision supplémentaires - et nécessaires - considérables, pourraient être obtenus par un traitement automatique des données selon des procédés qui sont déjà au point et utilisés couramment en pratique.

Tableau 7.5.4 : Valeurs moyennes saisonnières des précipitations

Trimestre	1	2	3	4	Trimestre	1	2	3	4	Trimestre	1	2	3	4
Akhillion (2ans)	122,5	69,0	145,3	148,1	Fourna B	403,4	251,6	66,3	558,2	Pefkofiton	273,0	235,0	60,1	386,6
Almyros	179,5	110,7	67,1	252,8	Gardhiki	519,7	202,5	149,4	654,0	Portouli	455,5	306,0	138,5	731,5
Anavra A	232,2	168,1	80,6	274,6	Kalambaka A	330,1	193,1	183,7	405,5	Pili	428,1	152,6	86,6	556,6
Anavra B	305,4	187,2	76,8	391,2	Kalambaka B	310,0	139,7	90,3	424,4	Pitsiota	401,6	249,8	74,6	610,4
Armenion (3ans)	120,3	76,0	53,6	147,7	Kardhitsa	234,2	110,6	89,8	282,1	Rakhoula	336,4	184,9	77,7	442,0
Aryithea	396,5	295,6	116,6	871,2	Karitsa	386,8	280,2	76,3	775,8	Rapsani	312,0	195,7	113,7	357,5
Ayia (2ans)	109,2	68,1	112,2	138,6	Katafiton	444,9	269,8	113,7	729,2	Rendina A	301,7	149,1	74,2	331,9
Ayiofillon	259,1	147,3	87,2	383,1	Khrisomilia	367,1	245,4	178,9	864,7	Rendina B	519,0	323,0	111,4	611,7
Bezoula A	445,4	379,8	112,0	692,4	Kliston	386,8	253,0	76,6	932,8	Servia	119,7	186,5	298,2	283,4
Bezoula B	564,5	285,9	89,6	763,1	Koutsoheron	161,0	130,3	56,9	166,8	Sotirion	161,2	114,8	78,5	220,7
Dhomokos A	249,8	184,7	94,5	296,1	Larissa	151,3	118,7	63,6	192,6	Spilia	292,5	153,5	99,5	341,3
Dhomokos B	191,6	135,5	74,9	267,1	Livadhion A	235,4	281,7	121,3	374,4	Stournareka	659,7	360,9	127,0	1064,1
Dhomokos C	309,0	151,3	189,0	335,8	Livadhion B	241,3	273,6	144,4	382,5	Thrapsimion	290,6	283,8	312,3	467,0
Drakotripa (1an)	518,0	264,8	42,9	668,1	Loutron	234,4	192,9	200,1	388,2	Tirnavos	150,7	121,0	91,7	189,7
Elasson	155,2	164,3	103,3	215,9	Malakassion A	502,5	299,0	171,4	707,9	Trikala	251,8	143,2	69,6	325,7
Elati A	706,8	162,5	284,3	1001,5	Malakassion B	449,5	265,0	119,9	578,1	Trilofon	309,5	147,6	66,7	331,2
Elati B	490,0	223,5	183,3	726,6	Meteora A	278,1	179,5	97,0	413,4	Tsaritsani	156,8	199,4	104,0	253,3
Elati C	473,1	300,8	109,7	622,4	Meteora B	245,0	152,2	74,8	385,6	Vakhari	586,4	314,1	103,2	963,8
Evanyielismos	232,8	108,1	87,5	212,6	Metsovon	452,5	443,4	134,4	706,8	Vathilakkos	382,5	251,0	79,8	498,6
Farkadhon A	16,9	93,1	72,8	166,8	Molokha	498,8	221,7	118,9	732,2	Vathirema	723,5	316,9	113,5	962,7
Farkadhon B	179,4	126,4	80,9	254,2	Morfovouni	437,9	265,0	211,9	676,8	Verdhikoussa	277,6	246,5	124,1	371,7
Farsala A	15[illegible]	106,2	83,5	213,3	Moukha	340,7	278,6	88,1	632,1	Volos	139,6	98,6	63,4	196,4
Farsala B	162,3	135,2	57,8	206,5	Mouzaki	365,1	227,4	87,8	721,8	Yannota	164,4	147,3	107,1	224,6
Fourna A	301,9	252,7	40,2	480,7	Paleokhori	431,9	241,9	94,3	754,0	Zappion	177,8	134,0	59,5	248,5

7.5.5. Recherche d'une corrélation permettant d'extrapoler les résultats de mesures de températures à l'ensemble de la région

En Thessalie, les mesures de température de l'air dont j'ai eu les résultats portaient sur les stations suivantes (dont certaines sont d'ailleurs situées hors de la région, mais à proximité) :

	Station	Altitude (m)
1.	Volos	02
2.	Larissa	74
3.	Trikala	113
4.	Farsala	140
5.	Ayia	180
6.	Kalambaka	240
7.	Pefkofiton	690
8.	Pramanda	835
9.	Kranea	952
10.	Aspropotamos	1050
11.	Fourna	1067
12.	Metsovon	1150

Ces stations sont trop peu nombreuses pour que l'établissement de cartes d'isothermes à l'échelle de travail retenue (1/50 000 ou 1/100 000) ait une signification.

TABLEAU 7.5.5.a

Recherche de corrélation entre température et quantité totale de précipitations

Station de Larissa
altitude 74 m
30 années de mesures

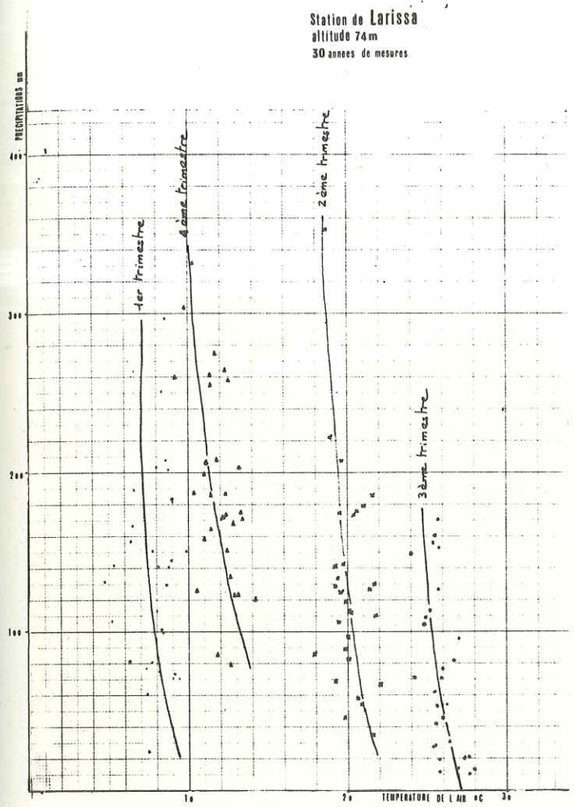


TABLEAU 7.5.5.b

Recherche de corrélation entre température et quantité totale de précipitations

Station de Volos
altitude 2 m
39 années de mesures

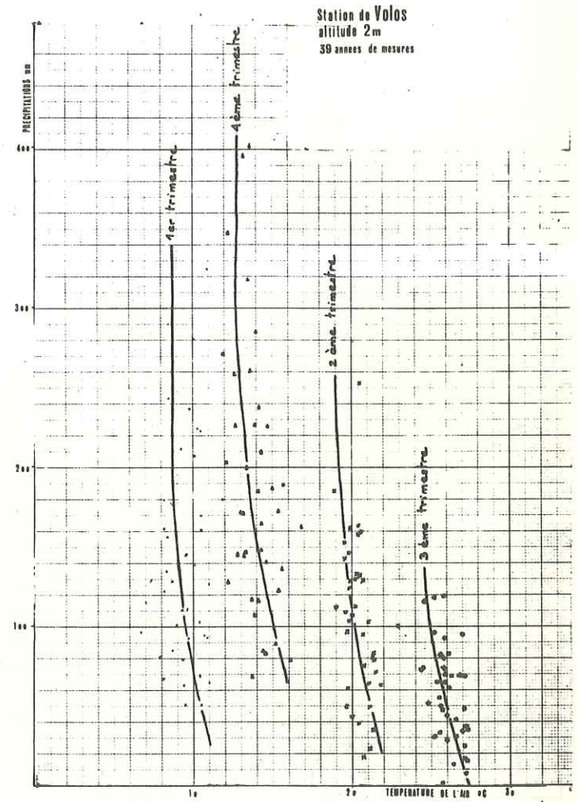


TABLEAU 7.5.c

Température de l'air
Corrélation avec l'altitude

Courbes des moyennes homogénéisées sur Larissa Trikala et Volos

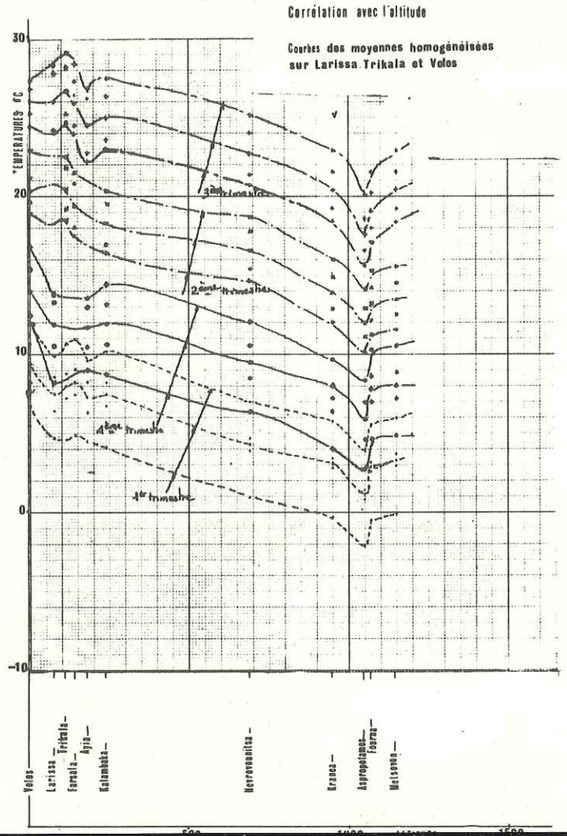


TABLEAU 7.5.5.d

Température de l'air
Corrélation avec l'altitude

Courbes 1er trimestre

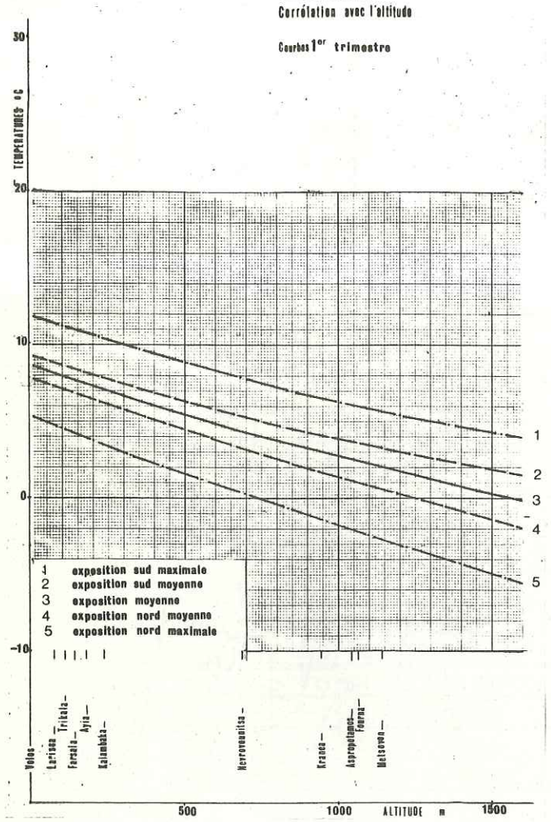


TABLEAU 7.5.5.e

Température de l'air
Corrélation avec l'altitude

Courbes 2ème trimestre

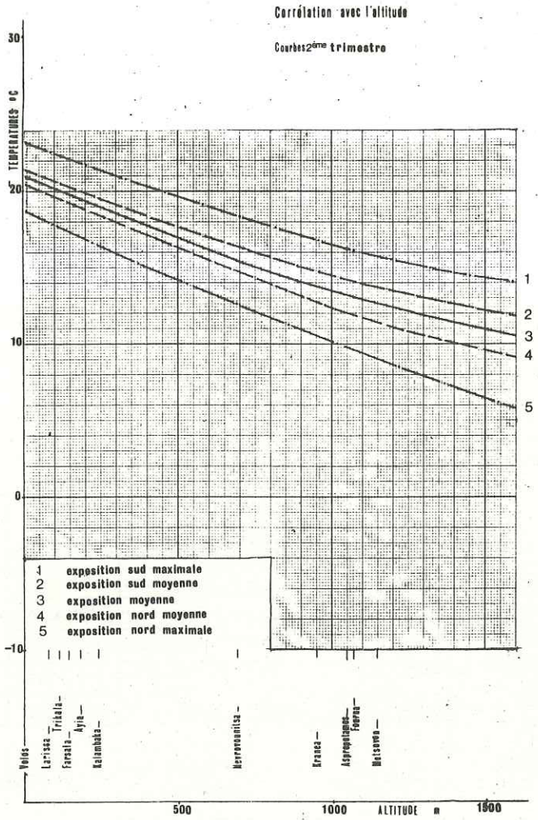


TABLEAU 7.5.5.f

Température de l'air
Corrélation avec l'altitude

Courbes 3ème trimestre

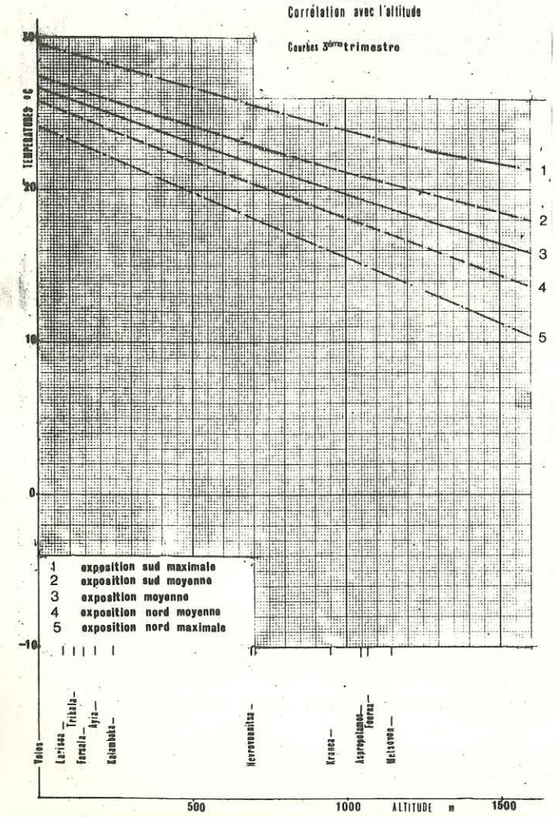
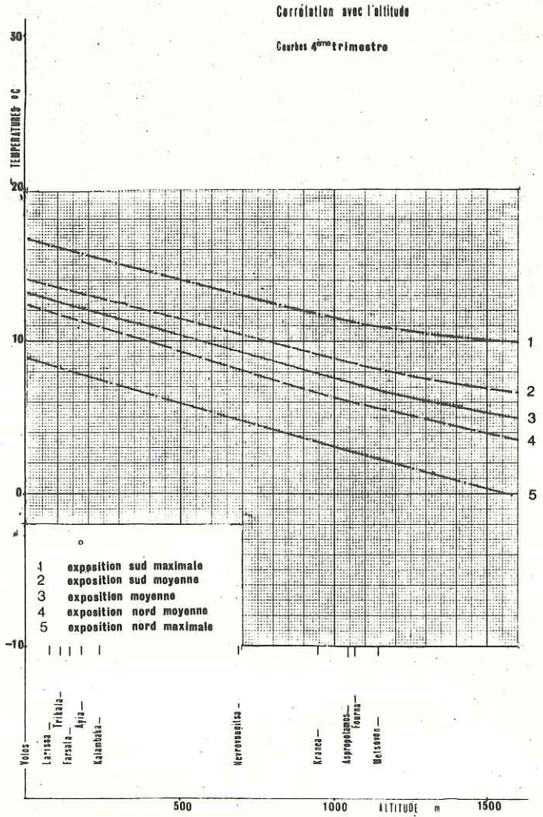


TABLEAU 7.5.5.g

Température de l'air
Corrélation avec l'altitude

Courbes 4ème trimestre



Examinons pour chacune de ces stations, s'il est possible d'établir des relations entre température de l'air et quantités totales de précipitations, selon la procédure indiquée en 3.6.2.

Pour ce faire, j'ai reporté sur les diagrammes des tableaux 7.5.5 a et 7.5.5 b les points dont les abscisses sont les températures et les ordonnées sont les précipitations, pour les stations de Volos et de Trikala.

Ces diagrammes permettent de tracer des courbes de correspondance statistique pour chaque pas de temps trimestriel. En principe donc, on pourrait utiliser ces courbes pour essayer de définir des zones de validité de ces lois de correspondance. Mais, outre que cette procédure risque de faire apparaître des difficultés pour délimiter les zones, l'examen des diagrammes montre qu'elle ne serait guère significative.

En effet, les nuages de points expérimentaux sont assez flous et cette dispersion cause une grande imprécision dans les lois de correspondance symbolisées par les courbes des diagrammes. Si l'on ajoute que les deux stations sur lesquelles ces diagrammes ont été établis sont parmi les trois pour lesquelles nous avons beaucoup d'années de mesure, on voit que la procédure indiquée en 3.6.2. devient illusoire. Une autre possibilité serait de rechercher une correspondance entre stations en fonction de l'altitude, car il apparaît que ces stations sont correctement réparties à ce point de vue.

Pour ce faire, nous sommes obligés de procéder à une homogénéisation des moyennes expérimentales, en recherchant la différence entre les moyennes calculées pour les années de mesure communes à la station considérée et à la station de base la plus proche (Larissa, Trikala ou Volos, selon le cas). Puis il faut appliquer cette différence à la moyenne calculée pour le plus grand nombre possible d'années de mesures à la station de base.

Cette procédure nous amène à un premier diagramme (tableau 7.5.5 c) où sont représentées les températures moyennes homogénéisées des stations en fonction de l'altitude. J'ai représenté sur ce diagramme la courbe moyenne et les courbes enveloppes pour chaque pas de temps trimestriel. Il apparaît des irrégularités sur ces courbes, dans les franges 50-250 mètres et 1000-1 100 mètres.

Ces irrégularités sont dues aux stations de Larissa et Trikala, seules stations situées au milieu des plaines, pour la première frange d'irrégularité, et à la station d'Aspropotamos située hors de la région mais à proximité immédiate pour la seconde frange d'irrégularité.

Si nous considérons l'exposition de chacune des stations de mesure, nous arrivons à déterminer graphiquement pour chaque pas de temps trimestriel des courbes (tableaux 7.5.5 d, 7.5.5 e, 7.5.5 f, et 7.5.5 g) exprimant :

1°/ la loi moyenne de correspondance;
2°/ la loi pour les versants abrités et adrets (Metsovon, Fourna) et pour les bords de mer (Volos) ;
3°/ la loi pour les versants exposés et ubacs (Aspropotamos, par exemple), et les plaines exposées aux vents (Larissa, Trikala) ;
4°/ et 5°/ les enveloppes des points extrêmes.

Il s'avère donc possible, en Thessalie, d'attribuer une valeur représentative de la température à chaque aire élémentaire, en fonction de son altitude et de son exposition. Ces lois de correspondance ne sont probablement pas plus ni moins imprécises que celles que l'on aurait éventuellement pu établir en utilisant la procédure indiquée en 3.6.2. Mais la procédure actuelle est plus commode.

Elle est d'autre part de transposition aisée pour l'ordinateur.

La précision peut être accrue considérablement en multipliant le nombre de stations de mesures de la température comme proposé en 7.5.2 ci-dessus.

7.5.6. Examen de la signification de l'indice climatologique

Nous avons vu en 7.5.2 que les lacunes dans les mesures des facteurs climatologiques agissants étaient trop importantes pour qu'il soit possible d'évaluer l'indice climatologique selon la procédure indiquée dans le tableau du paragraphe 3.7.

On peut se demander cependant si l'introduction d'un tel indice dans le calcul est réellement nécessaire. On pourrait admettre que les deux facteurs utiles variables avec le temps, quantité totale de précipitations et température de l'air représentent implicitement tous les autres facteurs climatologiques agissants.

La tentative avortée de définir la température de l'air à partir de la quantité totale des précipitations au moyen de relations statistiques montrent que les phénomènes climatiques ne sont pas simples et que l'intervention des autres éléments du climat - représentés par les facteurs agissants retenus en 3.6 - empêche la définition d'une relation univoque entre températures et précipitations.

La nécessité d'une symbolisation du caractère climatique par un indice climatique qui représenterait selon une échelle à définir pour chaque région des associations fréquentes de valeurs des facteurs agissants peut être établie plus nettement si l'on compare les nombres de jours de précipitations en plusieurs stations de Thessalie.

J'ai pu rassembler après mon départ de Grèce quelques données à ce sujet relatives aux stations d'Almiros, Dhomokos, Kalambaka, Larissa et Volos pour un nombre variable d'années allant de 1904 à 1926. Ces données sont récapitulées dans le tableau 7.5.6 et il est intéressant de les comparer.

Tableau 7 5 6: Nombre de jours de precipitations par trimestre

station	ALMYROS				DHOMOKOS				KALAMBAKA				LARISSA				TRIKALA				VOLOS			
trimestre	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1904													26	26	18	26	45	36	27	46	25	17	a	29
1905													22	26	13	20	44	38	16	36	34	22	6	17
1906													31	28	8	28					20	26	9	17
1907													26	21	14	19	39	16	6	20				
1908													24	23	17	35	32	20	10	34	18	9	11	32
1909													31	18	7	28	36	20	6	26	20	10	8	20
1910					27	17	11	25					29	24	10	25	28	28	13	29	34	17	11	20
1911					20	20	07	15					23	19	16	20	31	31	22	26				
1912					14	24	4	22					21	30	14	28					15	16	13	28
1913													33	21	13	18	24	22	21	23				
1914					17	14	10	23					24	24	12	24	27	28	22	24				
1915	30	15	3	21					37	31	17	30	32	33	18	27	37	42	19	42				
1916	22	16	8	33					21	12	14	30									17	14	18	33
1917									36	26	2	33					39	30	6	39	23	23	1	28
1918					7	14	5	32	17	30	4	32	21	29	8	36	21	31	8	43	25	31	5	38
1919	30	15	3	21	26	20	5	22	39	33	11	39	49	42	10	46	51	34	12	50	50	33	8	35
1920	21	16	8	33	14	22	10	38	19	39	15	51	28	35	15	53	36	43	13	56	35	37	13	49
1921	16	19	10	29					26	32	13	34	26	47	19	37	29	39	20	42	21	34	12	39
1922	29	14	4	23					33	6	6	26	40	25	13	41	45	26	12	49	35	22	10	32
1923					18	19	4	16	35	15	5	29	40	33	15	31	45	29	11	31	41	32	12	90
1924					25	10	3	22	39	28	17	37	44	25	15	41	42	29	13	44	46	22	12	46
1925									18	30	8	27	24	32	10	28	30	34	7	39	25	25	6	26
1926									27	21	6	24	33	17	9	20	38	25	16	28	39	20	12	23

Cette comparaison montre que même pour deux stations voisines comme Almiros et Volos ou Trikala et Kalambaka, le nombre de jours de pluie varie notablement, et ce différemment selon le pas de temps considéré. Si l'on compare de plus ces totaux aux quantités de précipitations, on voit que les intensités de précipitations sont très différentes dans ces stations (se reporter pour cela au tableau des valeurs saisonnières, au paragraphe 7.5.5). A titre d'exemple, il pleut moins à Volos et en plus de jours de pluie qu'à Almiros durant les 4 pas de temps, mais les proportions diffèrent d'un pas de temps à l'autre.

Il est donc nécessaire de caractériser les aires élémentaires non seulement par la quantité globale de précipitations, mais par un symbole aussi simple que possible indiquant :

- la manière dont ces précipitations ont lieu, leur répartition en pluie ou neige, l'intensité moyenne de ces types de précipitations ;
- les raisons pour lesquelles d'une station à l'autre, à altitude égale il se peut que les températures de l'air diffèrent (humidité de l'atmosphère, nébulosité, agitation de l'atmosphère).

Ceci nous ramène donc à la nécessité d'un indice climatique. Ceci n'a pas été tenté lors de l'étude réelle, mais si la méthode actuelle avait été conçue, une première tentative aurait été possible, sans mesures complémentaires, par prise en compte de toutes les données disponibles sur le nombre de jours de pluie pour toutes les stations de la région. On aurait pu ainsi obtenir une première subdivision de la Thessalie en zones climatiques caractérisées par des valeurs moyennes de l'intensité de précipitations globales, et admettre que ces valeurs moyennes représentaient une première échelle d'indice climatologique. Cette première subdivision ne pouvait être qu'approximative car les données qui auraient permis d'étudier les relations entre définition de l'indice climatologique et les facteurs agissants étaient trop peu nombreuses.

Ceci me permet de justifier la proposition faite en 7,5.2 d'installation d'une dizaine de stations de mesure des facteurs agissants dans une région comme la Thessalie. Un an de mesures simultanées en ces stations des facteurs agissants, des facteurs utiles et du nombre de jours de précipitations permettrait déjà vraisemblablement d'établir des lois de relations entre facteurs agissants et nombre de jours de pluie, de mieux déterminer la validité d'un indice climatologique basé sur le rapport de la quantité globale de précipitations et du nombre de jours de précipitations, et éventuellement d'adapter cette définition de l'indice climatologique selon certains éléments physiques connus (altitude, exposition, par exemple). On pourrait alors attribuer à chaque station pluviométrique classique une valeur de l'indice climatologique ainsi défini et adapté, et établir des cartes de subdivision de la région en zones de même indice climatologique. Si les mesures pouvaient s'étendre sur deux ans et plus, les relations seraient plus justifiées, évidemment et il est certain que ceci pourra être repris et précisé lors d'une étude d'avant-projet.

Ceci n'a pas été fait pour la Thessalie et la validité du processus décrit ci-dessus reste encore hypothétique. Ce contrôle devrait faire l'objet de recherches climatologiques plus poussées mais m'entraînerait trop loin hors de mon sujet. S'il s'avère que ce processus n'est pas valable, après vérification expérimentale, je pense qu'il serait quand même possible de définir un indice climatologique valable, par une autre méthode, et qui représentera par un symbole simple le caractère climatique d'une zone.

CHAPITRE 8

PASSAGE DE L'IMAGE ANALYTIQUE DE LA REGION A LA SIMULATION DE BILANS

8.1. L'image analytique de la région

Dans les chapitres 5.6 et 7 j'ai examiné dans quelle mesure les données disponibles lors de l'étude réelle et celles que j'ai rassemblées par la suite permettaient de construire l'image analytique de la Thessalie selon le schéma préconisé dans la première partie (chapitres 1.2 et 3).

Je suis arrivé sans difficultés à définir une subdivision valable de la région en B.V.U.

La définition des aires élémentaires a été plus approximative. Je me suis attaché à l'analyse des données existantes sur les bassins de Dheskati et Valanidha (exemple de base) et ai pu subdiviser les B.V.U. qui constituent cette partie de la région en aires élémentaires. Durant cette délimitation des aires élémentaires, j'ai mis en évidence les imperfections et les lacunes dans l'information. J'en ai déduit les imprécisions et les doutes qui en résultaient quant à la représentativité des aires élémentaires. Devant ce degré d'approximation résultant, qui pouvait paraître excessif, je n'ai pas effectué la délimitation des aires élémentaires pour l'ensemble de la Thessalie. Je me suis borné à indiquer que la procédure appliquée à l'exemple de base pouvait être étendue à toute la région avec le même risque d'imprécisions.

J'ai ensuite examiné s'il était possible d'affecter à chacune des aires élémentaires ainsi définissables, pour imparfaites qu'elles fussent, des valeurs des facteurs utiles constants et variables.

L'attribution aux aires élémentaires de valeurs des facteurs topographiques utiles ne présentait pas de difficultés notables. J'ai en particulier établi une carte des pentes au 1/50 000 de la région par des procédés manuels et visuels. On peut la considérer comme relativement valable malgré son imprécision et un certain manque de fidélité dans l'appréciation visuelle des critères de délimitation. Il est d'ailleurs facile d'éviter ces défauts en employant une procédure graphique automatique. Je ne me suis pas attardé sur la détermination de la densité linéaire du réseau hydrographique, qui peut se faire par des procédés graphiques automatiques de même genre.

J'ai pu ensuite définir des valeurs d'indices géologiques approximatifs relatifs à des tranches superficielles, phréatiques et profondes dont la délimitation a présenté un certain nombre de difficultés et d'approximations. A cette occasion, j'ai proposé une simplification de la définition des tranches géologiques successives. Les échelles d'indices ainsi définies sont très imparfaites. Les relations entre caractères géologiques agissant sur le bilan et indices ont été établies de manière très qualitatives. Rien n'indique que les terrains affectés d'un même indice auront des réactions assez uniformes vis-à-vis de l'eau pour qu'un calcul de bilan basé sur ces indices soit suffisamment précis. Rien ne permet d'espérer non plus que les indices successifs relatifs à une même catégorie de terrains (roches meubles ou roches dures) représentent des ensembles adjacents de caractères géologiques et sans intersections excessives à leurs limites de définition. Il se peut de plus qu'il y ait une disparité importante dans la taille des divers ensembles de caractères géologiques. Malgré ces défauts, j'ai pu subdiviser l'ensemble de la région en zones caractérisées par des indices géologiques superficiels, phréatiques et profonds.

A ce sujet, remarquons que dans les roches dures, les indices géologiques superficiels et phréatiques sont les mêmes. Il leur correspondra des effets différents en ce qui concerne le comportement de l'eau.

Je ne me suis pas apesanti sur la détermination des indices agronomiques, affaire de spécialistes, et me suis borné à indiquer que les données à disposition pour la Thessalie auraient permis de définir une échelle d'indices agronomiques pas plus imprécise que les échelles d'indices géologiques et de les attribuer à des zones distinctes de la région.

En ce qui concerne les facteurs utiles hydrogéologiques, je n'ai pas pu définir les niveaux piézométriques des diverses nappes profondes, en raison de lacunes dans l'information dont je disposais. Pourtant,

il aurait été possible de le faire, au moyen de procédures automatiques de traitement des informations relatives aux puits d'exploitation très nombreux qui existent en Thessalie. Nous pouvons donc considérer que ces facteurs utiles étaient pratiquement déterminables.

Enfin, j'ai établi des cartes d'isohyètes pour chaque trimestre du cycle annuel, représentant les valeurs moyennes des précipitations, calculées pour une période de référence de plus de 50 ans. J'ai aussi calculé la variation statistique de ces précipitations, qui se traduit ici par un écart-type moyen. J'ai établi des lois de variation approximatives de la température de l'air en fonction de l'altitude et de l'exposition moyenne des aires considérées. Malheureusement je n'ai pas pu définir les indices climatiques, en raison du manque d'informations météorologiques. Je suis cependant persuadé que ceci aurait été possible, avec une certaine approximation en basant cette tentative sur le nombre de jours de pluie et les quantités globales de précipitation, ainsi que sur les rares mesures d'humidité de l'atmosphère, de température du sol et des vitesses et direction du vent qui ont été faites.

Nous pouvons donc admettre que grosso modo, il était possible d'esquisser une image analytique de la Thessalie. Cette image aurait présenté de graves défauts, dont on peut se demander s'ils n'auraient pas rendu illusoires les simulations de bilans éventuels qui en auraient été déduites.

Mais en contrepoint de cette tentative de représentation analytique de la Thessalie, j'ai examiné comment il aurait été possible de combler les lacunes dans l'information et le traitement des données. Je suis arrivé à la conclusion rassurante que moyennant la mise en oeuvre de technique classique de reconnaissances durant un délai n'excédant pas deux ans, moyennant un traitement automatique systématisé de l'information qui en aurait résulté, et moyennant un investissement de l'ordre du triple de celui qui a été nécessaire pour la partie correspondante de l'étude réelle, il aurait été possible de construire une image analytique de la région suffisamment fine pour que l'on puisse passer de cette image à des simulations de bilan satisfaisantes. Cette conclusion me semble rassurante, en effet, car les simulations de bilan envisagées ici sont un outil autrement précis et sûr, et donc utile que les quelques bilans approximatifs que j'ai pu calculer pour un pas de temps annuel lors de l'étude réelle.

Il nous reste maintenant à examiner dans quelles conditions il aurait été possible de passer de l'image analytique de la Thessalie à des simulations de bilan, sur la base des données à disposition, et au prix de quels aménagements dans la recherche et dans le traitement de l'information ce passage aurait été possible dans des conditions de précision satisfaisantes.

8.2. Recherche des relations de correspondance entre facteurs utiles et termes du bilan

Nous avons vu au chapitre 4 que pour établir ces relations de correspondance il fallait disposer en principe des résultats d'expériences spécifiques effectuées dans la région en un certain nombre de stations appropriées. Ces stations expérimentales sont de quatre types, selon la localisation des termes du bilan :

- au-dessus de la surface du sol,
- dans la tranche superficielle,
- dans le réseau hydrographique,
- dans les tranches phréatiques et profondes.

L'étude réelle n'a pas été organisée en vue de la méthode globale actuellement étudiée. Par conséquent aucune station expérimentale du genre de celles qui ont été préconisées au chapitre 4 n'a été réalisée. Cependant, des expériences moins spécifiques ont peut être été effectuées en Thessalie. Moyennant certaines adaptations, leurs résultats seront peut-être utilisables pour établir des relations approximatives entre facteurs utiles et termes du bilan.

Examinons ceci plus en détail.

8.2.1. Termes du bilan localisés au-dessus de la surface du sol

Je n'ai eu connaissance d'aucun résultat d'essais effectués en Thessalie pour la mesure de l'interception verticale ou horizontale, ni à plus forte raison, d'essais tendant à établir les relations de correspondance entre ces termes et les facteurs utiles qui agissent sur eux : indice agronomique, indice climatique, quantité totale de précipitations et température de l'air.

Pour essayer de relier ces termes et ces facteurs utiles, la seule solution serait alors de procéder par extrapolation analogique à partir de recherches bibliographiques.

Les résultats expérimentaux cités par KITTREDGE (1948) et PENMAN (1963), par exemple, permet-

traient déjà d'établir des relations approximatives pour chaque pas de temps entre l'interception verticale et les facteurs utiles. Il serait cependant préférable de contrôler la validité de ces relations et éventuellement de les corriger, à l'aide d'expériences effectuées dans la région. Car la cause principale d'erreurs dans ces extrapolations analogiques souvent lointaines est que l'on aura quelques difficultés à mettre en parallèle dans la région de comparaison et en Thessalie les valeurs des indices agronomiques et climatiques. En première approximation, on peut cependant espérer établir des relations point trop éloignées de la réalité car l'interception verticale sera toujours comprise entre zéro et un certain pourcentage des précipitations.

En ce qui concerne l'interception horizontale, ceci n'est plus possible. En effet, il n'y a pratiquement pas de relation entre elle et la quantité totale de précipitations. Les expériences de NAGEL (1956) effectuées sur Table Mountain, près du Cap en Afrique du Sud, montrent que l'interception horizontale serait de plusieurs fois supérieure aux précipitations. Ce terme est directement fonction de la nébulosité, de l'agitation de l'atmosphère et de la température de l'air.

En principe les deux premiers de ces facteurs agissants sont pris en compte dans l'indice climatique. Mais nous venons de voir que pour la Thessalie, cet indice ne peut être défini qu'à l'aide des jours de pluie, et de rares mesures de l'humidité de l'air, de l'agitation de l'atmosphère. Nous ne disposons d'aucune mesure de nébulosité en Thessalie. Il devient donc impossible de mettre en parallèle des résultats expérimentaux relatifs à d'autres régions et à la Thessalie, car l'analogie des facteurs utiles, essentiellement climatiques, entre les régions choisies comme bases de comparaison et la Thessalie serait très difficile à établir.

Pour obtenir des relations valables entre interception verticale et horizontale et facteurs utiles, il aurait été indispensable d'installer dans la région quelques stations de mesure de ces deux termes et des facteurs agissants et utiles. Ceci aurait permis d'ailleurs de s'appuyer avec plus de certitude sur des expériences effectuées par ailleurs.

Pour obtenir une sécurité satisfaisante, il me semble que 5 stations de mesures auraient suffi, ce qui aurait constitué un investissement raisonnable.

Ces stations auraient pu être distribuées comme suit :

- une station dans le Pinde (B.V.U. 00010, par exemple) ;
- une station dans les forêts de Antikhassia (B.V.U. 00030, par exemple) ;
- une station à proximité de Trikala ;
- une station à proximité de Larissa ;
- une station dans les montagnes dénudées du Nord de la Thessalie (B.V.U. 060-10, par exemple).

De cette manière on aurait pu établir des relations assez valables entre interception verticale et horizontale et facteurs utiles. Comme nous le verrons plus loin à propos des calculs de réglage il est indispensable de limiter au maximum les incertitudes sur la valeur des cœfficients dans les relations de correspondance.

En effet, ceci doit permettre de limiter aussi le risque de concordance entre termes mesurés aux points de contrôle pour des valeurs erronées des cœfficients. Il existe de nombreuses expériences relatives à l'interception, de par le monde. A l'aide des 5 stations proposées et des résultats de ces expériences, on peut être raisonnablement certain d'aboutir à des relations de correspondance valables entre ces termes et les facteurs utiles correspondants. Dans ces conditions, il ne sera donc pas nécessaire d'ajuster ces cœfficients lors du calcul de réglage.

Je n'insisterai pas plus avant sur ce sujet qui sort nettement du cadre de la géologie.

8.2.2. Termes du bilan localisés dans la tranche superficielle

Ces termes sont les suivants : ruissellement direct, rétention, infiltration directe. Comme l'introduction de la rétention en tant que terme du bilan résulte de l'élaboration de la méthode globale étudiée ici, il n'y a guère de résultats expérimentaux utilisables en Thessalie. Je dois citer cependant trente essais d'absorption d'eau par le sol effectués par le Service des Améliorations Foncières du Ministère de l'Agriculture dans la partie sud est de la Thessalie occidentale (B.V.U. 255-10).

Lors de l'étude réelle, j'ai utilisé les résultats de ces essais pour relier un cœfficient d'alimentation des eaux souterraines par les précipitations aux mesures de résistivités superficielles. Mais lors de ce calcul du bilan, je ne tenais pas compte de la rétention et, rappelons-le, le pas de temps était l'année.

On pourrait cependant envisager de reprendre cet essai d'utilisation en tenant compte de l'organigramme du bilan élémentaire adopté (tableau 2.1). Mais ceci serait assez hasardeux et il est probable que les cœfficients de répartition des eaux arrivant au sol en ruissellement direct, rétention et infiltration directe seraient très sujets à caution. Je n'ai pas jugé utile de tenter l'expérience.

On pourrait chercher à comparer les résultats d'expériences effectuées dans d'autres régions, où l'on peut déterminer les facteurs utiles (indices géologiques superficiels et phréatiques, pente moyenne, densité du réseau hydrographique, indice agronomique, indice climatique, quantité totale des précipitations et température de l'air) selon les mêmes règles que pour la Thessalie, avec la Thessalie elle-même. Il faudrait pour cela reprendre en considération les résultats bruts des expérimentations sur cases lysimétriques effectuées de par le monde (Californie et Colorado, aux U.S.A.). On pourrait alors établir des relations approximativement extrapolables à la Thessalie. Mais pour que ces extrapolations soient moins hasardeuses, il faudrait effectuer des expériences dans la région elle-même.

On pourrait envisager une procédure analogue en ce qui concerne les affleurements rocheux et en particulier réexaminer les résultats bruts des expériences de BURDON et PAPAKIS (1961) effectuées en Grèce dans le massif du Parnasse Ghiona, à 150 km au Sud de la Thessalie. Mais ici aussi il est nécessaire de procéder à des expériences dans la région elle-même.

Il me semble que l'on pourrait obtenir des résultats suffisants pour que les valeurs des cœfficients de relation entre termes et facteurs utiles ne soient pas trop loin des valeurs réelles, en disposant une station expérimentale en chacun des emplacements suivants :

a) terrains meubles :
- terrain grossier nu, plat (pente 0-2 %),
- terrain sableux nu, plat (pente 0-2 %),
- terrain sableux avec végétation, plat (pente 0-2 %),
- terrain argileux nu, plat (pente 0-2 %),
- terrain argileux nu, en pente (pente 12-20 %),
- terrain argileux avec végétation, plat (pente 0-2 %).

b) terrains rocheux :
- terrain karstique nu, plat (pente 0-2 %),
- terrain karstique nu, en pente (pente 20-40 %),
- terrain gneissique nu, plat (pente 0-2 %),
- terrain gneissique nu, en pente (pente 20-40 %),
- terrain marno-gréseux nu, plat (pente 0-2 %),
- terrain marno-gréseux nu, en pente (pente 20-40 %).

Soit douze cellules expérimentales.

Le coût de ces stations expérimentales est loin d'être négligeable, mais il est faible par rapport à celui des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et des mesures climatologiques proposées par ailleurs et que ces stations permettront d'utiliser au mieux.

On peut cependant se demander si l'exécution de telles cellules expérimentales n'est pas un investissement excessif par rapport au but recherché. Même avec les résultats de ces mesures pendant un an, voire deux, les valeurs des cœfficients de corrélation entre termes du bilan dans la tranche superficielle et facteurs utiles seront approximatifs. Ils sont en tous cas parmi ceux qui devront être ajustés lors des calculs de réglage. Alors, on peut se demander si cela vaut vraiment la peine de mettre en place puis d'exploiter pendant un an ou deux de telles stations.

Un examen plus attentif du problème amène à répondre par l'affirmative à cette question. En effet, même si les ajustements ne seront nécessaires que pour les cœfficients des relations de correspondance relatives à la tranche superficielle (et nous verrons ci-dessous que ce n'est pas le cas) il y aura beaucoup trop de cœfficients en jeu pour que nous acceptions d'effectuer le réglage à partir de premières valeurs intuitives de ces cœfficients. Si nous admettons que toutes les relations sont de proportionnalité nous aurons 24 cœfficients de relation entre les 3 termes et les 8 facteurs utiles. Il faut donc que les valeurs originellement adoptées soient plausibles, et donc étayées sur des résultats expérimentaux pour que les ajustements soient de faible amplitude. On peut ainsi limiter le risque d'erreurs en fin de réglage.

D'autre part, les mesures devront être poursuivies au-delà de l'année ou des deux années d'expérience pour la phase d'étude préliminaire. En effet, cette continuation des mesures permettra d'améliorer la définition des premières valeurs des cœfficients de relation pour les phases ultérieures d'étude et pour l'utilisation des modèles de simulation du bilan en cours d'exploitation.

J'ajouterai que l'intérêt des résultats des mesures effectuées sur de telles cellules dépasse nettement le cadre de la région en cours d'étude et qu'ils devraient être publiés, ou mieux, stockés dans une banque internationale de données, de manière à être utiles aussi dans d'autres régions, par extrapolation analogique. Cette généralisation de l'information aurait pour conséquence une meilleure rentabilité des expériences.

8.2.3. Termes du bilan situés dans le réseau hydrographique

Ces termes sont l'évaporation des eaux du ruissellement, l'infiltration des eaux du ruissellement et les eaux superficielles. Il faut y ajouter les termes de prélèvements et rejets dans le réseau hydrographique, qui seront des données résultant d'une enquête lors des calculs de réglage effectués dans l'état actuel de la région et des paramètres pour les calculs prospectifs. Les facteurs utiles qui agissent sur ces termes sont les suivants :

pente moyenne, densité linéaire du réseau hydrographique, indices géologiques superficiels et phréatiques, indice agronomique, indice climatique, quantité totale des précipitations et température de l'air.

Il n'existait en Thessalie lors de l'étude réelle aucune station expérimentale du genre de celles qui sont préconisées au chapitre 4 (point 4.2.4). On pourrait essayer de combler cette lacune selon un procédé analogue à celui qui a été indiqué au sujet des termes du bilan localisés dans la tranche superficielle. On peut essayer d'appliquer par extrapolation des relations établies sur d'autres bassins versants expérimentaux (L. SERRA - 1960, SODEMANN et TYSINGER, 1965), mais ceci sera très approximatif, en l'absence d'expériences dans la région.

Par conséquent il faudrait que quelques petits bassins versants expérimentaux soient équipés selon le schéma indiqué en 4.2.4. Comme il existe des relations étroites entre termes du bilan localisés dans la tranche superficielle et dans le réseau hydrographique, il sera préférable de placer ces bassins versants expérimentaux de manière à ce que les stations expérimentales relatives à la tranche superficielle se trouvent à l'intérieur de ces bassins versants d'essai. Ceci se ramène à l'adjonction à proximité de chacune des 12 stations proposées en Thessalie, une station limnigraphique et un bac à évaporation.

On peut même, par souci d'homogénéité, leur adjoindre des dispositifs de mesure de l'interception horizontale et verticale. Ceci permettrait d'améliorer les relations entre termes du bilan et facteurs utiles au-dessus de la surface du sol en basant leur recherche sur 12 stations et non plus 5 - Voir point 8.2.1 .

La nécessité de l'investissement que représentent ces installations se justifie de la même manière que celles qui sont préconisées pour la tranche superficielle. En effet, le nombre de cœfficients de relation qui entreront en jeu ici sera important. Il est donc indispensable de commencer le calcul de réglage avec des valeurs déjà assez correctes de ces cœfficients, si l'on veut éviter le risque de divergence en cours de réglage :

on peut définir cette divergence comme le fait d'aboutir à une bonne concordance entre bilans calculés et mesurés à des points de contrôle successifs, pour des ensembles différents de valeurs des cœfficients de relation, donc aucun ne représenterait les relations réelles .

8.2.4. Termes du bilan situés dans les tranches phréatiques et profondes

Ce sont les termes d'eaux souterraines auxquels il faut ajouter ceux de prélèvements et rejets dans les eaux souterraines. Les facteurs utiles sont les suivants :

indice géologique phréatique, et indices géologiques profonds, niveaux piézométriques de nappe.

Les relations entre termes du bilan et facteurs utiles peuvent être établies en première approximation en utilisant les lois générales de l'hydrogéologie (formules de THEYS, DUPUIT, etc...). Ceci à condition de relier les indices géologiques et les facteurs pris en compte dans ces formules (perméabilité, transmissivité, etc...). Il est cependant nécessaire dès l'étude préliminaire, d'étayer ces évaluations sur des bases expérimentales propres à la Thessalie, pour des raisons analogues à celles qui ont été indiquées au sujet de

la tranche superficielle. Nous avons vu au chapitre 7 qu'il existe déjà une énorme masse de données sur les puits existant en Thessalie. Mais nous avons vu aussi que ces données étaient hétérogènes et de valeur douteuse. L'exécution de 6 à 8 puits de contrôle de la valeur de ces données a été proposée au point 7.3.1.

Ces puits de contrôle serviraient aussi pour la recherche des cœfficients de relation entre termes du bilan et facteurs utiles. Ce nombre devrait d'ailleurs être accru lors de chacune des phases ultérieures de l'étude, afin d'obtenir une finesse plus grande de définition des images de simulation régionale ou subrégionale.

Pour terminer ce paragraphe, j'indiquerai que depuis mon départ de Grèce, un certain nombre de puits d'essai ont été forés par l'Institut de Géologie et de Subsurface (IGSR). Les résultats d'essais de pompage sur ces puits auraient été utiles pour la recherche des cœfficients de relation entre termes du bilan et facteurs utiles. Malheureusement ces expériences ont été concentrées sur la Thessalie occidentale (région de Kalambaka - Trikala - Kardhitsa). D'autre part elles n'ont pas, et pour cause, été envisagées dans l'optique d'une application de la méthode globale étudiée ici.

8.2.5. Commentaires

Même si l'on envisageait d'utiliser l'image analytique approximative de la Thessalie dont nous avons vu qu'elle pouvait être définie sur la base des données existantes lors de l'étude réelle (ou rassemblées par la suite), la première transformation de cette image analytique en simulation du bilan serait essentiellement basée sur des corrélations qualitatives et des raisonnements abstraits. Les premières valeurs des cœfficients de relation entre termes du bilan et facteurs utiles seraient donc trop aléatoires pour qu'on n'ait pas un risque important de divergence lors du réglage.

Il aurait pourtant été tout à fait possible de combler cette lacune. Pour cela il aurait fallu mettre en place une douzaine de stations expérimentales dans lesquelles on aurait étudié simultanément les termes du bilan et les facteurs utiles au-dessus de la surface du sol, dans la tranche superficielle et dans le réseau hydrographique de petits bassins versants pilotes. De plus, quelques puits d'essai auraient permis d'étudier le comportement de la tranche phréatique et des tranches profondes.

Ces expériences locales auraient permis d'utiliser les résultats d'autres expériences réalisées ailleurs, et de faire un choix parmi les données existant en Thessalie (production de puits en particulier).

Ces stations expérimentales auraient été indispensables pour que la méthode globale de calcul du bilan puisse être appliquée à la Thessalie avec succès.

Nous voyons donc que les bilans hydrologiques et hydrogéologiques que j'ai calculés lors de l'étude réelle ne peuvent être qu'une première approche : ce sont là des images trop floues de la région pour que les réglages soient absolument certains.

8.3. Les calculs de réglage

Nous avons donc examiné comment guider le choix des premières représentations chiffrées des termes du bilan élémentaire de chaque aire élémentaire dans les B.V.U. d'une région. Ce faisant, nous avons constaté les importantes lacunes expérimentales existant dans les données à disposition pour la Thessalie. Il nous reste maintenant à examiner sur quelles bases on aurait pu effectuer des calculs de réglage dans cette province et comment améliorer ces bases.

8.3.1. Données hydrologiques à disposition en Thessalie

Les stations de mesures limnimétriques de cours d'eau et de sources dont j'ai pu utiliser les résultats sont indiquées sur la planche n° 16 "Stations climatiques et hydrologiques".

Les mesures ont été effectuées à des périodes diverses par le Service Hydrologique du Ministère des Travaux Publics, comme il apparaît sur les tableaux 8.3.1 a et 8.3.1 b.

Tableau 8.3.1 a Stations limnimétriques [rivières] [voir pl n°16]

Riviere	Lieu	Annees de mesure
PINIOS	Sarakina	1951-66
PORTAIKOS	Pili	1960-66
PINIOS	Dhrosseron	1950-66
PLIOURIS	Mouzaki	1960-66
PLIOURIS	Magoula	1930-31
KARAMBALIS	Kardhitsa	1930-31
KALENDSIS	Kardhitsa	1930-31
SOFADITIS	Route Kardhitsa Kotseri	1930-31
SOFADITIS	Kedhros	1960-66
ORGONTINOS	Route Kardhitsa Kotseri	1930-31
FARSALITIS	Route Kardhitsa Kotseri	1930-31
LIPSIMOS	Ag Theodoros	1930-31
ENIPEFS	Kastraki	1960-66
TITARISSIOS	Messokhori	1961-66
PINIOS	Tembi	1950-66

Tableau 8.3.1 b Stations limnimétriques [sources] [voir pl n°16]

Source	Annees de mesure	Remarques
Mati Tirnavou	1932-33, 1951-53, 1958, 1960-66	Karst
Ayia Anna	1932-33, 1951, 1960-66	Karst
Ekkara	1960-66	Karst
Velesiotai	1960-66	Karst
Amouri	1932-33, 1960-66	Alluvions
Mati Kefalovrissou	1960-66	Karst
Metamorfosis	1963-65	Karst
Voula	1960-61	Karst
Kefalovrisson	1932-33	Alluvions
Anapodon	1932-33	
Mati Dhomokou	1960-66	Karst
Tambakos	1932-33, 1960-66	Karst
Mikrovouni	1960-61	Karst
Khtouri	1932-33, 1960-66	Karst
Velestinon	1960-66	Karst
Rimnion	1962-63, 1968	Karst
Kumerki	1960-61	

8.3.2. Commentaires

Pour les mesures des débits des cours d'eau, nous avons les résultats de 15 limnimètres, dont 8 n'ont été en service qu'en 1930-1931 et sur lesquels seules des mesures épisodiques ont été effectuées. Sur les 7 autres limnimètres, les mesures ont été quotidiennes pendant plusieurs années, les durées de mesure variant d'ailleurs d'une période à l'autre.

En ce qui concerne les sources, des mesures de débit ont été faites sur 17 d'entre elles à des périodes diverses. Ces mesures étaient effectuées une à deux fois par mois au mieux et plus souvent de manière épisodique.

De plus, certains limnimètres installés sont mal placés, en particulier celui de Kedhros, sur le Sofaditis, situé en un endroit tortueux, et en perpétuelle évolution du lit. Le zéro de ce limnimètre est d'ailleurs situé au-dessus du niveau d'étiage, ce qui fait que des débits notés comme égaux à zéro représentent en fait quelques centaines de litres par seconde. Certains limnimètres sont doublés de limnigraphes, mais je n'ai pas pu disposer de leurs résultats en temps utile pour l'étude actuelle.

Si l'on considère la disposition des stations de mesures, on voit que leur répartition permettrait des calculs de réglage déjà appréciables, à condition que les mesures aient été effectuées simultanément et de manière analogue en tous ces points. Or il n'en a rien été, ce qui diminue considérablement la valeur d'un éventuel calcul de réglage basé sur les données à disposition lors de l'étude réelle.

Il aurait donc été utile, dans le cas hypothétique d'une application de la méthode actuelle à la Thessalie, lors d'une étude préliminaire, d'effectuer des mesures hydrologiques quotidiennes, limnigraphiques si possible en tous les points de mesure indiqués dans les tableaux 8.3.1 a et 8.3.1 b ci-dessus, pendant 12 à 24 mois, en même temps que les mesures climatologiques et les expérimentations sur cellules d'essai préconisées plus haut.

Comme un certain nombre des stations limnimétriques indiquées dans les tableaux 8.3.1 a et 8.3.1 b sont, soit mal disposées (Kedhros, par exemple), soit ne sont plus en service, on aurait dû les réaménager correctement et les équiper de limnigraphes. On aurait pu aussi les installer de manière mieux adaptée à un calcul de réglage, et prévoir quelques stations complémentaires en des emplacements permettant d'évaluer les infiltrations du ruissellement.

A titre indicatif, une dizaine de stations limnigraphiques sur les cours d'eau, en plus des 15 stations citées dans le tableau 8.3.1 a auraient été nécessaires. En ce qui concerne les sources, chacune de celles

qui sont citées dans le tableau 8.3.1 b aurait dû être équipée d'un limnigraphe ; le même équipement aurait été nécessaire sur trois ou quatre sources complémentaires en particulier.

Mais aurait-il été possible d'équiper toutes ces stations limnigraphiques en Thessalie et de disposer des résultats de une à deux années de mesures pour une étude préliminaire ?

Ma réponse est affirmative, à condition d'éviter tous retards dans la livraison des limnigraphes. Ceci suppose que la collectivité qui envisage une étude préliminaire d'aménagement régional doit se préoccuper simultanément de la constitution d'un organisme d'étude - ou du choix d'un ingénieur-conseil qui tiendrait lieu d'organisme d'étude - et de la commande et de la livraison d'appareils de mesure hydrologique (limnigraphes pour la plupart) en nombre suffisant. Cette remarque est d'ailleurs valable aussi pour les appareils de mesures climatologiques. Quels que soient les emplacements ultérieurement choisis pour ces appareils, ils seront nécessaires. De même, la collectivité responsable doit se préoccuper de la formation homogène d'agents de mesure et d'exploitation des résultats qui gèreront ce matériel.

Dans ces conditions, et en supposant que la méthode de détermination du bilan est connue, il suffira de deux ou trois mois pour que l'organisme d'étude choisisse les emplacements et fasse mettre en place les dispositifs de mesure. Il est alors tout à fait possible de disposer des résultats de un à deux ans de mesures pour l'étude préliminaire.

Autre question, l'équipement de toutes ces stations de mesures hydrologiques - et climatologiques - est-il justifié économiquement ?

Ces stations de mesures seront utiles non seulement pour l'étude préliminaire, mais aussi lors des études d'avant-projet et de projet, puis durant l'exploitation, car elles seront une source de données indispensables aux calculs de prévision à court terme et d'adaptation de l'aménagement (management). Nous voyons que l'investissement est indispensable si l'on veut prévoir correctement l'évolution de la production agricole et agro-industrielle de la région. Je n'insisterai pas plus avant sur ce point qui est nettement extra-géologique.

CONCLUSION

Nous voici donc parvenus au terme de cette étude. Après le long exposé théorique de la première partie, après l'essai quelque peu décevant d'application pratique de la méthode ébauchée durant cette première partie au cas concret de la Thessalie, en Grèce, il est nécessaire de conclure. Et cette conclusion peut être envisagée comme la réponse à trois questions :

1°/ Quelles sont les idées maîtresses qui se dégagent de cette étude, quel est le squelette de la méthode ?

2°/ Comment organiser le rassemblement et le traitement des données de base dans une région "neuve", à étudier et où l'on veut utiliser la méthode globale objet de cette étude ?

3°/ Enfin, est-il vraiment nécessaire d'employer dès l'étude préliminaire une méthode aussi complexe, qui fait intervenir des programmes d'ordinateur pour la transformation des données brutes en données utiles homogènes, et qui ne peut être mise en œuvre qu'après le rassemblement d'une masse considérable d'information ? Ne pourrait-on se contenter de moyens plus approximatifs, moins élaborés, moins coûteux aussi ?

RESUME SCHEMATIQUE DE LA METHODE

Principe de base : la simulation du comportement de l'eau

Le terme de calcul de bilan implique une notion de comptabilité, qui est au fond impropre. La recherche entreprise nous amène à une méthode globale de simulation du comportement de l'eau dans une région, en fonction des aménagements de stockage, de prélèvement, d'utilisation et de rejet de l'eau qui peuvent y être envisagés techniquement. Si l'on voulait procéder à des comparaisons, c'est plutôt à des termes physiologiques qu'à des termes de comptabilité qu'il faudrait faire appel : squelette, musculature, parties du corps, cellules, système circulatoire, besoins pourraient être mis en parallèle avec structure géologique, formations meubles cénozoïques et quaternaires, B.V.U., aires élémentaires, réseau hydrographique, utilisations de l'eau, et ainsi de suite. Cette comparaison se révélerait d'ailleurs trompeuse, pour peu que l'on veuille la pousser trop avant.

Nécessité d'une schématisation

Qui dit simulation sous-entend schématisation. La nature d'une région est trop complexe, ses possibilités d'aménagement trop multiples ; l'évolution de la région dans le temps dépend de trop d'actions naturelles ou dues à l'intervention de l'homme, continues ou discontinues, dépendantes ou non les unes des autres, pour que l'on puisse espérer la représenter sans simplifications.

Dans la majorité des cas dont j'ai eu connaissance, on subdivise l'image de la région en autant d'images qu'il y a de disciplines, en les considérant comme indépendantes les unes des autres, puis on cherche à créer une image globale par superposition des images élémentaires élaborées indépendamment les unes des autres. On a ainsi des images séparées, pour la morphologie, la géologie, l'hydrologie de surface, l'hydrogéologie, la géographie humaine, la sociologie, l'économie, et que sais-je encore, qui sont construites sans la véritable osmose qui me paraît indispensable. Cette simplification est très approximative et n'a été justifiée dans le passé que par un argument négatif, il était impossible d'agir autrement. Expérience faite, ceci m'a paru trompeur et dangereux. La superposition d'images séparées ne permet pas une représentation dynamique de la région.

J'ai donc entrepris de ne rien laisser de côté a priori et suis arrivé, je crois, à une méthode pratique de simulation dynamique du comportement de l'eau dans une région directement associable à un modèle plus élaboré des productions, des organisations humaines et sociales et du comportement socio-économique de la région.

Cette simulation dynamique tient compte :

- des caractères physiques constants de la région (morphologie, géologie, caractères agronomiques et climatiques),
- des caractères physiques variables avec le temps (climat, végétation),
- des utilisations de l'eau par l'homme.

Une première simplification a consisté à transposer une réalité continue et multiple en une représentation par des éléments discontinus, nettement différenciés, et à remplacer l'évolution des phénomènes en fonction du temps, naturellement continue par une succession de valeurs caractérisant des intervalles de temps de grandeur finie.

Subdivision de la région en éléments

Ceci m'a amené à définir la région comme une somme de bassins versants hydrographiques juxtaposés mais non forcément situés sur le même réseau fluvial. Puis j'ai introduit le premier terme de subdivision de la région, selon des critères morphologiques et de finalité : le Bassin Versant Unitaire (B.V.U.) qui est un bassin versant hydrographique de dimensions suffisantes pour constituer une unité d'aménagement. On doit donc pouvoir envisager une série de simulations du comportement de l'eau pour chaque B.V.U. en fonction de sa situation propre, des échanges aux frontières avec les B.V.U. amont et aval, et d'un certain nombre d'hypothèses de base quant aux utilisations de l'eau par l'homme sur ce B.V.U. En particulier, tout bassin versant de site de barrage techniquement envisageable doit être considéré comme un B.V.U. ou un groupe de B.V.U. On passera à l'ensemble de la région par assemblage des diverses simulations possibles pour chaque B.V.U., dans des limites fixées par des conditions de compatibilité aux frontières. Cet assemblage se fera nécessairement par cumul d'amont vers l'aval. Le choix d'une simulation pour un B.V.U. amont limite le nombre des similations possibles pour le B.V.U. aval et ainsi de suite. Le problème du bilan est donc ramené de la région au B.V.U.

Une subdivision secondaire est nécessaire et j'ai introduit la notion d'aire élémentaire. C'est une fraction de B.V.U. suffisamment petite pour que chaque élément physique utile ou chaque hypothèse sur l'utilisation de l'eau puisse y être représentée par une valeur unique supposée également répartie sur toute son étendue.

Elle doit donc être suffisamment petite pour que les variations de ces caractères utiles soient négligeables, dans les conditions de précision requises pour la simulation en cours. Et pourtant, elle ne doit pas être trop petite. La multiplication des aires constitutives d'un B.V.U. quelconque rendrait pratiquement impossible la simulation du comportement de l'eau, la "finesse de l'image" devenant alors incompatible avec les possibilités techniques de l'ordinateur.

Degré de précision dans la simulation

Une notion de finesse de l'image, de sensibilité de la méthode intervient donc pour la première fois à l'occasion de la subdivision des B.V.U. en éléments. La condition de compatibilité entre finesse de l'image et limites pratiques de l'ordinateur peut être répercutée sur les B.V.U. Selon la précision requise pour la simulation pour un type d'ordinateur donné, on devra limiter le nombre d'aires élémentaires d'un B.V.U. et donc multiplier le nombre de B.V.U. Mais alors ce nombre de B.V.U. à son tour ne doit pas être augmenté de manière excessive. Il faut choisir un degré de précision pour la simulation du comportement de l'eau, et ceci ne peut être fait qu'en fonction de la précision nécessaire à la simulation agro-socio-économique. Au cours de cette étude, j'ai été amené à choisir arbitrairement des degrés de précision pour l'élaboration des modèles hydrologiques et hydrogéologiques. Ils ne peuvent être considérés que comme des premières indications et devront être remis en cause dans chaque étude régionale. Cette précision croîtra au fur et à mesure de la progression de l'étude. Mais dès l'étude préliminaire, la finesse de l'image devra être telle que le schéma d'aménagement résultant ne puisse être remis en cause.

Délimitation des aires élémentaires

Il faut ensuite choisir les critères de délimitation des aires élémentaires. Après une comparaison critique des diverses possibilités, j'ai opté pour un critère géologique superficiel et un critère de finalité.

Le critère géologique superficiel a pu être défini grâce à une seconde étape de simplification dans la représentation de la région : le terrain, sous une aire donnée, a été subdivisé en un certain nombre de tranches successives : tranche superficielle, tranche phréatique, tranches profondes, définies précisément. D'autre part la nature géologique des terrains rencontrés doit être représentée aussi simplement que possible. J'ai donc introduit une notion d'indice géologique et tenté de définir des échelles d'indices représentant par un seul symbole des combinaisons effectivement constatées dans la région des caractères géologiques agissant sur le comportement de l'eau:

- granulométrie, porosité, dimensions des pores pour les terrains meubles,
- grain, fissuration, dimension des fissures pour les roches compactes.

Ceci m'a amené à préciser les spécifications techniques pour les levés géologiques et les reconnaissances géophysiques et géotechniques, et aussi à proposer des groupements de combinaisons relativement semblables des caractères géologiques énumérés ci-dessus, afin de ne pas multiplier à l'excès le nombre d'indices de l'échelle.

Le critère de finalité a été à la fois plus simple et plus complexe à définir. Plus simple en apparence, car le nombre d'utilisations possibles d'une aire donnée est limité. On le laisse en son état naturel, ou on l'aménage. Et cet aménagement peut être agricole, urbain et industriel ou hydrographique (barrage réservoir). Il n'y a plus qu'à...

Et c'est là que les choses se compliquent : la finalité des aires élémentaires variera peut-être d'une simulation à l'autre. Il faudra donc introduire une différence entre les aires élémentaires qui sont déjà aménagées et celles qui peuvent le devenir, ou dont l'aménagement peut être transformé. Par conséquent, il faut rechercher les possibilités limites d'aménagement.

Les limites d'aménagement possible peuvent être définies à l'aide d'une première étude agro-socio-économique. L'agronomie et l'économie permettent de fixer l'altitude et l'exposition limite de mise en culture, en fonction de la situation topographique, géologique et climatique. Elles doivent même permettre de graduer les aptitudes à la mise en culture. Ceci a pour conséquence qu'il faut ajouter à la subdivision des B.V.U. en zones d'indices géologiques superficiels, une seconde subdivision en zones de pentes moyennes distinctes, et une troisième subdivision en zones d'indices agronomiques et climatiques distincts, pour appliquer ces critères limites d'aptitude à la mise en culture.

La sociologie, l'économie et les disciplines connexes (génie civil, rural et industriel, hydraulique urbaine, etc.) permettent de définir les limites d'extension concevables des agglomérations, aux dépens des zones mises en culture ou laissées jusque là en leur état naturel.

La géologie, l'hydrologie, et l'ingénierie et l'économie permettent de faire un choix parmi les sites de barrages réservoirs concevables, de les classer par ordre d'intérêt brut économique et hydrologique décroissant et de leur attribuer une surface d'occupation du sol.

L'application brutale de ces critères et des subdivisions qui permettent de les définir amènerait sans aucun doute à un nombre excessif d'aires élémentaires et à un fractionnement inextricable de B.V.U. J'ai alors repris en considération les notions de degré de précision, de sensibilité de la simulation et effectué un examen critique de ces indices et de ces limites. J'en ai déduit un certain nombre de règles de simplification:

- d'abord, je n'ai pas retenu les limites entre zones d'indices agronomiques et climatiques distincts comme critères de délimitation des aires élémentaires. Ces notions sont assez imprécises pour que l'on puisse faire coïncider les frontières agronomiques et climatiques, moyennant une approximation acceptable, avec la limite d'aire élémentaire la plus proche ;

- le même raisonnement peut s'appliquer à la subdivision de la région en zones de pentes moyennes distinctes, à l'exception cependant de la ligne définissant la pente limite extrême de possibilité de mise en culture ;

- des critères d'altitude et d'exposition qui permettent de graduer les types de cultures possibles, je n'ai retenu que la limite extrême de possibilité de mise en culture sur les tronçons où elle prend le pas sur la pente limite.

En résumé, j'ai retenu comme critères de subdivision :

- les frontières entre zones d'indices géologiques superficiels distincts ;
- les frontières entre zones où la mise en culture est possible et celles où elle est impossible, entre zones où une extension urbaine et industrielle d'une certaine importance est possible et celles où elle n'est pas à envisager, entre surfaces qui peuvent éventuellement être occupées par un réservoir artificiel et celles où cette possibilité n'existe pas ;
- les lignes de crête du relief qu'il était nécessaire de prendre en compte pour organiser commodément les aires élémentaires d'amont vers l'aval selon un cheminement cumulatif.

Malgré ces simplifications, il est apparu, dans la tentative d'application à la Thessalie que la subdivision des B.V.U. en aires élémentaires était encore trop complexe et trop déséquilibrée pour être pratique. J'ai donc repris l'examen des critères de délimitation en fonction de la finesse de simulation recherchée et ai établi un certain nombre de règles simplificatrices du tracé brut des frontières entre zones aménageables ou non, urbanisables ou non, et d'indices géologiques superficiels différents. Ces règles sont en principe applicables à la Thessalie seulement, mais des règles analogues peuvent être établies pour n'importe quelle région, selon des raisonnements semblables. Elles sont basées sur la recherche de la limite à partir de laquelle une indentation de frontière ou une enclave cesse d'avoir une influence significative sur l'évaluation du comportement de l'eau.

Toute cette procédure de subdivision de la région a été examinée en relation avec les diverses phases d'une étude d'aménagement régional, puis avec la régulation éventuelle de l'exploitation de cet aménagement.

On pourrait se demander pourquoi j'ai adopté un mode aussi complexe de subdivision en éléments. Pourquoi n'ai-je pas eu recours à la maille aveugle, carrée, rectangulaire ou triangulaire ?

La raison en est simple, l'influence de la géologie superficielle sur le comportement de l'eau est très importante. On peut même dire qu'elle est prépondérante. Or elle est discontinue. Un affleurement de calcaire karstique peut se trouver à côté d'un affleurement de terrain argileux, ou de flysch, ou de gravier, ou encore de granite. Et le comportement de l'eau sera très différent d'un de ces affleurements à l'autre. Un découpage de la région en mailles polygonales aveugles imposerait d'attribuer à celles que traverserait une limite géologique, des valeurs pondérées des éléments utiles pour la simulation du comportement de l'eau. Si nous voulons conserver la simplification introduite avec la notion d'indices géologiques, ces valeurs pondérées seront des indices moyens. Or un indice moyen peut être très trompeur : quelle peut être la signification physique d'un indice pondéré d'un calcaire karstique et d'une argile, par exemple ? Je laisse la question posée, car je n'y ai pas trouvé réponse.

On pourrait minimiser ce risque d'erreur et de mauvaise représentation géologique en multipliant le nombre de mailles aveugles. Mais alors on retombe dans le défaut que j'ai voulu éviter : un nombre d'éléments excessif pour une exploitation commode du modèle. Et puis, de toute manière, on doit définir la nature géologique superficielle de la région en cours d'étude. Ceci impose le tracé d'une carte des indices géologiques superficiels.

Alors à quoi bon compliquer la procédure, le travail de l'ordinateur, en introduisant des mailles polygonales dont le seul avantage est d'introduire une représentation plus conforme à l'esprit géométrique simplificateur de l'homme ? Le tracé des limites d'aires élémentaires peut être absolument quelconque pour un ordinateur scientifique équipé de dispositifs de lecture et de transcription graphiques automatiques.

Mais alors, on peut pousser la critique à l'extrême opposé et se demander pourquoi se limiter à la géologie superficielle dans le découpage en aires élémentaires. Les caractères géologiques des tranches phréatique et profondes sont eux aussi discontinus et les comportements de l'eau qui leur correspondent seront très variés. Certes, mais l'influence de ces discontinuités profondes est moins importante que celle des discontinuités superficielles.

En premier lieu, observons que la tranche phréatique différera peu de la tranche superficielle, dans la plupart des cas.

En second lieu, les aires élémentaires seront suffisamment petites et la connaissance de la position des frontières géologiques profondes suffisamment peu précise pour que l'on puisse faire coïncider au moyen d'une approximation raisonnable, le tracé des frontières géologiques profondes et la frontière d'aire élémentaire la plus proche.

Principe de la procédure de simulation

Nous avons établi et accepté le principe d'une représentation physique de la région par une subdivision en B.V.U., unités d'aménagement, eux-mêmes fractionnés en aires élémentaires. Pour passer de cette image physique à une simulation dynamique du comportement de l'eau, il faudra, pour chaque B.V.U., le représenter dans le cylindre vertical engendré par la frontière de chacune des aires élémentaires. Cette représentation sera fonction :

- de la nature de cette aire et de son sous-sol,
- de son climat,
- des hypothèses qui peuvent y être faites sur les prélèvements, utilisations et rejets de l'eau,
- et des conditions aux limites de ce cylindre.

Les simulations des bilans élémentaires se feront par une procédure cumulative, d'amont vers l'aval, jusqu'à ce que toutes les aires élémentaires aient été prises en compte, B.V.U. après B.V.U.

Pour ceci, il faut d'abord caractériser plus complètement chaque aire élémentaire, avant de passer à une représentation des termes du bilan.

Période de base et pas de temps élémentaire

La simulation du comportement de l'eau dans la région se rapporte à une période déterminée. Pour les diverses phases d'étude, cette période sera en général l'année moyenne, ou des années différant de l'année moyenne d'un écart déterminé, et auxquelles seront affectées des fréquences probabilitaires d'occurrence. Pour l'éventuelle utilisation de ce type de modèle durant l'exploitation de l'aménagement, cette période d'étendra sur un nombre limité de mois.

La période de base des modèles sera à son tour subdivisée en pas de temps élémentaires, ce qui permettra de tenir compte des fluctuations climatiques, hydrologiques et de la végétation durant cette période. Après un examen critique des diverses possibilités, je propose que la période de base d'élaboration et de fonctionnement des modèles hydrologiques et hydrogéologiques soit subdivisée en quatre trimestres correspondant aux saisons lors de l'étude préliminaire, et en mois calendaires par la suite.

Grâce au choix de cette échelle de temps, qui est en soi une schématisation de la réalité, on peut donner vie à la simulation du comportement de l'eau dans la région. Ceci implique que cette simulation soit effectuée successivement pour chaque pas de temps élémentaire, en tenant compte du fait que l'état initial pour ce pas de temps correspond à l'état final du précédent. Il faut pour cela connaître l'état des réserves en début de la période de base et se fixer des contraintes quant à leur diminution tolérable durant la période de base. Ces contraintes permettent de limiter l'éventail des utilisations possibles de l'eau dans la région. Par exemple, on peut adopter un rythme déterminé d'exploitation des réserves en pays désertique, en se basant sur une durée raisonnable d'exploitation des aménagements et en faisant un pari sur la mise au point éventuelle dans le futur, de techniques nouvelles qui permettront de maintenir la vie dans ces régions, après épurement des réserves.

On peut aussi, et c'est humainement plus séduisant, s'imposer de ne pas puiser dans les réserves, si les précipitations et les apports annuels sont suffisants pour assurer aux populations un niveau de vie et un développement convenables.

Caractérisation des aires élémentaires. Facteurs agissants et facteurs utiles

Revenons maintenant à la caractérisation des aires élémentaires et au passage de l'image physique de la région au modèle de simulation hydrologique et hydrogéologique. Après avoir examiné le comportement théorique de l'eau dans une aire élémentaire quelconque, au moyen d'un organigramme du bilan élémentaire, j'ai recherché quels étaient les éléments physiques,constants ou non, caractérisant une aire élémentaire, qui agissaient sur les termes de son bilan.

Dans cet organigramme l'évapotranspiration ne tient qu'une place très secondaire (voir tableau 2.1) et je n'en tiens finalement pas compte, à cause de sa complexité physique et des difficultés qu'il y a à le déterminer à l'échelle du pas de temps élémentaire. Par contre, l'importance des échanges dans la tranche superficielle de sol est mise en évidence et les termes de rétention, ruissellement direct et infiltration directe qui correspondent à ces échanges seront parmi les termes clés de la simulation.

Lors de l'examen des divers éléments caractéristiques des aires élémentaires susceptibles d'agir sur les termes du bilan, j'ai constaté que d'une part ces éléments, ou facteurs agissants n'étaient pas toujours indépendants les uns des autres et que d'autre part, leur détermination n'était pas commode. Un raisonnement logique assez long m'a amené à substituer à ce premier ensemble de facteurs agissants un second ensemble de facteurs "utiles", qu'il était possible de déterminer pratiquement moyennant l'exécution d'enquêtes et de reconnaissances dont j'ai indiqué le principe, et qui représentait (implicitement ou explicitement selon les cas), les actions et les influences des facteurs agissants. La liste de ces facteurs utiles a été établie au chapitre 3, récapitulée au début du chapitre 4 et reprise au chapitre 7. Il me paraît donc superflu de le répéter ici.

Leur nombre est relativement réduit. Nous avons :

- 6 + n facteurs constants en plus de la superficie de la projection horizontale de l'aire ;
- 2 + n facteurs variables avec le temps.

(n étant le nombre de tranches géologiques profondes).

Aucun de ces facteurs, à l'exception de la quantité globale des précipitations, ne correspond directement à un terme du bilan élémentaire. L'image analytique de la région à laquelle nous sommes arrivés peut être considérée comme la traduction des résultats bruts des reconnaissances et des mesures en valeur relative aux aires élémentaires constitutives et aux pas de temps successifs qui composent la période de base de la simulation.

La prise en compte des utilisations de l'eau par l'homme

Cette image est encore incomplète. Il faut, avant de la transformer en simulation du bilan, lui ajouter une représentation des utilisations de l'eau par l'homme. Ceci peut se décomposer en deux parties distinctes :

- l'utilisation actuelle, qui résulte d'une enquête agro-socio-économique dont il a fort peu été question dans cette étude ;
- les utilisations prospectives, qui joueront dans la simulation un rôle de paramètres plus ou moins dépendants les uns des autres et qui peuvent être choisis dans des intervalles limités par des valeurs résultant d'une première approche agronomique, sociologique, d'hydraulique urbaine et industrielle.

Il reste à décomposer ces assemblages paramétriques pour chaque aire élémentaire, en prélèvements et rejets dans les eaux superficielles ou souterraines selon les possibilités techniques telles qu'elles résultent d'un premier inventaire des sites de barrage et des ressources en eaux souterraines, déjà délimité par des critères approximatifs d'intérêt économique. Il faut donc considérer plusieurs organisations paramétriques de l'eau dans chaque aire élémentaire, et examiner si elles sont compatibles avec ses ressources effectives, la satisfaction de certains besoins en eau à l'aval, et les lois de variation des réserves. Et c'est là que nous en arrivons à la simulation du comportement de l'eau dans la région.

Modèle "brut" de simulation - Détermination des cœfficients reliant facteurs utiles et termes du bilan

Nous disposons d'une image "analytique" de la région, c'est-à-dire d'une subdivision de la région en éléments dont chacun est caractérisé par un certain nombre de facteurs utiles constants ou non, déduits directement des mesures et des reconnaissances effectuées sur place. Nous disposons d'autre part d'un certain nombre de jeux d'organisations paramétriques de l'eau dans chaque aire élémentaire. Pour aboutir à un modèle de simulation hydrologique et hydrogéologique il nous faut traduire les facteurs utiles en cœfficients qui permettront d'exprimer directement les termes du bilan élémentaire dans chaque aire élémentaire à partir du moment où nous y aurons choisi un jeu d'organisation artificielle de l'eau.

Les relations entre facteurs utiles et termes du bilan seront,autant que possible, des lois linéaires, ce qui est justifiable dans la plupart des cas par le fait qu'il s'agira d'un calcul aux différences finies.

Il est pratiquement impossible de déterminer directement et expérimentalement ces cœfficients pour chaque aire élémentaire. Ces cœfficients ne peuvent être déterminés qu'au moyen d'expériences coûteuses, que l'on ne peut effectuer que pour un nombre réduit de cas typiques, à choisir avec soin. A partir de ces expériences on établit des relations entre facteurs utiles et cœfficients et l'on procède par

interpolations et extrapolations pour transformer les facteurs utiles en cœfficients dans les aires élémentaires où ces expériences n'ont pas été effectuées, et qui sont, de loin, la majorité. Ceci justifie le stade intermédiaire de l'image "analytique" basée sur les facteurs utiles.

Réglage du modèle - Ajustement des cœfficients

Ces interpolations et extrapolations sont une source d'erreurs et d'imprécisions dans la détermination des cœfficients, et avant de considérer le modèle hydrologique et hydrogéologique comme opérationnel, il faut procéder à un réglage. Pour ce, on fait fonctionner le modèle "brut" auquel nous sommes maintenant parvenus, de manière à contrôler la concordance entre la simulation qu'il permet de faire de l'état actuel de la région et de l'état actuel constaté par enquêtes, observations et mesures. Cette connaissance nécessaire du bilan en certains points de contrôle est tout à fait possible : elle est le résultat de mesures limnimétriques dans les cours d'eau et aux griffons des sources, ainsi que de mesures de débits de production des puits. On se fixe, en fonction de la précision désirée dans l'étude régionale en cours, une limite d'écart toléré entre le résultat de la simulation et celui des mesures et par tâtonnements, on ajuste la valeur des cœfficients jusqu'à ce que les débits aux points de contrôle calculés à l'aide de la simulation, ne diffèrent des débits mesurés que d'un écart égal ou inférieur à la limite tolérée.

Cette procédure de réglage n'a des chances d'amener à des valeurs correctes des cœfficients que si les premières valeurs brutes des cœfficients, choisies avant le réglage, sont basées sur une expérience suffisamment complète et dense. Ceci permet de comprendre pourquoi je n'ai pas proposé de passer directement au réglage du modèle à partir du moment où l'organigramme du bilan élémentaire a été défini, à partir de valeurs "intuitivement" choisies des termes du bilan. Il y a un trop grand nombre de facteurs utiles et de cœfficients pour que le problème du réglage n'ait pas plusieurs solutions. Il faut donc limiter au maximum la latitude d'ajustement des divers cœfficients, pour que la concordance entre débits calculés et débits mesurés soit significative.

Le modèle hydrologique et hydrogéologique

Après avoir ajusté les cœfficients au moyen du réglage décrit ci-dessus, le modèle hydrologique et hydrogéologique est prêt à fonctionner. Nous disposons d'un outil de base pour l'étude de l'aménagement régional, dès l'étude préliminaire. Et cet outil pourra être utilisé durant toutes les phases de l'étude, puis en cours d'exploitation de l'aménagement, comme moyen de prévision et de régulation. Cette continuité du modèle implique sa transformation progressive d'une phase de l'étude à l'autre. La transformation la plus importante sera certainement le changement d'échelle entre l'étude préliminaire et les phases ultérieures. Mais il est probable qu'elle n'obligera pas à reconstruire l'ensemble.

En résumé la méthode globale à laquelle ma recherche m'a amené est une simulation du comportement de l'eau dans la région au moyen d'un modèle mathématique hydrologique et hydrogéologique. L'élaboration de ce modèle se fait en plusieurs étapes :

- Schématisation de la région, décomposition en éléments qui suivent au plus près les limites topographiques et géologiques naturelles.
- Représentation de chacun de ces éléments au moyen de facteurs utiles constants ou variables avec le temps, en nombre limité, mais tenant compte de toutes les influences du milieu naturel sur le comportement de l'eau, et qui sont directement déduits de reconnaissances extensives.
- Choix d'un certain nombre de jeux paramétriques plausibles d'organisation de l'eau.
- Traduction par interpolation et extrapolation des facteurs utiles en cœfficients déterminant le comportement de l'eau selon le jeu paramétrique d'organisation de l'eau qui est choisi.
- Réglage du modèle "brut" ainsi obtenu par simulation de la situation actuelle et ajustement des cœfficients pour obtenir une bonne concordance entre le modèle et l'original.

Le modèle est alors prêt à fonctionner de manière prospective.

L'ORGANISATION DES ETUDES ET RECONNAISSANCES DANS UNE REGION

Principe d'action

Pour utiliser la méthode globale ci-dessus, comment faut-il organiser les études et reconnaissances nécessaires pour rassembler, puis traiter l'information : obtenir des facteurs utiles, les lois de corrélation entre ces derniers et les termes du bilan, valeurs expérimentales de contrôle pour les réglages ?

Ces études et reconnaissances sont de plusieurs genres.

Elles doivent toutes avoir lieu simultanément, ou du moins commencer le plus tôt possible, et être articulées les unes aux autres avec le plus de souplesse possible. Examinons-les dans le même ordre que celui adopté pour l'étude des facteurs utiles au chapitre 3 et par la suite : topographie, géologie, hydrogéologie, agronomie, climatologie, hydrologie, et enfin socio-économie, technique de construction et d'aménagement.

Analyse topographique

Sur la base des cartes topographiques (au 1/50 000 lors de l'étude préliminaire et au 1/20 000 par la suite) et d'une échelle des pentes autant que possible standardisée, il faut établir immédiatement une carte des pentes moyennes dans la région. Ceci peut être effectué par des procédés automatiques au moyen de programmes simples (*) faisant intervenir un ordinateur de série scientifique couplé avec des dispositifs de lecture et de traçage automatiques. On peut compléter ce travail en l'effectuant aussi sur les cartes existant à plus grande échelle, préalablement réduite à l'échelle de travail correspondant à la phase d'étude en cours.

- Recensement et première élimination des sites de barrages

Simultanément, et toujours en faisant appel à des programmes (*) d'ordinateur scientifique couplé avec des dispositifs de lecture et de traçage automatique, on procède à un recensement des sites de barrages possibles et on les classe selon un ordre approximatif d'intérêt hydrologique et économique, combiné avec une première élimination géologique. Ceci peut être envisagé selon la procédure suivante :

- recherche des resserrements du relief le long du réseau hydrographique,
- détermination du bassin versant de chaque resserrement individualisé,
- détermination des courbes donnant le volume de retenue en fonction de sa hauteur et du volume du barrage (en terre ou en enrochements standards),
- évaluation hydrologique sommaire de l'apport moyen annuel en chaque site,
- établissement pour chaque site du rapport entre l'apport moyen annuel V (ou le volume de stockage envisagé s'il est différent) et le volume V' de barrage nécessaire pour l'emmagasiner.
- élimination d'un certain nombre de sites par comparaison des valeurs de ce rapport avec une limite économique, déterminée au moyen d'une étude technico-économique sommaire. A ce point de l'étude des sites, un premier examen géologique permet d'éliminer ceux dont l'impossibilité est évidente;
- la procédure automatique peut alors reprendre ;
- les sites non éliminés après ce premier contrôle hydrologique, économique et géologique sont retenus comme points de fermeture possibles de groupes de B.V.U. Les caractéristiques de ces sites retenues (courbes exprimant en fonction de la hauteur de retenue la surface et le volume du lac, ainsi que le rapport V/V') sont stockées en mémoire de l'ordinateur. Les caractéristiques des autres sites sont effacées ;
- on ajoute alors à ces caractéristiques une évaluation approximative conventionnelle de la surface maximale que la retenue pourra occuper (contour, superficie). Cette évaluation peut être déduite de la première estimation du ruissellement annuel déjà citée ci-dessus et d'une étude rapide de l'irrégularité du climat, lors de l'étude préliminaire. Dans les phases

(*) - Ces programmes ne sont pas tous classiques, mais nous avons vu qu'ils sont de conception aisée.

ultérieures elle peut être ajustée en fonction des résultats de la simulation.

L'inventaire des sites de barrages et la première élimination sont terminées. Une seconde élimination doit être faite sur bases géologiques et géotechniques plus précises, après l'exécution des reconnaissances (voir plus bas).

- Délimitation des B.V.U.

La carte des pentes moyennes est alors reprise en considération, et la délimitation des B.V.U. est poursuivie, toujours de manière automatique selon la procédure suivante :

- identification des resserrements topographiques du réseau hydrographiques non retenus comme sites de barrages et situés à l'aval immédiat et à l'amont immédiat de zones dans lesquelles les terrains de pente moyenne inférieure à 20 % excéderont une certaine proportion (60 % par exemple, de la surface totale) ;

- addition de ces points de resserrement topographiques aux sites de barrages retenus dans la liste des points de fermeture de groupes de B.V.U. ;

- filtrage de cette liste et élimination des points de fermeture trop rapprochés les uns des autres, au moyen d'un test logique :

si la surface du bassin versant compris entre deux points de fermeture successifs est inférieure à une certaine limite (à définir selon le cas et la phase d'étude), l'un des deux points de fermeture doit être éliminé de la liste.

Le point éliminé sera le point aval sauf si ce dernier est un site de barrage, auquel cas le point amont sera éliminé.

- contrôle de la taille des B.V.U. ou groupes de B.V.U. ainsi déterminés à l'aide de tests logiques :

1°/ Détermination de la superficie des bassins versants limités par deux points de fermeture successifs d'amont vers l'aval.

2°/ Dans les zones de fort relief (proportion de terrains de pente moyenne plus forte que 20 % supérieure à 40 % par exemple) si le bassin versant a une surface supérieure à une certaine limite (300 km^2 par exemple) il doit être subdivisé en autant de B.V.U. que cette limite est contenue par excès dans le bassin versant considéré. Ces B.V.U. doivent se fermer à des resserrements relatifs du réseau hydrographique choisis de manière à ce que les surfaces des B.V.U. ainsi déterminés soient aussi proches que possible (limite à déterminer en vue d'un test logique) de la surface du bassin versant considéré divisé par le nombre de B.V.U. adopté.

3°/ Dans les zones de faible relief (proportion de terrain de pente moyenne plus forte que 20 % inférieure ou égale à 40 %, par exemple), on adopte des tests logiques analogues à ceux du 2° ci-dessus, mais avec des limites différentes (1000 km^2 par exemple, pour la surface des B.V.U.).

La délimitation des B.V.U. est alors terminée. Leur liste et le tracé de leurs frontières sont alors stockés en mémoire, selon un ordre allant d'amont vers l'aval, par agglomération.

- Délimitation des zones aménageables ou non aménageables

Une première étude climatologique, agronomique et technico-économique permet de définir des critères limites d'aménagement agricole. Ces critères sont :

- une altitude limite selon l'exposition, qui sépare les zones où une végétation intéressante peut croître des autres zones ;

- une pente limite selon la nature géologique du terrain, qui sépare les zones où une végétation intéressante peut croître et où une exploitation agricole est techniquement possible dans des conditions économiques intéressantes des zones où ceci est impossible.

Il est tout à fait possible de tracer ces limites d'altitude et de pente par des procédés automatiques à partir du moment où les critères ont été chiffrés par les agronomes, les ingénieurs de génie rural et les économistes, et je n'insisterai pas à ce sujet.

- Délimitation des aires élémentaires hydrographiques

Nous avons déjà vu qu'une surface maximale d'occupation du sol avait été attribuée à chaque site de retenue non éliminé.

On peut aussi envisager d'identifier par des procédures automatiques les lacs et les cours d'eau de la région.

Un filtrage permet alors d'éliminer de la liste des aires élémentaires de chaque B.V.U., les aires hydrographiques naturelles et artificielles possibles dont les dimensions (surface d'un lac, largeur d'un cours d'eau) sont inférieures à une limite déterminée en fonction de la phase d'étude en cours.

- Délimitation des groupes d'aires "noyau" urbaines et industrielles

Par une procédure analogue à celle indiquée pour l'identification des aires hydrographiques naturelles, on peut identifier et délimiter les agglomérations existantes, sur la base de cartes topographiques récentes réduites si nécessaire au 1/50 000, ou à défaut, de photographies aériennes. On peut alors procéder à un filtrage selon des critères de densité de population urbaine et de consommation en eau urbaine et industrielle déterminés par une première étude démographique et d'hydraulique urbaine et industrielle.

- Caractérisation topographique des aires élémentaires

Lorsque tous les B.V.U. sont enfin subdivisés en aires élémentaires, l'analyse topographique reprend et on détermine par des procédures automatiques les caractéristiques suivantes de chacune de ces aires :

- superficie de la projection horizontale,
- pente moyenne,
- densité linéaire du réseau hydrographique.

- Commentaires sur l'analyse topographique

L'analyse topographique joue un rôle prépondérant dans la subdivision de la région en B.V.U. Elle est aussi très importante pour la délimitation des aires élémentaires, en raison du rôle de la topographie dans les critères de finalité. Elle permet enfin de déterminer la surface des aires élémentaires et deux de leurs facteurs utiles constants.

Il est à remarquer à son propos qu'elle peut être entièrement effectuée par des procédures automatiques à partir du moment où l'on dispose de cartes topographiques à l'échelle convenable (1/50 000 ou 1/20 000 selon la phase d'étude en cours) et suffisamment récentes (ou à défaut, pour l'identification et la délimitation des aires "noyau" urbaines et industrielles, de photographies aériennes récentes).

J'ajouterai que ces procédures automatiques peuvent être effectuées à l'aide de programmes d'ordinateur simples, basés sur des tests logiques, et dont la mise au point ne présente pas de difficultés.

Etude géologique

Cette étude a, en fait, deux buts bien distincts :

1°/ une caractérisation géologique superficielle et profonde de la région, et ce pour toutes les phases de l'étude.

2°/ un contrôle de la possibilité technique de réalisation de barrages réservoirs, et une seconde élimination, essentiellement géologique, parmi ces sites. Ce deuxième but n'est à considérer que lors de l'étude préliminaire. Les études et reconnaissances sur les sites de barrages à l'occasion des phases d'avant-projet ou de projet ne porteront que sur des aspects techniques de la construction. Elles peuvent donc être considérées comme sans incidence sur l'étude d'aménagement régional ou subrégional.

- Caractérisation géologique régionale - Eléments de base nécessaires

Examinons d'abord la caractérisation géologique de la région. Elle doit être basée sur les résultats des études précédemment effectuées, le cas échéant, et sur des études et reconnaissances complémentaires spécifiques du but recherché.

Pour caractériser géologiquement la région en vue de l'application de la méthode globale, il faut :

- définir sur l'ensemble de la région une tranche superficielle, une tranche phréatique et des tranches profondes éventuelles ;

- caractériser chacune de ces tranches au moyen d'indices géologiques, définis en fonction de la nature des terrains rencontrés :

- granulométrie, porosité, dimension des pores pour les terrains meubles,
- grain, densité de formation et dimension des fissures pour les roches compactes.

- Exploitation et contrôle des données existantes

Il serait étonnant que l'exploitation des cartes géologiques existantes et des résultats de reconnaissances précédemment effectuées permette de définir les tranches géologiques et de leur attribuer des indices dès le début de l'étude préliminaire.

Dans un but d'économie de l'effort à entreprendre, il est cependant indispensable de rassembler les données géologiques existant en début d'étude et d'en faire un examen critique rapide.

Pour cela, il faut en premier lieu les homogénéiser, c'est-à-dire transcrire les renseignements qu'elles contiennent en fonction de l'étude à réaliser.

Ceci amène à filtrer les coupes lithologiques, logs de sondage et échelles stratigraphiques et à ne conserver de ces documents que ceux dans lesquels on peut caractériser les niveaux décrits, en fonction des caractères géologiques énumérés ci-dessus, même approximativement, et même si ils ne sont pas reliés à une stratigraphie chronologique.

Les coupes lithologiques, logs de sondage et échelles stratigraphiques retenus doivent alors être contrôlés au moyen de vérifications ponctuelles, sur un échantillonnage représentatif. Ceci permet d'attribuer à chacun d'eux une cote de validité relative.

Il est intéressant alors de traduire les renseignements et les caractéristiques des coupes ainsi retenues en cartes perforées, de manière à pouvoir utiliser ces données dans des programmes d'ordinateur . Lors de cette transcription sur carte, il est indispensable de coder aussi la cote de validité en vue d'un second filtrage et d'une exploitation ultérieure.

La transcription en cartes perforées de l'information résultant des coupes, logs et échelles stratigraphiques étant ainsi terminée il faut encore exploiter et contrôler les cartes géologiques dont l'échelle stratigraphique n'a pas été éliminée. Ceci peut se faire par programmes automatiques de concordance de limites géologiques entre les cartes existantes, préalablement transcrites à l'échelle de travail de l'étude préliminaire (1/50 000) et le résultat d'une première interprétation photogéologique basée sur les coupes lithologiques et stratigraphiques de contrôle citées précédemment. On attribue alors à ces cartes préexistantes convenablement transcrites une indication codée des divergences avec la carte photogéologique de référence et on maintient ces informations sous forme de programmes en cartes perforées.

- Etudes et levés géologiques complémentaires

Après examen critique des données géologiques existantes, on doit décider d'un programme de reconnaissances complémentaires destiné à combler les lacunes constatées. Ce programme comprendra vraisemblablement un certain volume de travail purement géologique. Il est délicat de chercher à généraliser, mais on peut esquisser un programme-type, en réservant la possibilité de l'adapter à chaque cas.

En ce qui concerne la géologie, ce programme-type se décomposera en deux parties :

1°/ Etablissement d'échelle d'indices géologiques

a) Etablissement d'une échelle stratigraphique tenant compte des caractères géologiques agissant sur le bilan et énumérés plus haut.

b) Etablissement d'une échelle de gradation de ces caractères géologiques.

c) Examen des combinaisons rencontrées dans la nature, entre les diverses valeurs de ces caractères géologiques.

d) Etablissement d'une ou de plusieurs échelles d'indices géologiques, selon le cas.

Ce travail peut être mené à bien au moyen du levé d'un certain nombre de coupes géologiques, dont la position sera déduite des résultats de la première interprétation photogéologique. Ces levés seront accompagnés de mesures ou d'évaluations des caractères géologiques agissants (analyses granulométriques, mesures de densité et de la porosité, évaluation du grain et de la fissuration).

Cependant, ces mesures seront relativement coûteuses et il est hors de question de les effectuer en chaque point examiné lors du levé de la carte. On devra donc établir des relations de corrélation entre ces caractères géologiques agissants et donc, en dernière analyse, les indices géologiques et certains caractères des roches et des terrains rencontrés qui seront plus aisés à déterminer.

Pour les roches anciennes, on peut envisager de relier les indices à la position stratigraphique de la formation, avec adaptation selon les variations latérales de faciès, comme j'ai tenté de la faire en Thessalie.

On peut aussi essayer de compléter et de préciser cette correspondance stratigraphique au moyen de mesures de la résistivité superficielle.

Pour les terrains meubles plus récents, dont la position stratigraphique est pour le moins délicate à établir, on devra tenter de relier les indices géologiques et la résistivité superficielle des terrains rencontrés. Il faudra donc effectuer, en même temps que l'on procède aux levés de coupes géologiques indiqués plus haut et aux mesures directes des caractères géologiques à la mesure de la résisitivité électrique superficielle des terrains rencontrés.

2°/ Etablissement d'une carte structurale et géologique

Après la mise au point de l'échelle stratigraphique des échelles d'indices et des relations de correspondance entre indices et position stratigraphique, indices et résistivité superficielle, on devra procéder aux levés nécessaires pour établir une carte structurale et géologique basée sur l'échelle stratigraphique adoptée.

Pour ce il faudra, dans un premier temps, reporter par des procédures automatiques sur la base topographique d'étude les données préexistantes préalablement transcrites en fonction de l'échelle stratigraphique adoptée, ainsi d'ailleurs que les coupes géologiques sur la base desquelles cette échelle stratigraphique a été établie.

De l'examen de ce premier report on déduira un programme de travail sur le terrain, qui comprendra :

- un second contrôle des données préexistantes reportées ;
- un levé des coupes complémentaires selon une densité qui dépendra de l'importance des lacunes. Ce levé devra être axé sur la nature lithologique et stratigraphique de terrains affleurants, mais aussi sur la tectonique (pendages, failles, etc.), afin de contrôler et de compléter l'ébauche tectonique résultant de la première interprétation photogéologique ;
- l'ensemble de ce travail de terrain devra être fait de manière à ce que le report automatique des observations soit possible. Une carte géologique et structurale brute peut alors être déduite de l'ensemble de ces reports, par des procédés automatiques. Il sera cependant nécessaire, dans certains cas, de reprendre l'interprétation photogéologique, d'en reporter les résultats sur la carte brute et d'affiner le tracé de cette carte au moyen de tests logiques (concordance de tracés).

A ce point de l'étude préliminaire, la caractérisation géologique de la région doit être complétée à l'aide de reconnaissances géophysiques et géotechniques exécutées en même temps que les levés géologiques, et dont il est question plus bas.

Lors des phases ultérieures de l'étude, on peut adopter une technologie du levé géologique tout à fait semblable. Cependant, la prise en compte des données préexistantes sera plus simple, car elles se limiteront au report avec changement d'échelle des résultats obtenus lors de l'étude préliminaire.

- Contrôle de la possibilité technique de réalisation des barrages réservoirs

Ce contrôle comprendra un levé géologique de détail du site, de la retenue et des alentours à des échelles dépendant du problème posé. Cet aspect du problème est absolument classique et je ne m'y attarderai pas.

Reconnaissances géophysiques

Ces reconnaissances, de même que l'étude géologique, auront le double but de :

1°/ caractériser la région, au point de vue géologique,

2°/ contrôler la possibilité technique d'exécution des barrages réservoirs (uniquement lors de l'étude préliminaire) et pour les mêmes raisons).

- Caractérisation géologique de la région

Nous avons vu, lors de la tentative d'application de la méthode globale à la Thessalie, qu'il était intéressant de relier les indices géologiques à un caractère physique du terrain déterminable aisément et économiquement, comme par exemple sa résistivité électrique. J'ai repris ceci en considération au sujet de l'établissement des échelles d'indices géologiques.

D'autre part, dans la tentative d'application de la méthode globale à la Thessalie, j'avais noté l'intérêt des reconnaissances par sismique réfraction pour établir dans les fossés d'effondrement à

remplissage plio-pléistocène la limite entre terrains meubles et roches cimentées. Il est vraisemblable que dans le programme de reconnaissances qui sera établi dès la fin de l'exploitation et du premier contrôle des données existantes, une large part sera accordée à la géophysique :

- les reconnaissances par sondages électriques (mesure de résistivité) pourront être employés systématiquement afin de caractériser les terrains meubles traversés sur une épaisseur dépassant légèrement la profondeur limite acceptable d'exploitation des eaux souterraines (telle qu'elle résulte d'une première étude rapide technico-économique). La densité de ces sondages électriques dépendra du problème posé et de la phase d'étude en cours, et je renvoie le lecteur à ce qui a été dit à ce propos aux chapitres 3 et 7 et en particulier au point 7.2.1.2. Il se peut que, la situation géologique générale amène à poser le problème de communication entre systèmes aquifères différents. Pour la Thessalie, ceci a été le cas : le prolongement des systèmes karstiques sous le remplissage cénozoïque et quaternaire des fossés d'effondrement et les communications entre ces systèmes karstiques et d'autres systèmes aquifères devaient être reconnus. Et ce problème s'est posé nettement dès le début. Dans de tels cas il ne faut pas hésiter à pousser les sondages électriques jusqu'à des profondeurs excédant largement la limite économique d'exploitation des eaux souterraines, au moins dans les régions où le problème semble se poser, délimitées très largement. Il ne me semble pas raisonnable de restreindre trop tôt le champ des reconnaissances électriques, qui sont un moyen d'investigations rapides, efficaces (à condition d'être interprétées en liaison très étroite avec les études géologiques et les autres types de reconnaissances), et peu coûteuses.

Il peut être intéressant d'autre part d'effectuer des sondages électriques systématiques hors des fossés d'effondrement et des zones où l'épaisseur de terrain meuble n'est pas négligeable, afin de définir les indices géologiques superficiels et phréatiques avec une plus grande précision que par simple corrélation avec la position stratigraphique des formations rencontrées. Il s'agirait alors de sondages électriques de reconnaissance à faible profondeur (150 à 200 m au maximum) selon un réseau maillé analogue à celui qui a été envisagé pour les zones de terrains meubles. Je n'ai pas eu l'occasion de faire cette expérience, et il m'est impossible par conséquent d'indiquer si cette application des sondages électriques amène à une précision et surtout à une fidélité nettement supérieures dans l'exécution des cartes d'indices géologiques des diverses tranches. Mais il serait utile de faire cette expérience quelles qu'en soient les conclusions.

- des reconnaissances par sismique réfraction ne seront pas nécessaires dans tous les cas. Elles seront cependant utiles dans le cadre de l'étude préliminaire de régions lorsque le problème se posera de localiser la limite entre terrains meubles et roches cimentées en profondeur. Mais ce problème ne se posera en fait que dans les zones où les résistivités mesurées dans les sondages électriques sont assez élevées. Car à des valeurs élevées des résistivités peuvent correspondre des niveaux meubles grossiers, et donc aquifères, des grès ou conglomérats bien cimentés, et donc peu susceptibles d'être très aquifères, des calcaires karstiques aquifères, ou encore des gneiss et roches cristallines acides, peu aquifères. Il y a donc alors des ambiguités dans l'interprétation des sondages électriques que des reconnaissances par sismique réfraction peuvent aider à éliminer à moindres frais qu'en ayant recours à des sondages mécaniques.

Quoiqu'il en soit, les reconnaissances géophysiques fourniront une masse importante de données utiles à la caractérisation géologique des tranches superficielles, phréatiques et profondes, ainsi qu'à leur délimitation.

Mais ces données pour être correctement interprétées, doivent être solidement étayées sur l'étude géologique décrite plus haut et sur des sondages d'étalonnage dont il sera question plus loin.

- Contrôle de la possibilité technique d'exécution des barrages réservoirs

Il peut être nécessaire dans ce but d'avoir recours à des reconnaissances géophysiques, en particulier pour déterminer l'épaisseur et la qualité des terrains de couverture et la tenue mécanique des fondations. Je n'insisterai pas sur cet aspect classique des reconnaissances géophysiques.

Reconnaissances géotechniques

Les reconnaissances géotechniques auront encore les mêmes deux buts distincts cités à propos des études géologiques et des reconnaissances géophysiques.

Un élément nouveau intervient cependant : leur coût nettement plus élevé que celui des études géologiques et des reconnaissances géophysiques. Il importe donc d'en limiter l'emploi. Nous avons vu cependant à propos de la Thessalie qu'on ne peut pas raisonnablement s'en passer totalement.

- Caractérisation géologique de la région

Les reconnaissances géotechniques devront dans ce cadre répondre à un certain nombre de questions, énumérées ci-dessous :

- établissement des relations de corrélation entre indices géologiques et résistivité ou position stratigraphique ;
- délimitation des tranches géologiques successives et en particulier de la tranche superficielle ;
- étalonnage des reconnaissances éventuelles par sismique réfraction.

La réponse à ces questions peut être apportée par un nombre relativement réduit de sondages dont la position et la profondeur peuvent être déterminées à l'issue de l'exploitation et du premier filtrage des données géologiques préexistantes, et en tous cas, pour la plupart, avant l'exécution de l'étude géologique et des reconnaissances géoélectriques complémentaires. Il est prudent cependant de réserver une certaine marge de manœuvre et de pouvoir repousser la définition de quelques uns de ces sondages à la fin de l'exécution des reconnaissances géophysiques. Techniquement, ces sondages doivent être de deux types :

1°/ des sondages peu profonds (en général de l'ordre de 20 à 30 m) exécutés par rotation ou percussion, avec échantillonnage continu (carottage en terrain rocheux, sonde à clapet ou autre procédé analogue en terrain meuble). Ces sondages seront exécutés jusqu'à dépasser de 10 m environ le niveau de la nappe phréatique. La plupart d'entre eux seront exécutés dans les terrains meubles, mais il faudra peut-être en exécuter dans certaines formations rocheuses.

Ces sondages seront équipés d'un tube piézométrique convenablement crépiné et sur lequel on mesurera périodiquement, par exemple tous les mois, le niveau de la nappe phréatique. De plus des mesures de la densité in situ et de la teneur en eau seront effectuées le long de chacun de ces sondages, afin de déterminer la porosité ou la fissuration et d'évaluer la dimension des pores ou des fissures.

A l'aide de ces sondages et des résultats des mesures effectuées, il sera possible de relier les caractères géologiques agissant sur le bilan aux résistivités, et par la suite d'établir les corrélations entre indices géologiques et résistivités à proximité du sol. Il sera aussi possible de délimiter la tranche superficielle au moyen d'interpolations basées sur les quantités globales de précipitations mesurées à proximité durant la même période.

Pour compléter cette délimitation de la tranche superficielle, un certain nombre de puits existants dans la région et qui exploitent la nappe phréatique (puits d'alimentation des fermes, etc.) et de plans d'eau feront l'objet de mesures piézométriques périodiques (par exemple une fois par mois).

2°/ des sondages profonds, mais probablement moins nombreux que ceux indiqués en 1° ci-dessus devront être exécutés dans le but de relier les valeurs des résistivités mesurées aux caractères géologiques des roches enprofondeur - qui peuvent différer de leurs caractères superficiels - et donc aux indices géologiques. Ces sondages seront exécutés à la boue, en général, avec analyse continue des cuttings et carottages occasionnels. Ils seront équipés de piézomètres isolés de la nappe phréatique, si nécessaire et dans la mesure du possible. Des mesures de la densité in situ et de la teneur en eau seront effectuées dans ces sondages à l'aide de sondes radioactives. Il sera utile aussi d'y procéder à un carottage électrique. Le nombre de ces sondages dépendra de l'importance et de la validité des logs de sondages exécutés précédemment.

Après l'exécution de ces sondages, les données recueillies devront être transcrites en vue d'une exploitation par programmes d'ordinateur selon des procédures que l'on peut schématiser comme suit :

1°/ Etablissement de la carte des indices géologiques superficiels

- Corrélation entre niveaux de la nappe phréatique et précipitations globales ; extrapolation homothétique pour délimiter la tranche superficielle en chacun des points de mesure piézométrique ;
- Etablissement d'une carte des isobathes du plancher de la tranche superficielle ;
- Corrélation entre indices géologiques superficiels et position stratigraphique et/ou résistivité ;
- Application à la tranche superficielle en fonction des valeurs des résistivités réelles mesurées et/ou de la carte géologique dans les affleurements rocheux ;
- Report sur la carte du plancher de la tranche superficielle des limites entre zones d'indices différents.

2°/ Etablissement de la carte des indices géologiques phréatiques

- Identification dans les sondages de la position du toit du niveau aquiclude le plus élevé ;
- Corrélation quantitative avec les résistivités mesurées ;

- Interpolation basée sur les sondages électriques, les résultats de la sismique réfraction et les lignes structurales de la carte géologique ;
- Etablissement d'une carte des isobathes du plafond du premier aquiclude, avec indication des discontinuités tectoniques ;
- Corrélation entre indices géologiques phréatiques et position stratigraphique et/ou résistivité ;
- Application à la tranche phréatique en fonction des valeurs des résistivités réelles mesurées et/ou de la carte géologique ;
- Report sur la carte du plafond du premier aquiclude des limites entre zones d'indices différents.

3°/ Etablissement de la carte des indices géologiques profonds

Procédure analogue à celle décrite en 2° ci-dessus, pour les zones où la position du plafond de l'aquiclude précédemment considéré n'excède pas la profondeur limite d'investigation.

- Contrôle de la possibilité technique d'exécution des barrages réservoirs

Les reconnaissances géotechniques comporteront éventuellement :
- des sondages mécaniques avec carottage continus, essais d'eau, et peut-être essais mécaniques in situ (SPT, pénétromètre, pressiomètre, etc.) ;
- des galeries de reconnaissance
- des puits de reconnaissance des matériaux de construction et des essais de laboratoire simples sur ces matériaux.

Comme lors de l'étude préliminaire le problème se réduit, quant aux barrages réservoirs, à décider s'ils sont techniquement possibles ou non dans des conditions économiques raisonnables, il est souhaitable de limiter les reconnaissances géotechniques, au minimum indispensable pour répondre à la question posée. Je n'insisterai pas à ce sujet.

- Délimitation et caractérisation des aires élémentaires

Nous disposons maintenant d'une carte des indices géologiques superficiels, et grâce au second filtrage des sites de barrages réservoirs, d'une liste des retenues possibles techniquement dans des conditions économiques raisonnables. A condition de disposer aussi des instructions élémentaires quant aux extensions prévisibles des agglomérations qui peuvent résulter d'une étude démographique sommaire, nous pouvons terminer l'exposé schématique du mode de subdivision des B.V.U. en aires élémentaires, commencé à propos de l'analyse topographique. Cette subdivision se poursuit donc par superposition de la carte des indices géologiques et des limites de finalité, ce qui amène à des frontières "brutes" d'aires élémentaires, avec de nombreuses indentations et enclaves. L'application de règles de simplification de ces frontières analogues à celles qui ont été établies pour la Thessalie au chapitre 6 (point 6.8), permet d'aboutir à un découpage commode des B.V.U. en aires élémentaires.

Tout ceci peut être effectué par des procédures automatiques.

Après la délimitation des aires élémentaires, il devient possible d'attribuer à chacune d'entre elles, toujours au moyen de l'ordinateur, de valeurs significatives de la profondeur du plancher et de l'indice géologique de chaque tranche considérée. De même, on peut leur affecter une instruction de code définissant leur ordre de prise en compte et leurs finalités possibles.

Analyse hydrogéologique

Cette analyse a un triple rôle :

1°/ Elle doit participer à la caractérisation des aires élémentaires, en leur affectant des valeurs des niveaux ou des charges piézométriques des nappes profondes éventuelles.

2°/ Elle doit aussi participer à l'établissement des relations de corrélation entre facteurs utiles et cœfficients de détermination des termes du bilan.

3°/ Elle doit fournir des données sur l'état actuel d'exploitation susceptibles d'être utilisées lors du réglage du modèle hydrologique et hydrogéologique.

- Caractérisation des aires élémentaires

Les reconnaissances nécessaires pour déterminer les facteurs utiles hydrogéologiques, c'est-à-dire les charges ou niveaux hydrostatiques des nappes profondes sont simples :

il suffit de mesurer ces facteurs périodiquement dans les piézomètres installés dans les sondages de reconnaissance géologique profonde cités précédemment, ainsi que dans un certain nombre de sondages ou de puits d'exploitation préexistants. La densité des points de mesure variera selon la nature et l'étendue de la nappe ou des nappes profondes prises en considération et la phase d'étude en cours.

Le résultat de ces mesures est aisément transformable par des procédures automatiques en cartes piézométriques représentatives des pas de temps de la période d'étude et des valeurs caractérisant les aires élémentaires peuvent en être extraites.

- Etablissement des relations de corrélation entre facteurs utiles et cœfficients de détermination des termes du bilan

Il s'agit ici de mettre en place des cellules d'essais destinées à étudier le comportement de l'eau dans la tranche superficielle et les tranches phréatique et profondes du terrain. Selon la tranche étudiée, les cellules devront être distinctes. Examinons-les tour à tour :

1°/ tranche superficielle

Des cellules d'essai destinées à relier les facteurs utiles caractérisant la tranche superficielle et les termes de ruissellement direct, rétention et infiltration directe devront être construites en un nombre réduit d'emplacements choisis avec soin dans la région. Ces emplacements doivent représenter des cas types d'association des facteurs utiles suffisamment bien répartis dans le domaine des associations possibles pour que les relations établies localement puissent être utilisées par interpolation pour l'ensemble de la région. Des indications de principe quant à la conception de ces cellules ont été données au chapitre 8 (point 8.2.2).

2°/ tranches phréatique et profondes

Les reconnaissances et mesures à effectuer auront pour but de relier les débits de prélèvement (ou de rejet) et les niveaux ou charges hydrostatiques des nappes, en fonction des indices géologiques des tranches considérées.

Elles se limiteront donc à l'exécution d'essais de pompage ou d'injection d'eau sur des puits d'essais en nombre limités, localisés avec soin pour pouvoir procéder par interpolation dans l'évaluation des relations de même type pour les autres indices géologiques.

Ces essais sont classiques et je n'insisterai pas à leur sujet.

- Rassemblement de données utiles pour l'exécution des calculs de réglage

Il est rare que l'on dispose de renseignements suffisamment précis sur les quantités d'eau souterraine exploitées dans une région dont l'étude est entreprise. L'utilisation urbaine et industrielle dans l'état actuel peut être connue dans la plupart des cas. Il n'en va pas de même pour les puits privés des exploitations agricoles. Il serait cependant indispensable de connaître ces quantités si l'on veut pouvoir effectuer valablement un réglage du modèle hydrologique et hydrogéologique.

Ceci peut et doit être fait dès l'étude préliminaire. Sur les périmètres irrigués à l'aide d'eau souterraine, on doit sélectionner par un échantillonnage rationnel un certain nombre de puits et y installer dès le début de la phase préliminaire des enregistreurs de débit. L'utilisation de chacun de ces puits sera déterminée avec précision (surface irriguée, nombre de têtes de bétail abreuvées, usages domestiques, etc.) pour chaque pas de temps de la période de mesures.

Les résultats bruts de mesure seront extrapolés à l'ensemble des périmètres d'utilisation de l'eau souterraine sur la base des surfaces totales irriguées et des autres caractères de l'utilisation.

On disposera ainsi de données dignes de foi pour le calcul de réglage.

- Commentaires sur l'analyse hydrogéologique

Les travaux relatifs aux reconnaissances hydrogéologiques sont en général plus coûteux que ceux qui ont été cités précédemment (à l'exception des mesures piézométriques et des mesures de débit d'exploitation). Il faut donc les réduire au minimum compatible avec la précision exigée pour l'étude. On pourrait aisément traiter les informations que donneront ces reconnaissances sans avoir recours à l'ordinateur. Il ne faut cependant pas perdre de vue que ces données doivent s'intégrer dans un modèle,

et quel que soit le mode adopté pour le traitement de l'information, il faut exprimer les résultats finals en termes utilisables par l'ordinateur.

- Etudes agronomiques

Les études agronomiques jouent un rôle à plusieurs niveaux dans la mise au point et l'utilisation du modèle hydrologique et hydrogéologique :

1°/ elles doivent permettre de définir des indices agronomiques et participent ainsi à la caractérisation des aires élémentaires ;

2°/ c'est elles qui délimitent les intervalles dans lesquels les paramètres d'utilisation agricole de l'eau peuvent être choisis pour chaque pas de temps ;

3°/ elles définissent les surfaces irriguées et les consommations agricoles de l'eau dans l'état actuel de la région ;

4°/ l'agronomie joue un rôle aussi dans les cellules expérimentales relatives à la tranche superficielle et à la mesure de l'interception, dont il est question au sujet des études et mesures hydrogéologiques et climatologiques. Je n'insisterai pas à ce sujet et laisserai aux spécialistes le soin de décrire les opérations et études nécessaires.

- Etudes et mesures climatologiques

La climatologie intervient elle-aussi à plusieurs niveaux dans l'élaboration et l'utilisation du modèle hydrologique et hydrogéologique :

1°/ détermination des facteurs utiles que sont l'indice climatique, la quantité globale des précipitations et la température de l'air ;

2°/ participation aux cellules expérimentales destinées à rechercher les relations entre facteurs utiles et cœfficients de détermination des termes du bilan.

La détermination des quantités globales de précipitations et de la température de l'air peut fort bien être effectuée sur la base des données existantes au début de l'étude préliminaire, ainsi que nous avons pu le constater à propos de la Thessalie. Ceci ne sera pas toujours le cas et la répartition des stations pluviométriques et thermométriques ne sera pas toujours suffisamment dense et homogène pour que ces facteurs utiles soient déterminés avec toute la précision nécessaire lors des phases ultérieures de l'étude. Il faudra donc installer de nouvelles stations de mesure de ces deux facteurs utiles et ceci sera fait autant que possible dès le début de l'étude préliminaire. En effet, même si l'on ne dispose des résultats que pour une année, la précision des isohyètes et des isothermes sera déjà meilleure que sans ces résultats. Et comme l'avant-projet succèdera aussi rapidement que possible à l'étude préliminaire, il est indispensable de commencer ces mesures climatologiques dès le début de l'étude préliminaire, si l'on veut disposer d'un nombre suffisant d'années de mesures lors de l'étude d'avant-projet.

Ceci est vrai aussi pour les mesures des facteurs agissants, (quantité et intensité de la pluie, de la neige, humidité de l'atmosphère, agitation de l'atmosphère) qui doivent être effectuées en un nombre moindre de stations afin de déterminer les indices climatiques. Ces facteurs agissants doivent de toute manière être mesurés aux stations attenantes aux cellules expérimentales destinées à rechercher les relations entre facteurs utiles et cœfficients de détermination des termes du bilan. Et des mesures complémentaires d'évaporation directe et d'interception doivent aussi y être effectuées.

En résumé, il sera indispensable, en général, de compléter le réseau existant de stations de mesures climatologiques dès le début de l'étude préliminaire, et de poursuivre les mesures selon des procédés homogènes sur l'ensemble du réseau durant toute l'étude, et même au-delà si l'on veut utiliser le modèle hydrologique et hydrogéologique comme outil de régulation en cours d'exploitation.

Je n'insisterai pas sur les procédures automatiques de traitement des données climatologiques, qui est en passe de devenir classique.

- Etudes hydrologiques

Ces études et mesures interviendront à deux niveaux dans l'élaboration et le fonctionnement du modèle :

1°/ elles joueront un rôle dans la recherche des relations entre facteurs utiles et coefficients de détermination des termes du bilan dans le réseau hydrographique. Ceci se traduira par la sélection de petits bassins versants expérimentaux à proximité immédiate des cellules d'étude de la tranche superficielle et de la tranche phréatique, à l'aval desquels on installera une station limnigraphique dès le début de l'étude préliminaire ;

2°/ Et surtout, elles seront nécessaires lors du réglage du modèle. Les données préexistantes seront certainement utiles à cet effet, mais il sera probablement indispensable de les compléter en installant dès le début de l'étude préliminaire des stations de jaugeage limnigraphiques en un certain nombre de points de contrôle judicieusement choisis(en un certain nombre de sources, et en quelques points de fermeture des groupes de B.V.U., sur le réseau hydrographique).

Dans le cas des études hydrologiques, le traitement automatique de l'information est presque devenu une méthode classique et je ne m'y attarderai pas.

- Etudes socio-économiques, de génie civil et rural, d'hydraulique urbaine et industrielle, etc.

Il a été question, en divers endroits de cet exposé de ces multiples disciplines. Elles jouent donc un rôle dans l'élaboration des modèles hydrologiques et hydrogéologiques. Il ne faut cependant pas confondre ces modèles de simulation du comportement de l'eau et les modèles d'optimalisation agro-socio-économique qui leur font logiquement suite, dans une étude régionale.

Ces diverses disciplines n'interviennent dans les modèles hydrologiques et hydrogéologiques que pour fixer en première approximation des critères de choix :

- limite d'intérêt économique de construction des barrages ;
- limite d'intérêt économique d'aménagement agricole d'une zone ;
- surface à attribuer aux extensions urbaines et industrielles ;
- ordre de grandeur des consommations en eau et des rejets spécifiques en matière d'urbanisme et d'industries ;
- etc.

Ces critères seront en général déterminés par les spécialistes sur la base de normes usuelles et d'une première enquête locale approximative.

Je ne m'attarderai pas sur cet aspect de la question qui a d'ailleurs été esquissé au cours de l'exposé.

Nécessité de la méthode

Voilà donc résumés le principe de la méthode globale de calcul du bilan et le schéma des études, reconnaissances et autres démarches nécessaires pour la mettre en œuvre dans une région déterminée. Cette méthode est logique. Elle permet d'aboutir à des résultats déjà très précis dès l'étude préliminaire.

De ce fait, elle peut paraître séduisante. La possibilité de réutiliser le modèle hydrologique et hydrogéologique dans les phases ultérieures de l'étude, et même en cours d'exploitation de l'aménagement, moyennant certaines adaptations non fondamentales accroissent son intérêt.

Mais cette méthode globale ne peut être mise en œuvre que moyennant des investissements déjà importants dès l'étude préliminaire. Pour la Thessalie, j'ai estimé que cet investissement aurait été de l'ordre du triple de celui qui a été nécessaire lors de l'étude réelle effectuée par Electro-Watt. J'ai aussi indiqué qu'il était souhaitable de l'étayer sur les résultats de deux années de mesures climatologiques et hydrologiques complémentaires, ce qui amène pour l'étude préliminaire, à un délai minimal de 3 ans à 3 ans et demi.

Alors, on peut se demander si ceci est réellement nécessaire, si ce n'est pas un luxe de rechercher une telle précision, et si ces investissements sont rentables.

Lors de l'étude réelle, j'ai effectué un calcul de bilan beaucoup plus grossier que celui qui est proposé ici, et pourtant, il a permis d'apporter une réponse à mon avis satisfaisante au problème posé

par le Ministère des Travaux Publics du Royaume de Grèce. A l'issue de l'étude réelle, nous pouvions affirmer sans grands risques d'erreurs, qu'il était rentable d'aménager 160 000 hectares en vue de leur irrigation à partir de 5 barrages réservoirs clairement définis et dont les caractéristiques étaient déjà très nettement esquissées. Nous pouvions aussi retenir deux sites de barrages réservoirs complémentaires destinés à compléter éventuellement l'alimentation en eau de certains périmètres d'irrigation et de certaines agglomérations. Ces deux sites complémentaires pouvaient donc être considérés comme des "soupapes de sécurité" du système d'aménagement proposé. Et enfin nous pouvions affirmer, sans grands risques d'erreurs, qu'il était possible d'irriguer de manière rentable 160 000 hectares au moyen d'eaux souterraines.

Alors, à quoi bon chercher à appliquer des méthodes très élaborées, et très coûteuses, quand une étude plus simple permet de répondre aux questions posées ?

Un examen plus attentif du problème posé et des réponses qui y ont été apportées permettra d'en juger.

Dans le cas de la Thessalie, le problème posé ne portait que sur l'aménagement des plaines de Thessalie - en exceptant d'ailleurs certains périmètres étudiés d'autre part sans qu'il y ait eu au préalable une recherche d'optimisation de l'aménagement de ces périmètres - Il n'était pas question d'étudier l'aménagement des zones de montagnes. Les problèmes de reboisement, d'aménagements touristiques des montagnes, d'industries du bois (scieries, usines de pâte de cellulose, bois reconstitué, etc.) n'étaient pas mentionnés. Or un reboisement, et les industries connexes, qui sont grosses consommatrices d'eau, risquent de modifier notablement les conditions d'écoulement à l'aval des forêts.

N'en pas tenir compte dans l'étude préliminaire d'aménagement, c'était décider de limiter la possibilité d'un reboisement des montagnes, ou risquer de ne plus disposer des quantités d'eau prévues et nécessaires à l'aval - sauf construction de barrages complémentaires - si l'on décidait malgré tout de procéder à un reboisement intensif.

Le problème ne se posait peut-être pas avec une telle acuité pour la Thessalie, encore que bien des zones de taillis pourraient être transformées en forêts de coupe, dans le Pinde et les montagnes cristallines du Nord.

Je n'insisterai pas à ce sujet. Mais on peut déjà voir que le problème n'était pas posé de manière équilibrée et que de nombreuses questions relatives à un aménagement intégré de la région restent posées pour le moment. S'il était décidé d'en chercher la réponse, de nouvelles études seraient nécessaires et rien ne permet d'espérer que la somme des investissements nécessaire pour ces études nouvelles et l'étude réelle (sans parler des études effectuées précédemment à l'étude réelle) serait inférieure au montant nécessaire pour aborder l'étude régionale de manière globale, selon la méthode exposée ici.

De plus, l'exécution d'études successives et mal coordonnées, portant chacune sur une partie du problème risque fort d'aboutir à des résultats contradictoires, ou en tous cas difficilement conciliables. Ceci a été prouvé en Thessalie où certaines conclusions de l'étude effectuée par Electro-Watt ont remis en cause les propositions résultant d'études antérieures (projet d'aménagement de la plaine de Karla en particulier (NIKOLAIDIS-1964) Avant-projet d'aménagement de la Thessalie (EFPALINOS-ETEM - 1963).

L'avantage d'une étude effectuée de manière analogue à l'étude "réelle" sur une étude globale effectuée selon la méthode proposée ici n'est donc pas si évident qu'il y paraissait à première vue.

Si maintenant nous examinons plus en détail les résultats, nous pouvons nous rendre compte que dans l'étude réelle, il subsiste un doute important quant à la position exacte des zones irrigables à l'aide d'eaux souterraines et que les limites indiquées pour ces zones sont très imprécises. Pour les déterminer avec une précision suffisante pour qu'il ne subsiste plus aucun doute quant à l'organisation de l'irrigation dans les plaines de Thessalie, il faut encore procéder à des études et reconnaissances dont la durée sera vraisemblablement supérieure à deux ou trois ans et dont le coût sera loin d'être négligeable.

La méthode globale telle qu'elle est proposée ici, aurait permis de fixer ces limites avec une précision suffisante dès l'étude préliminaire.

Alors, que devient la comparaison esquissée plus haut entre une étude telle que l'étude réelle et une étude effectuée selon la méthode globale ?

Nous avons d'un côté une étude répondant correctement à un problème posé de manière partielle, mais qui risque pourtant de se trouver en contradiction avec les éventuelles études ultérieures devant répondre séparément aux autres parties du problème d'aménagement intégré de la région. Cette étude présente d'autre part des imprécisions assez grandes quant à la position des périmètres à irriguer avec de l'eau de telle ou telle provenance. Et les délais cumulés de ces différentes études partielles risquent d'être assez importants.

De l'autre côté, nous avons une étude unique, qui répond en trois ans et demi environ à l'ensemble des problèmes posés par l'organisation et l'aménagement de la région, et dont les conclusions ne risquent guère d'être remises en cause, si elle a été effectuée correctement. Cette étude globale ne coûte probablement pas plus que le total des études partielles qui seraient nécessaires pour répondre aux mêmes questions. Elle pourra se prolonger au moyen d'études analogues, sans risque de discordances, dans les phases d'avant-projet, puis de projet d'exécution de tout ou partie de l'aménagement proposé, et même plus loin, en tant qu'outil de régulation en cours d'exploitation.

Je laisse au lecteur le soin de décider, des deux possibilités, sur laquelle se portera son choix. Mais à une époque où l'exploitation rationnelle des ressources naturelles, la production régulée de produits agricoles, en fonction de besoins croissants, et la protection de l'environnement sont des questions cruciales pour la survie de l'espèce humaine, le doute ne me semble pas permis.

Il y a certes de nombreuses imperfections dans la méthode proposée ici. Des recherches ultérieures basées sur des applications réellement possibles de cette méthode permettront sans doute de l'alléger, de la perfectionner. Il reste d'autre part un certain nombre de points à préciser, de méthodes annexes à mettre au point, en particulier dans le domaine de l'informatique. Mais je crois être allé au bout de ce que je pouvais faire seul, dans la recherche d'une solution au problème de l'organisation de l'eau dans une région et terminerai ici cet exposé.

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

Vu,
Grenoble, le
le Président de la thèse

R. BARBIER

Vu, et permis d'imprimer,
Grenoble, le
le Président de l'Université
Scientifique et Médicale

M. SOUTIF

295142
1971
106/2 DOUBLE

Doctorat d'Etat
N° d'ordre

THESE

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de DOCTEUR ES-SCIENCES NATURELLES

par Yves BAJARD, Ingénieur Hydraulicien des Ecoles Nationales
Supérieures d'Ingénieurs de Grenoble

CONTRIBUTION A LA RECHERCHE METHODOLOGIQUE D'ETABLISSEMENT DES

BILANS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES REGIONAUX ET SUB-REGIONAUX

Soutenue le 29 Juin 1971, devant la Commission d'examen:

Président: R.BARBIER, Professeur

Examinateurs: R.MICHEL, Professeur
G.VACHAUD, Chargé de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique

T. 71 /967

TOME 2 : PLANCHES

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

DOUBLE
05.142
1971
106/2

BASSIN VERSANT DE
DHESKATI VALANIDHA
Exemple de base

MER EGEE

MER MEDITERRANEE

GRECE

Thessalie

USSA

MAVROVOUNI

sikourion

karla

thessalie orientale

VOLOS

Mesohori

TITARISSIOS

PINIOS

Ladhon

KHASSIDONION

Cours d'eau selon importance

KARDITSA

thessalie occidentale

PINDE SEPTENTRIONAL

PINDE MERIDIONAL

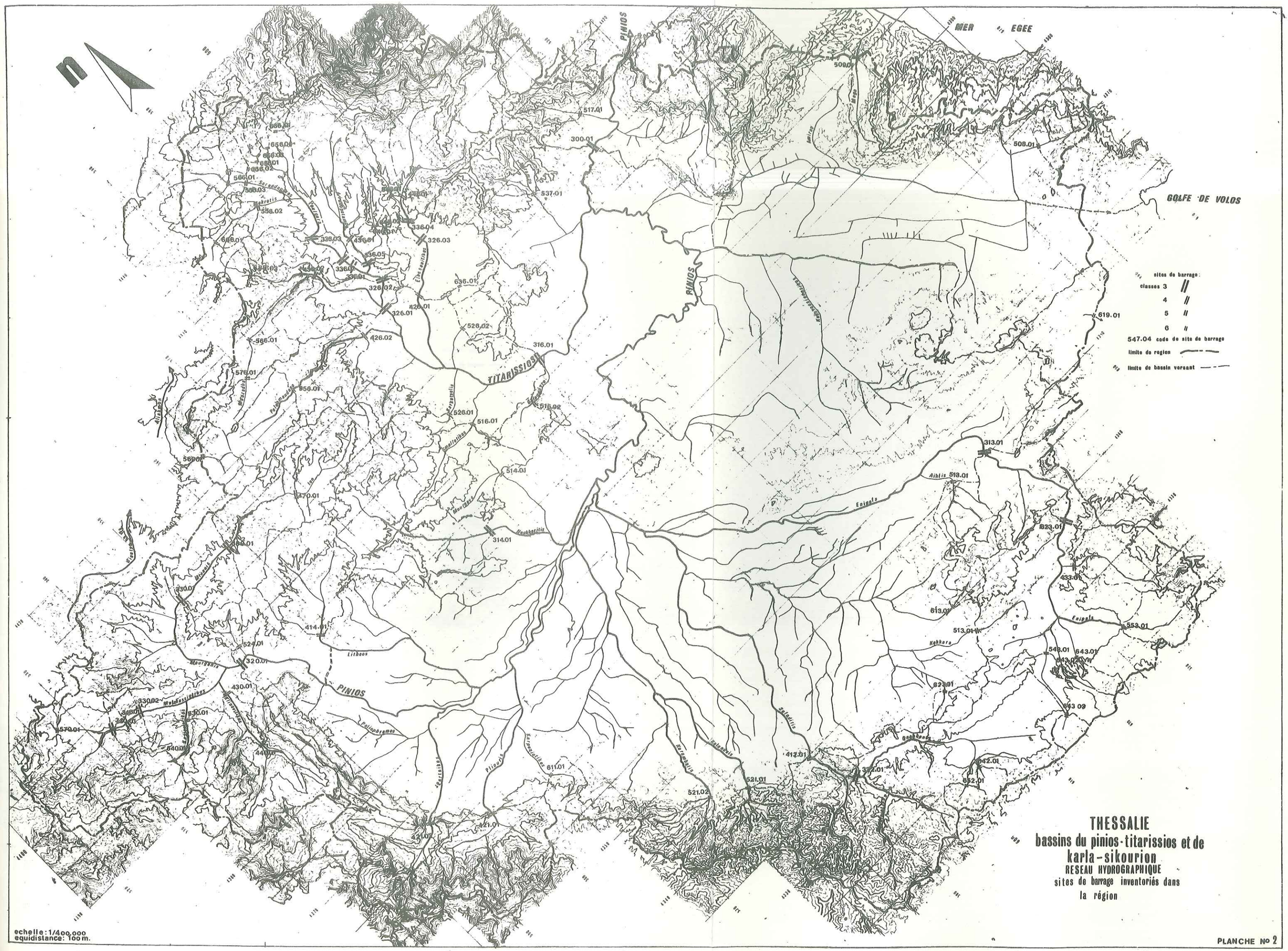
OTHRIS

Echelle: 1/400 000

Equidistance: 100m

THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion
situation générale-réseau hydrographique-agglomérations

PLANCHE N° 1


N
MER EGEE
GOLFE DE VOLOS
PINIOS
TITARISSIOS
Aihlis
Enipeas
Litheos
Mavrozoumenas
Palaiopanagia
Mavrozoumenas
Mourganis
Kokkoris
Sofaditis
Pelinaiotikos
Mavropotamos
Mouzakis
Mavrozoumenas
Mavrozoumenas
Mavrozoumenas

MER EGEE

GOLFE DE VOLOS

PINIOS

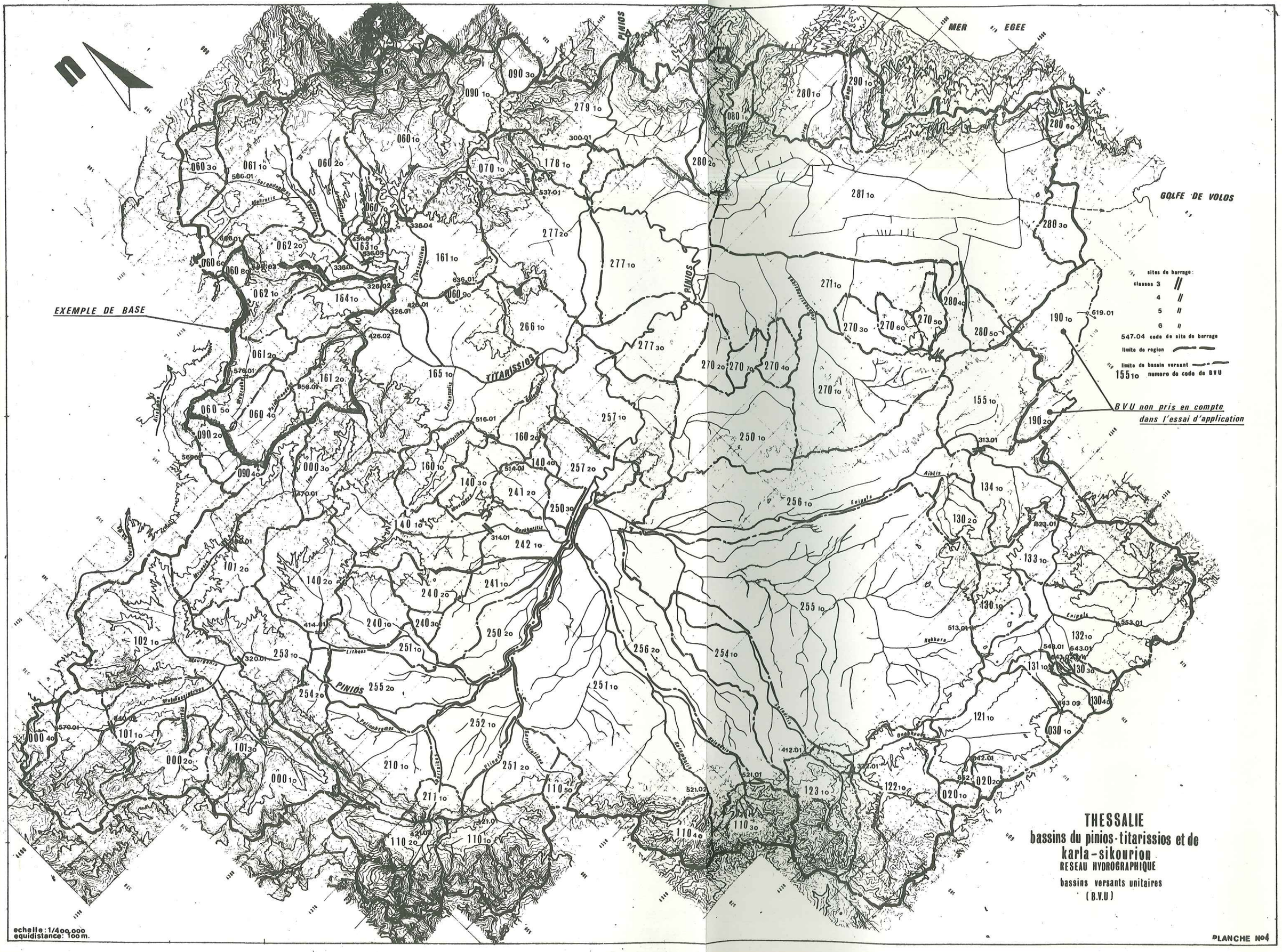
TITARISSIOS

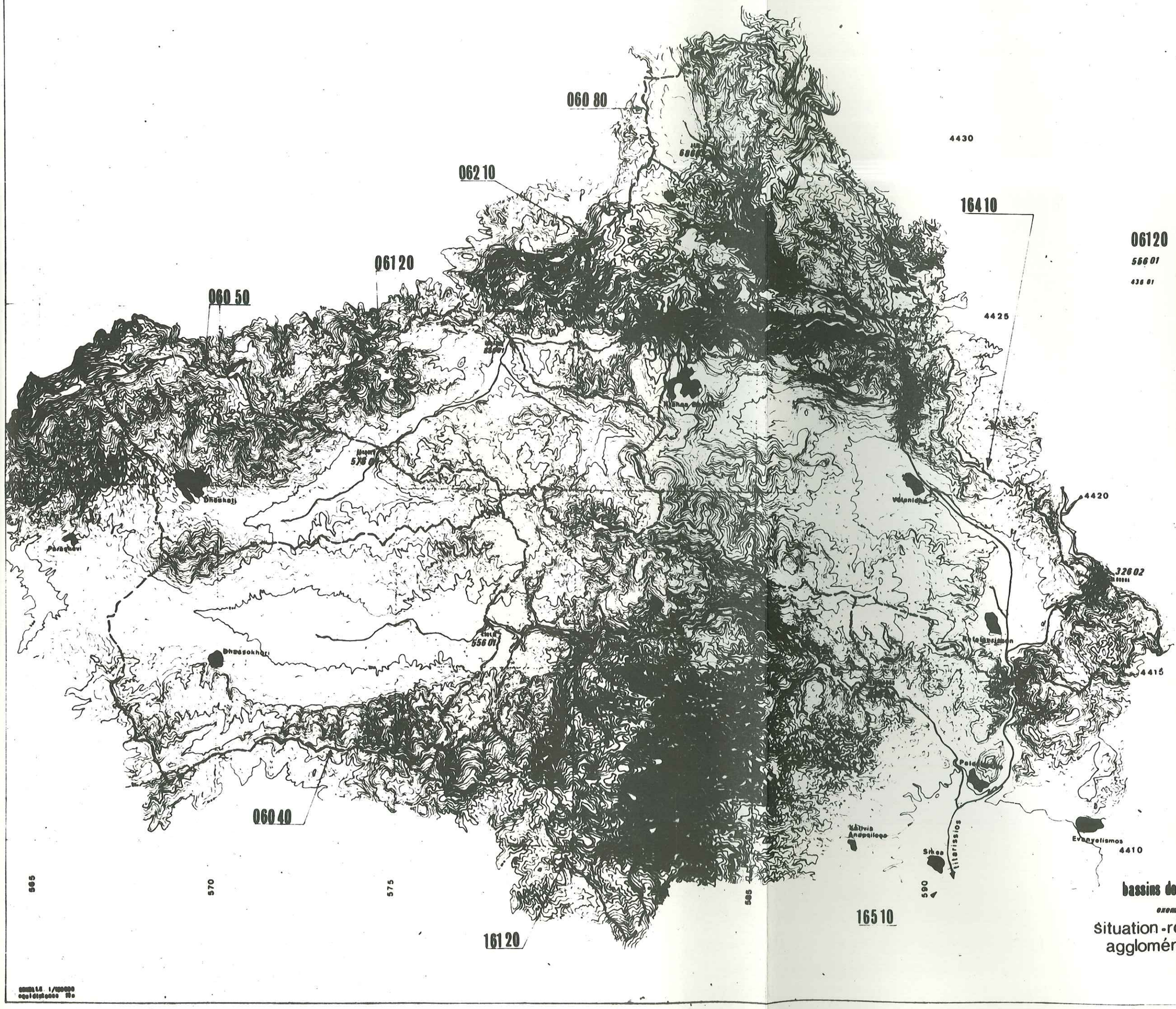
sites de barrage :
classes 3
4
5
6
547.04 code de site de barrage
limite de region
limite de bassin versant

THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion
RESEAU HYDROGRAPHIQUE
sites de barrage restant aprés la première élimination

échelle : 1/400 000
equidistance : 100 m.

PLANCHE N°3


N
MER EGEE
GOLFE DE VOLOS
PINIOS
TITARISSIOS
EXEMPLE DE BASE
BVU non pris en compte dans l'essai d'application
sites de barrage:
classes 3
4
5
6
547.04 code de site de barrage
limite de region
limite de bassin versant
155 1o numero de code de BVU
THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion
RESEAU HYDROGRAPHIQUE
bassins versants unitaires
(B.V.U)
echelle: 1/400.000
equidistance: 100 m.



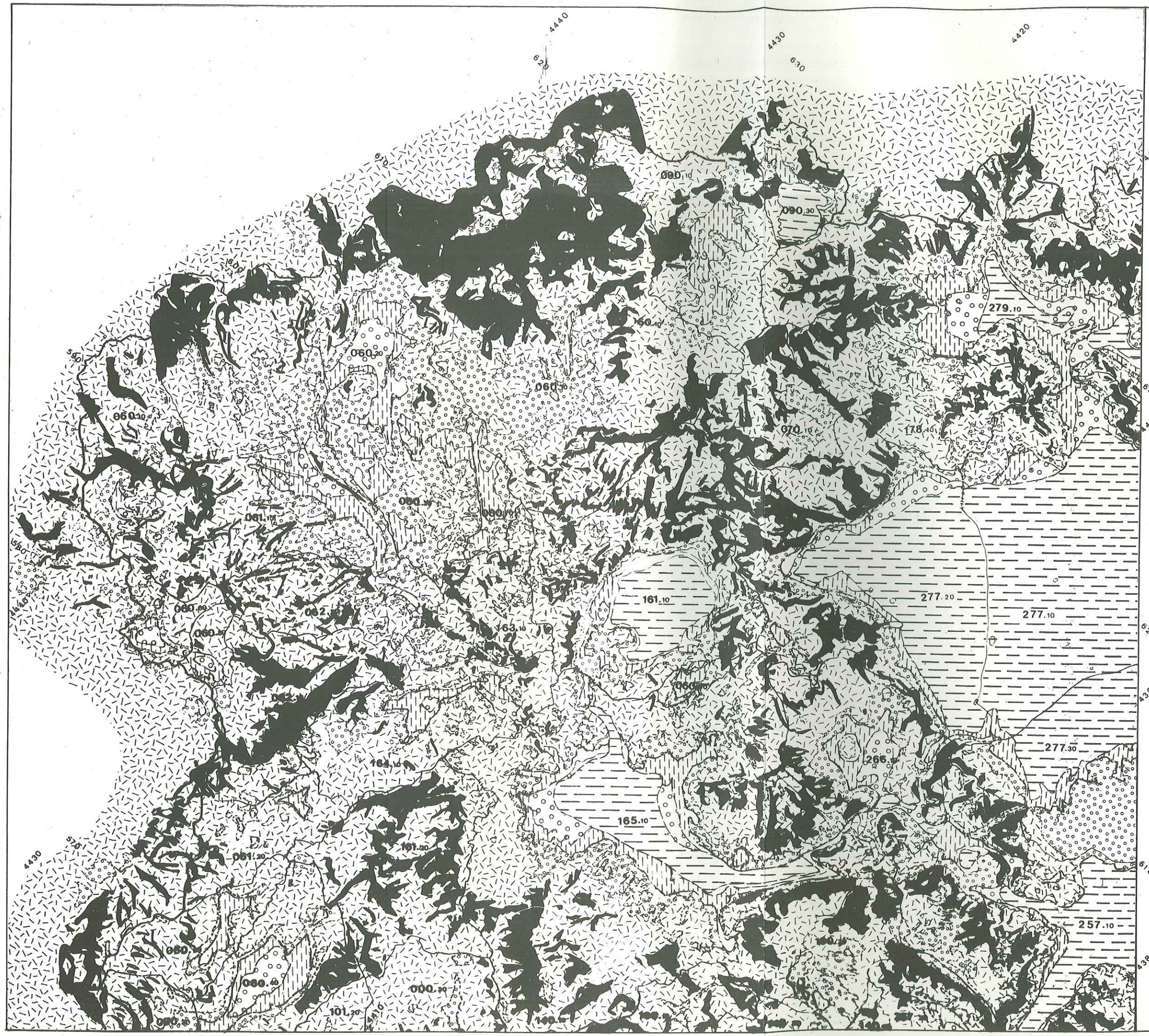
THESSALIE

bassins de dheskati et volanidha

exemple de base

situation-réseau hydrographique
agglomérations-barrages-b.v.u

échelle 1/50000
équidistance 10m



THESSALIE

bassins versants du pinios-titarissios et de karla-sikourion

CARTE DES PENTES ET DES BASSINS VERSANTS

0 1 2 3 4 5 Km

Echelle 1/200 000

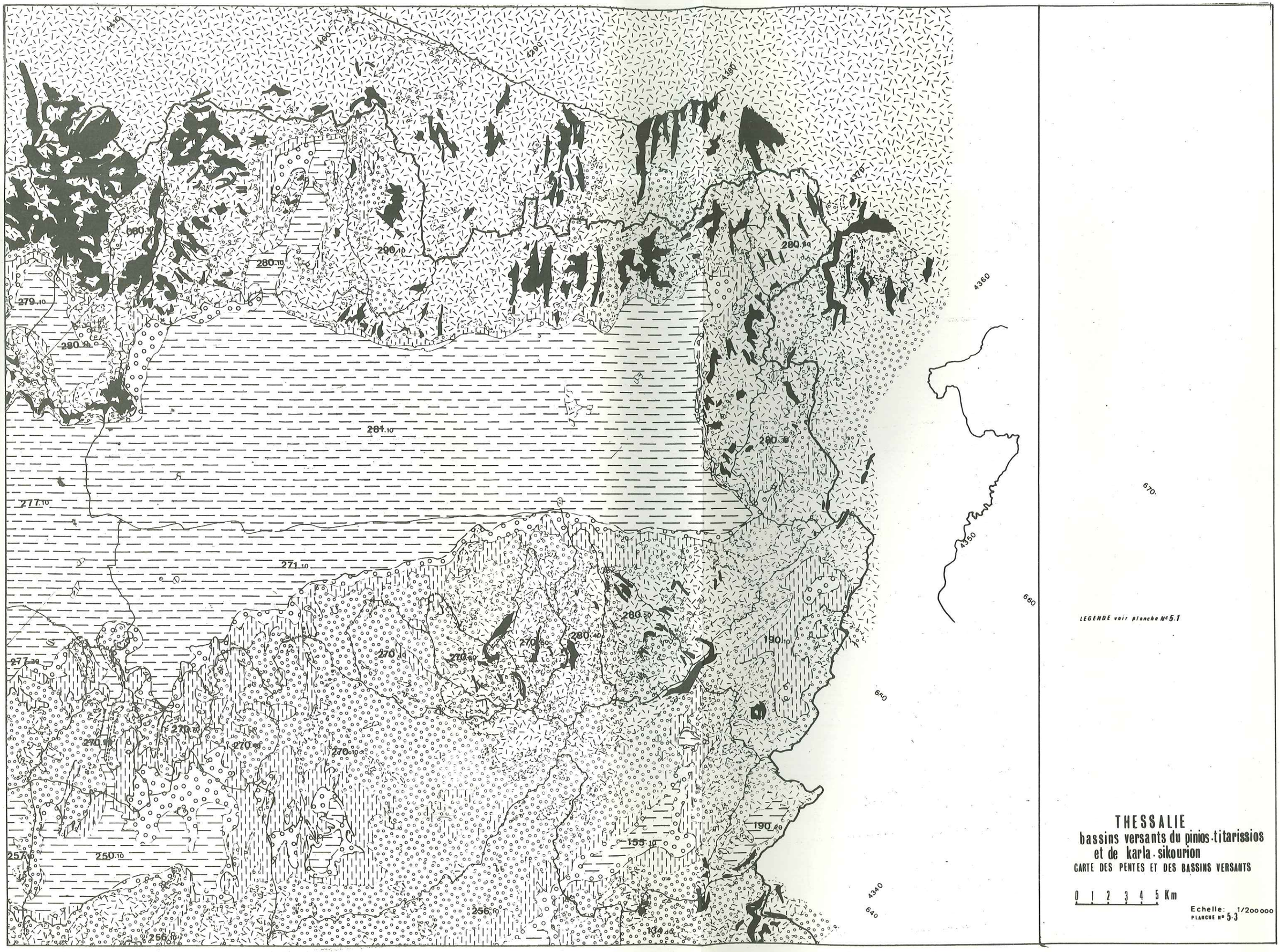
PLANCHE Nº 51

LEGENDE
voir planche N° 5.1

THESSALIE
bassins versants du pinios-titarissios et de karla-sikourion
CARTE DES PENTES ET DES BASSINS VERSANTS

0 1 2 3 4 5 Km
échelle: 1/200 000

PLANCHE N° 5,2


4410
4400
4390
4380
4370
4360
4350
4340
680.10
290.10
280.10
279.10
280.20
281.10
280.10
277.10
271.10
277.20
270.40
270.60
270.80
270.60
270.80
270.40
280.50
280.40
270.60
270.10
270.80
270.40
270.60
270.80
270.80
270.60
270.80
270.40
270.60
270.80
270.80
270.60
270.80
270.40
270.60
270.80
270.80
270.60

LEGENDE voir planche N° 51

THESSALIE

bassins versants du pinios-titarissios et de karla-sikourion

CARTE DES PENTES ET DES BASSINS VERSANTS

0 1 2 3 4 5 Km

echelle: 1/200000

PLANCHE N° 54

4430

4425

4420

4415

4410

565

570

575

585

590

ECHELLE DES PENTES

0 - 2 %

2 - 5

5 - 10%

10 - 20%

20 - 40 %

plus de 40 % de pente moyenne

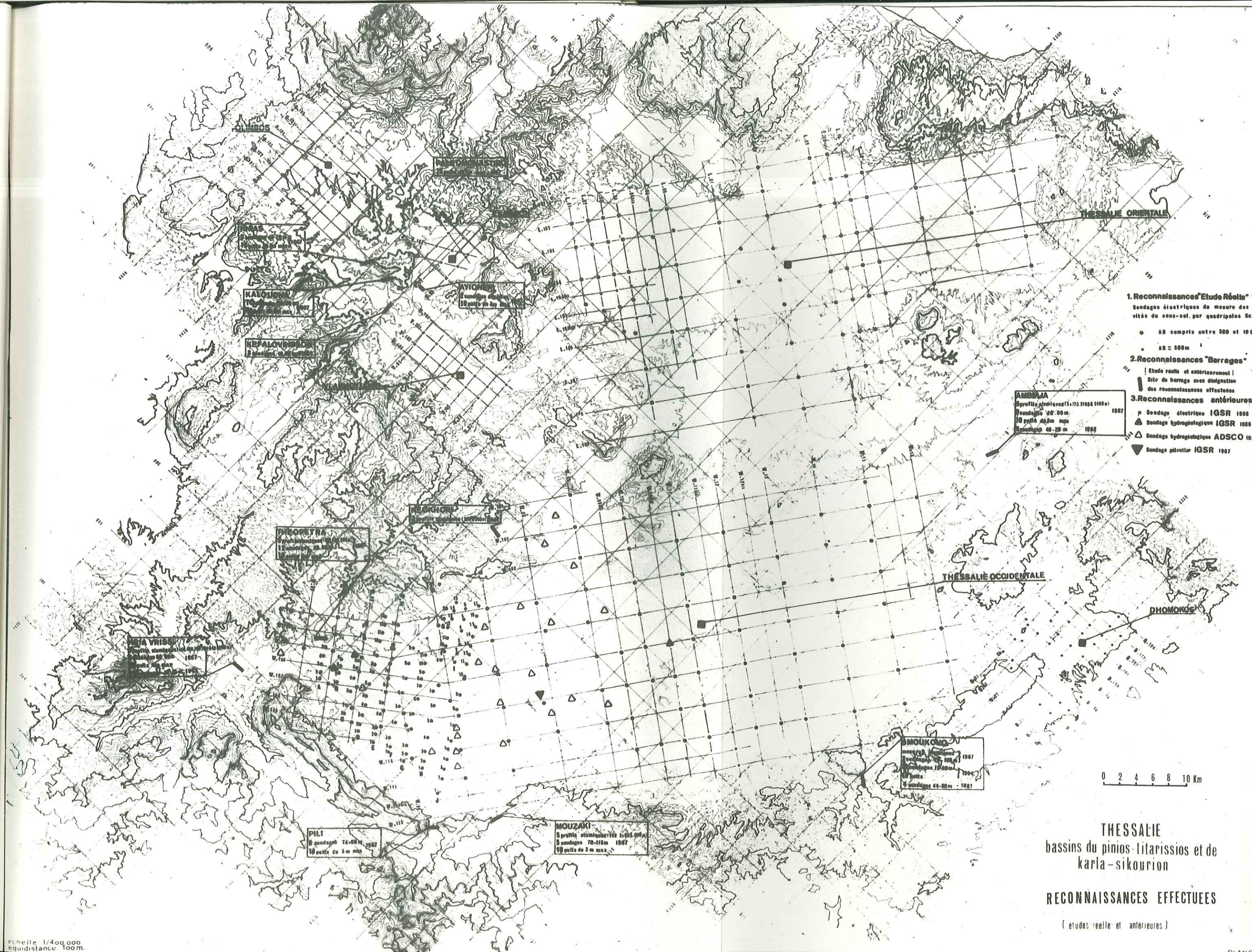
ECHELLE 1/100000
équidistance 20m

THESSALIE
bassins de dheskati et valanidha

exemple de base

carte des pentes

PLANCHE N°5.e



THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion

RECONNAISSANCES EFFECTUEES

(etudes reelle et anterieures)

echelle 1/400.000
equidistance 100m.

Sondages électriques de mesure des résistivités du sous-sol par quadripoles Schlumberger

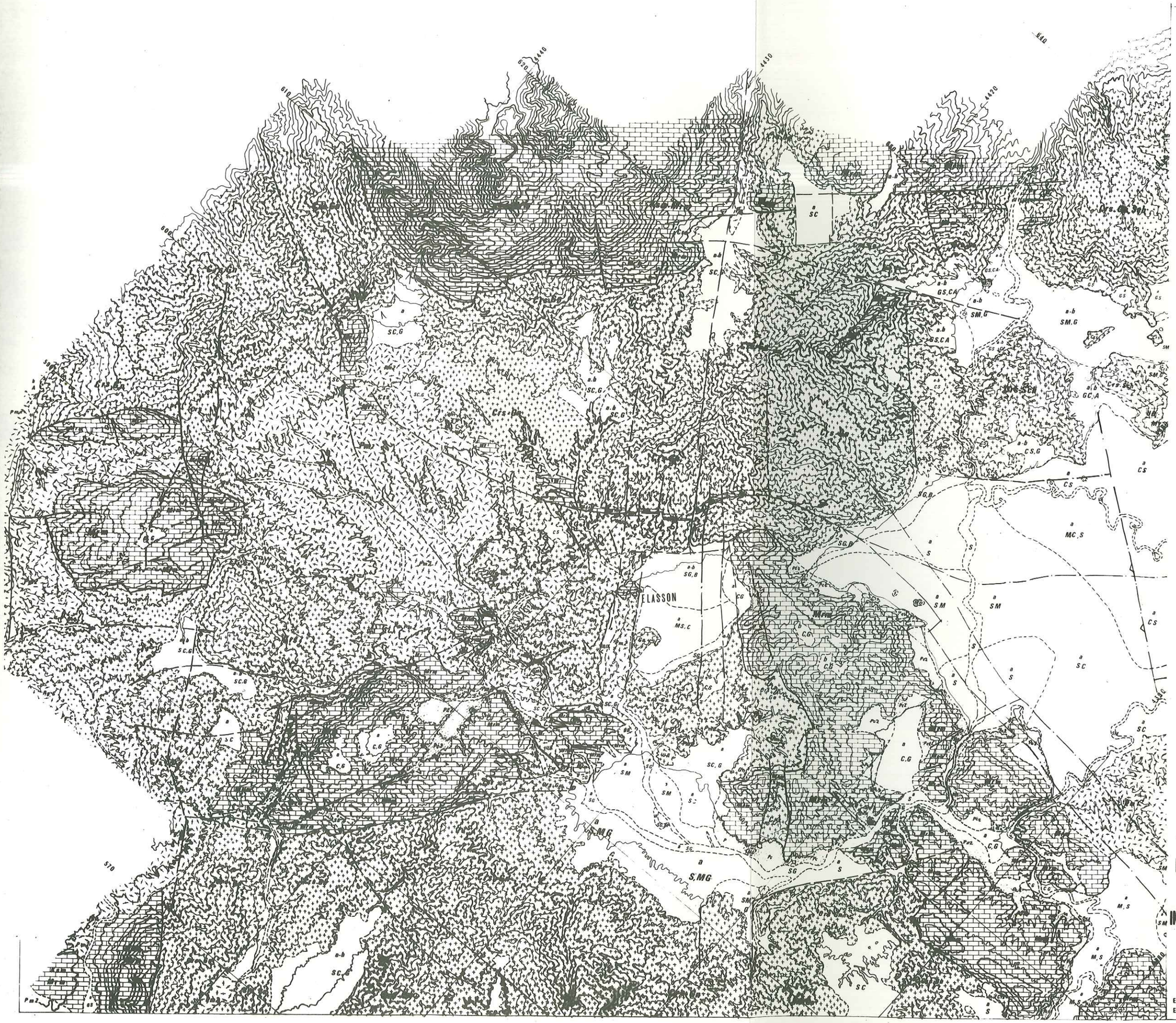
- AB compris entre 500 et 10 000 m
- AB = 500 m
- 35 Résistivité en ohm m avec signes +, -, + -, - + indiquant une croissance ou décroissance plus ou moins accentuée en dessous
- Limite entre roches dures – y compris Pal Pol & Pol – et terrain meuble – y compris Pal Pal& Pal – –
- Limite entre terrains meubles d'indices géologiques superficiels différents
- 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Indices géologiques superficiels de terrains meubles selon B.G.I
- Cours d'eau principal avec indication des tronçons alimentant les eaux souterraines

0 2 4 6 8 10 Km

THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion
INDICES GEOLOGIQUES SUPERFICIELS (TERRAIN MEUBLE)

RESISTIVITES SUPERFICIELLES
(0 à 10 m)

échelle : 1/400 000
équidistance : 100 m.



légende

Contact géologique normal

Pendage

Failles
- observées
- supposées
- déduites des résultats des reconnaissances géophysiques

Axes tectoniques déduits des reconnaissances géologiques et géophysiques
- anticlinal
- synclinal
- flexure

Les symboles géologiques employés sont ceux de l'échelle stratigraphique de référence, tableau 6.4.1.3

INDICES GEOLOGIQUES SUPERFICIELS EN TERRAIN ROCHEUX

1R

2R

3R

4R

5R

THESSALIE

bassins versants du pinios-titarissios et de karla-sikourion

INDICES GEOLOGIQUES SUPERFICIELS (ROCHE) CARTE GEOLOGIQUE

Echelle 1/200000
Equidistance 100 m

THESSALIE

bassins versants du pinios-titarissios et de karla-sikourion

INDICES GEOLOGIQUES SUPERFICIELS (ROCHE)
CARTE GEOLOGIQUE

Echelle 1/200 000
Equidistance 100 m

LEGENDE : voir planche n° 8.1

THESSALIE

bassins versants du pinios-titarissios et de karla-sikourion

INDICES GEOLOGIQUES SUPERFICIELS (ROCHE) CARTE GEOLOGIQUE

Echelle 1/200000
Equidistance 100 m

LEGENDE: voir planche n° 8.1

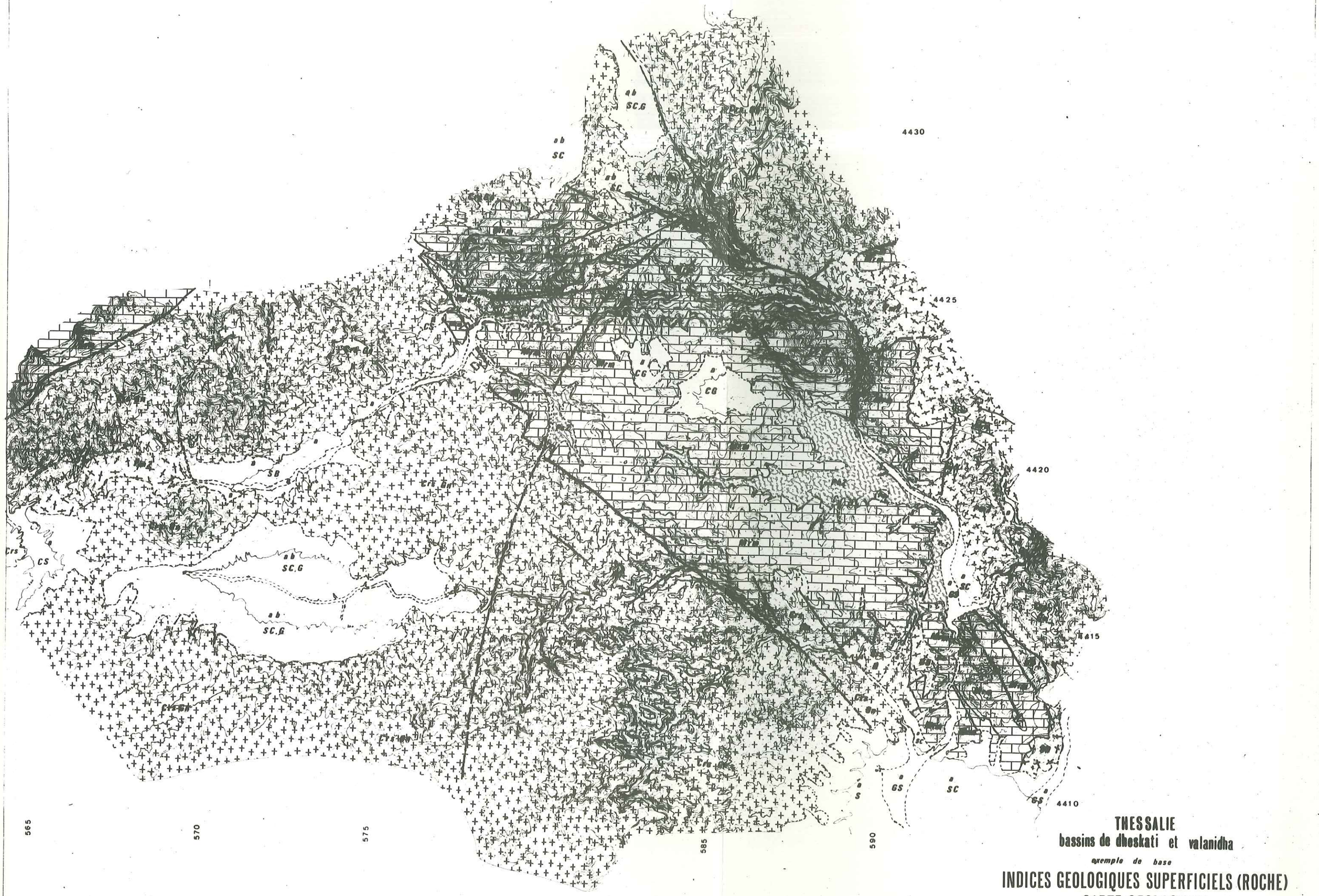
THESSALIE

bassins versants du pinios-titarissios et de karla-sikourion

INDICES GEOLOGIQUES SUPERFICIELS(ROCHE) CARTE GEOLOGIQUE

Echelle 1/200000
Equidistance 100 m

planche n° 8.4



THESSALIE
bassins de dheskati et valanidha

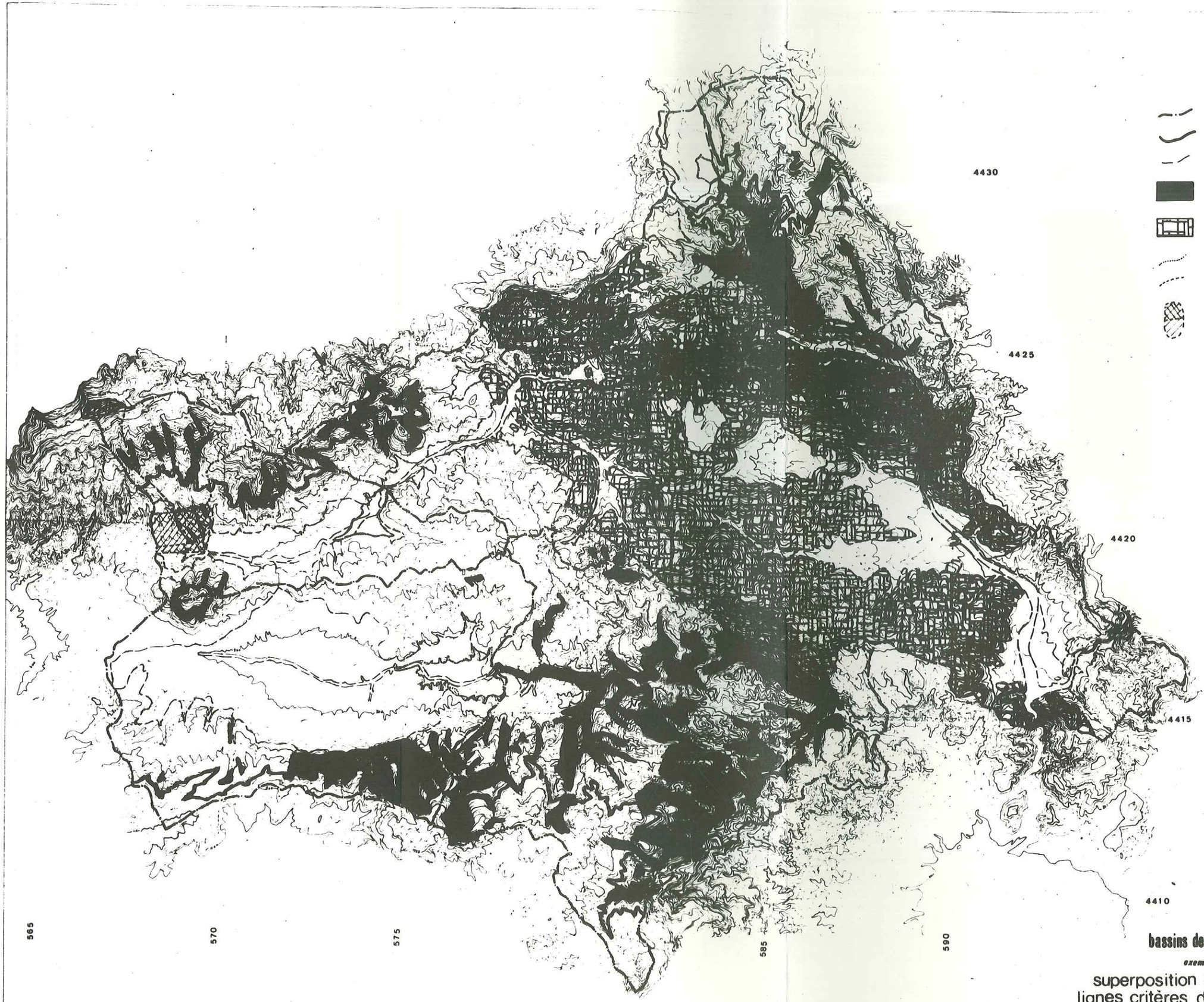
exemple de base

INDICES GEOLOGIQUES SUPERFICIELS (ROCHE)
CARTE GEOLOGIQUE

LEGENDE : voir echelle stratigraphique de référence

ECHELLE 1/100000
equidistance 20m

PLANCHE N°8.e



limite de B.V.U

courbe de niveau 1000 m

limite entre zones d'indices geologiques differents (superficiels)

zone de pente superieure a 40%

zone d'affleurements géologiques non amenageables (calcaires)

limite d'aire hydrographique possible

limite d'aire urbaine et industrielle & lignes de crête connexes

aire urbaine & industrielle { actuelle / potentielle

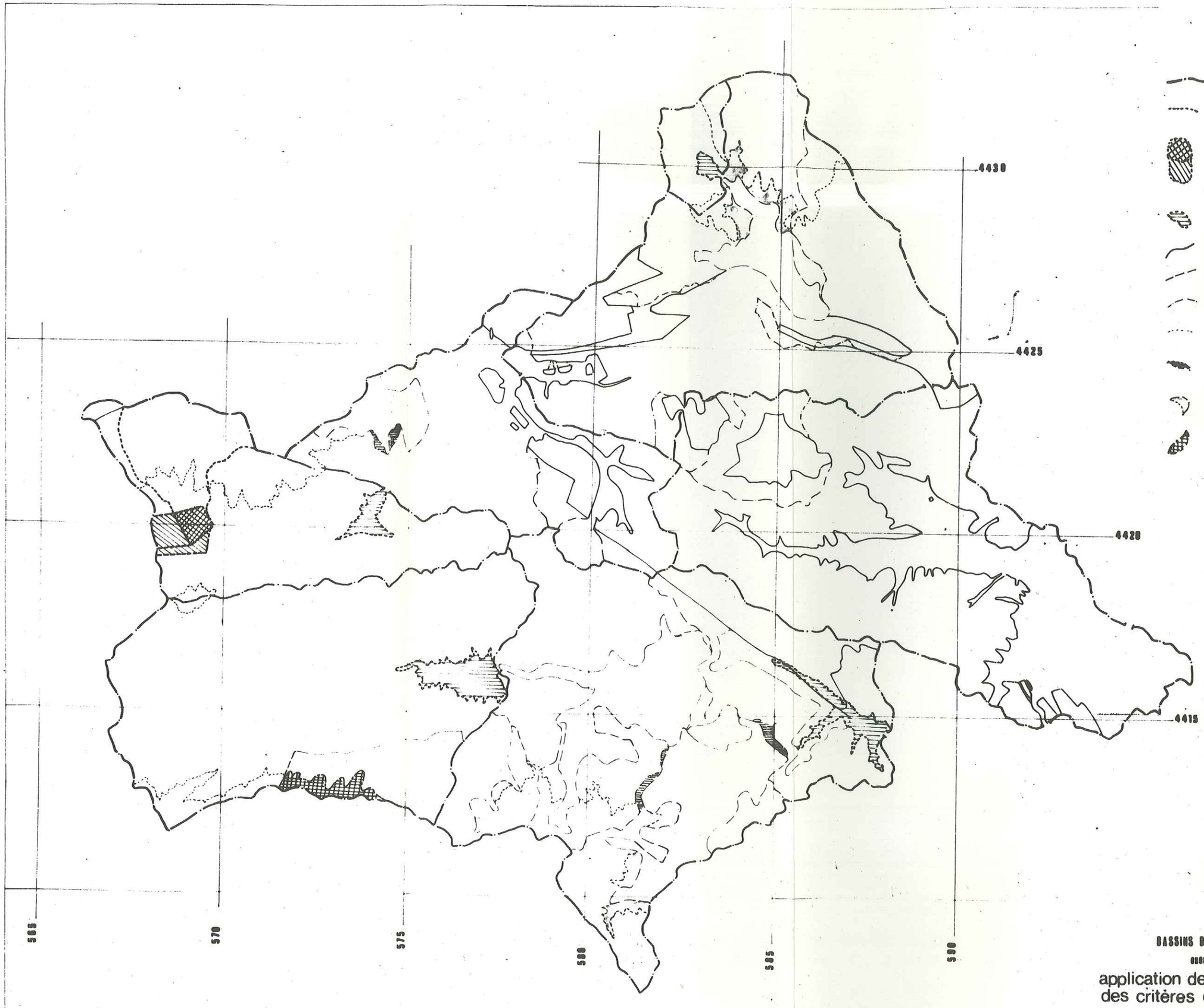
ECHELLE 1/100000
equidistance 20 m

THESSALIE
bassins de dhoskati et valanicha

exemple de base

superposition des tracés bruts des
lignes critères de subdivision des b.v.u

PLANCHE Nº 9.e.1



Limite de B.V.U

Limite d'aire hydrographique possible urbaine et industrielle et lignes de crête connexes

Aires urbaines et industrielles — actuelle / potentielle

Aire hydrographique possible

Limite entre les terrains d'indice géologique superficiel 8R et les autres

Limite entre zones de classes de pente 6 et inférieures dans des terrains d'indice géologique superficiel 4R après application des règles 1, 2, 3 et 4 (point 6 8 1 2)

Ligne de crête connexe des 2 limites précédentes

Courbe de niveau 1000m dans les zones en principe aménageables

Surface assimilée à la zone non aménageable par application de la règle 6 (point 6 8 1 2)

Surface assimilée à la zone boisable par application de la règle 5 (point 6 8 1 2)

Surface assimilée à la zone boisable par application de la règle 7 (point 6 8 1 2)

THESSALIE

BASSINS DE DHESKATI ET VALANIDHA

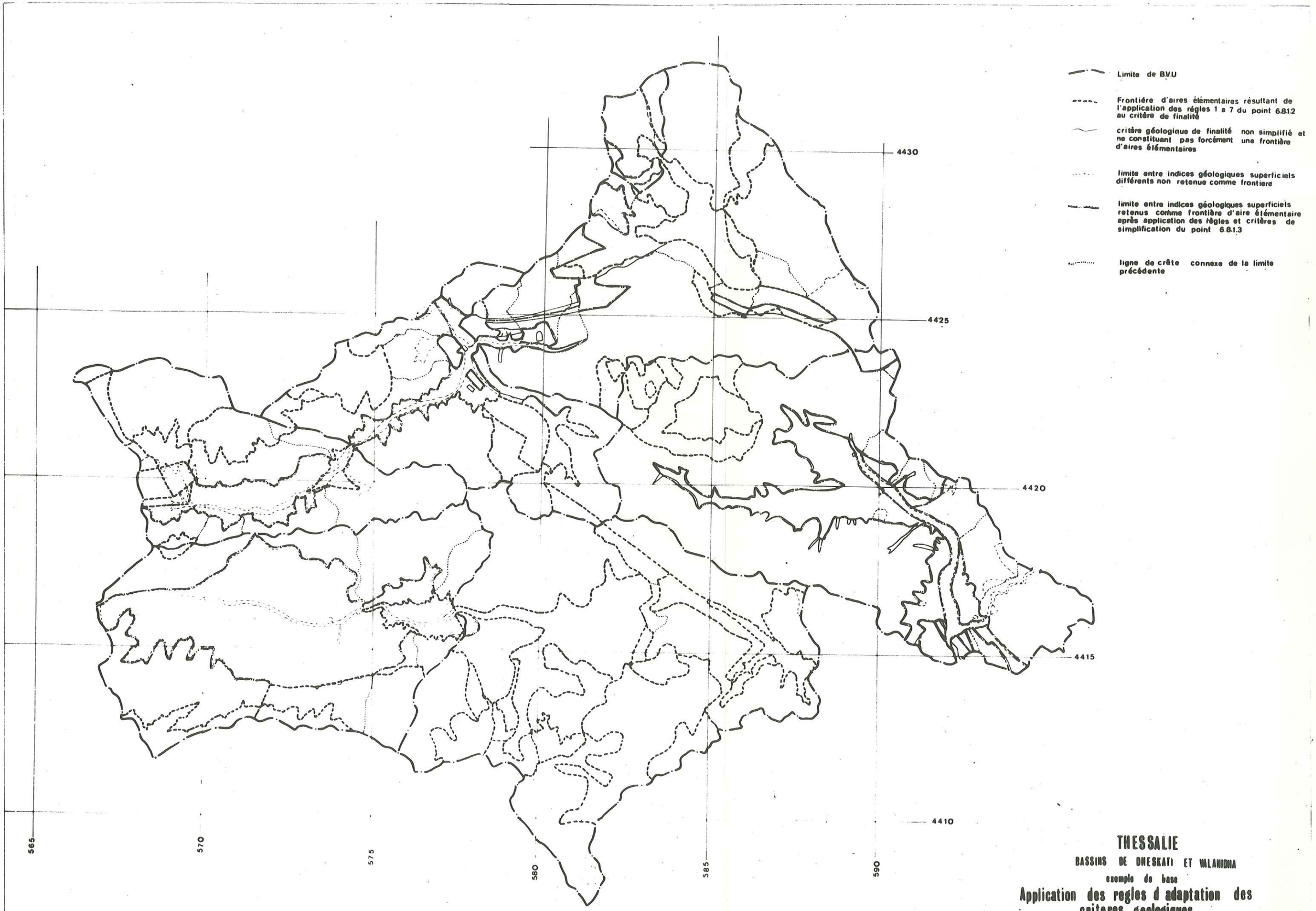
exemple de base

application des règles d'adaptation des critères de finalité

SUBDIVISION DES B.V.U

échelle 1/100 000

PLANCHE N° 9.8.2



Limite de B.V.U

Frontière d'aires élémentaires résultant de l'application des règles 1 a 7 du point 6.8.1.2 au critère de finalité

critère géologique de finalité non simplifié et ne constituant pas forcément une frontière d'aires élémentaires

limite entre indices géologiques superficiels différents non retenue comme frontiere

limite entre indices géologiques superficiels retenus comme frontière d'aire élémentaire après application des règles et critères de simplification du point 6.8.1.3

ligne de crête connexe de la limite précédente

THESSALIE

BASSINS DE DHESKATI ET VALANIDHA

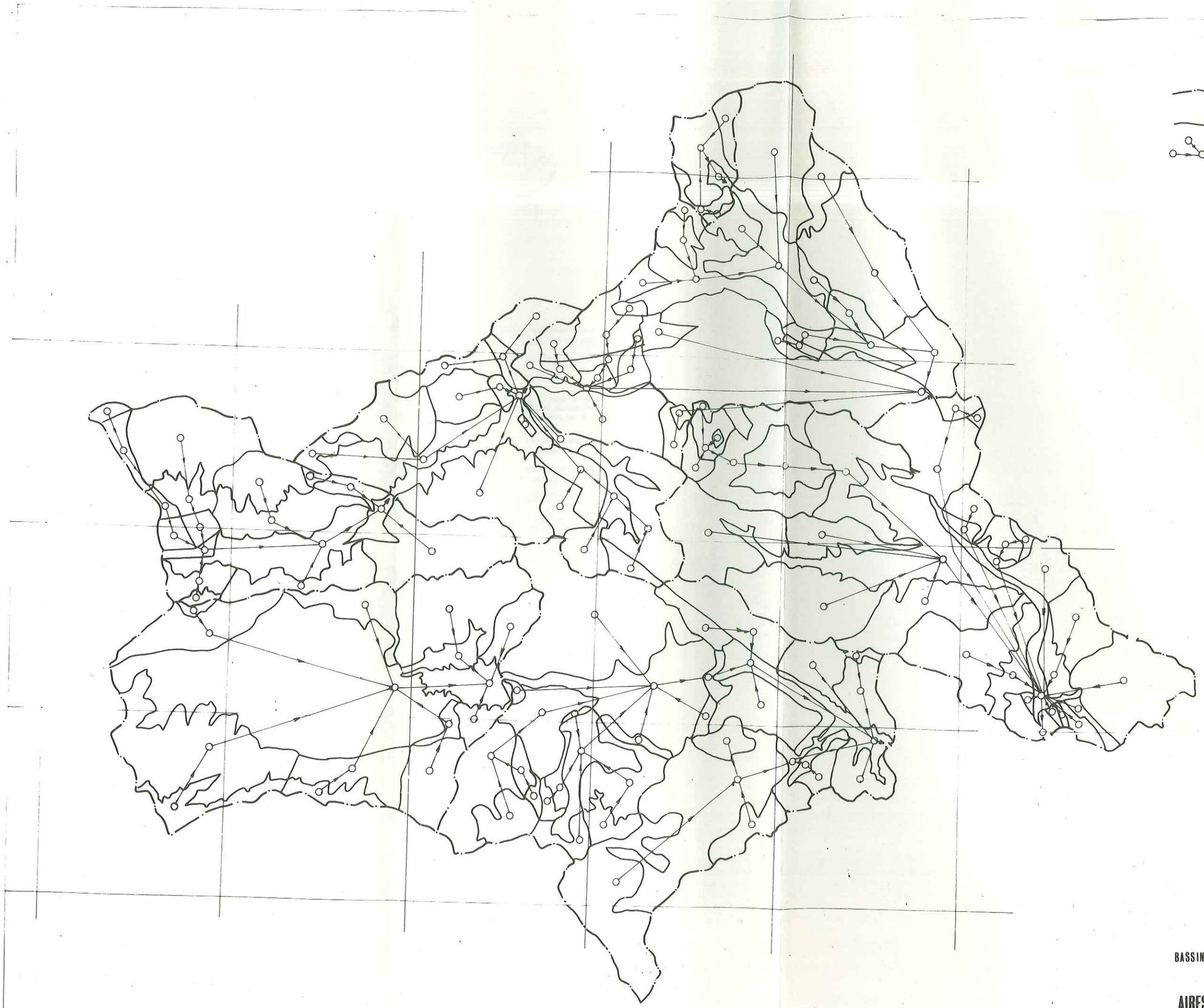
exemple de base

Application des regles d adaptation des criteres geologiques

SUBDIVISION DES B.V.U

echelle 1:100 000

PLANCHE Nº 9.8.3



Limite de B.V.U

Frontière d'aires élémentaires résultant de l'application des règles définies au point 6812

Articulation entre aires élémentaires

THESSALIE

BASSINS DE DHESKATI ET VALANIDHA

exemple de base

AIRES ELEMENTAIRES

echelle : 1/100 000

Sondages électriques de mesure des résistivités du sous-sol par quadripoles Schlumberger

- AB compris entre 500 et 10 000 m
- AB = 500 m

67/55 Résistivités en ohm.m avec le cas échéant indication de la profondeur du bedrock en m sous la barre de fraction

limite entre roches dures (Pz et antémiocènes) et formations plus tendres

limite entre formations plio-pléistocènes tendres et terrains meubles

limite entre deux zones d'indices géophysiques différents

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ indices géophysiques selon 7.2.2

échelle : 1/400 000
équidistance : 100 m

0 2 4 6 8 10 Km

THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion

RESISTIVITES PONDEREES ENTRE 0 et 50 m

essai de caractérisation géologique de la tranche phréatique

Sondages électriques de mesure des résistivités du sous-sol par quadripoles Schlumberger

- AB compris entre 500 et 10 000m
- AB = 500m

67 / 86 Résistivités en ohmm avec le cas échéant indication de la profondeur du bedrock sous la barre de fraction

- limite entre roches dures (Pzo et antémiocènes) et formations plus tendres au niveau du sol
- limite entre formations plio-pléistocènes et terrains meubles au niveau du sol
- limite entre deux zones d'indices géophysiques différents
- limite des roches dures à 100m de profondeur

(1)(2)(3)(4)(5)(6) / (1')(2')(3')(4')(5')(6') indices géophysiques selon 1.2.2

0 2 4 6 8 10 Km

THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion

RESISTIVITES PONDEREES ENTRE 50 et 100 m

essai de caractérisation pédologique des tranches phréatique et profondes

échelle : 1/400 000

Sondages électriques de mesure des résistivités du sous-sol par quadripoles Schlumberger

- AB compris entre 500 et 10 000 m
- AB = 500 m

10/125 Résistivités en ohm m avec le cas échéant indication de la profondeur du bedrock en m sous la barre de fraction

même signification que pour la planche N°12 avec adaptation pour la profondeur

0 2 4 6 8 10 Km

THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion

RESISTIVITES PONDEREES ENTRE 100 et 150 m

essai de caractérisation géologique des tranches phréatique et profondes

echelle: 1/400 000
equidistance: 100 m.

PLANCHE N° 12

Sondages électriques de mesure des résistivités du sous-sol, par quadripoles Schlumberger

- AB compris entre 500 et 10 000 m
- AB = 500 m

Résistivité en ohm.m avec, le cas échéant indication de la profondeur du bedrock en m sous la barre de fraction

même signification que pour la planche n° 12 avec adaptation pour la profondeur

0 2 4 6 8 10 Km

THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion

RESISTIVITES PONDEREES ENTRE 150 et 200 m

echelle : 1/400.000
equidistance: 100 m.

Sondages électriques de mesure des resistivités du sous-sol par quadripoles Schlumberger

- AB compris entre 500 et 10 000 m
- AB = 500 m

100 / 111 Résistivités en ohm m avec le cas échéant indication de la profondeur du bedrock en m sous la barre de fraction

même signification que pour la planche n°12 avec adaptation pour la profondeur

1 2 etc...

0 2 4 6 8 10 Km

THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion

RESISTIVITES PONDEREES ENTRE 200 et 250 m

essai de caractérisation géologique des tranches phréatique et profondes

echelle : 1/400 000
equidistance : 100 m.

THESSALIE
bassins versants du pinios-titarissios et de karla-sikourion
CARTE STRUCTURALE-HYDROGEOLOGIE KARSTIQUE

echelle: 1/600 000

Karst affleurant

Prolongement enfoui du karst

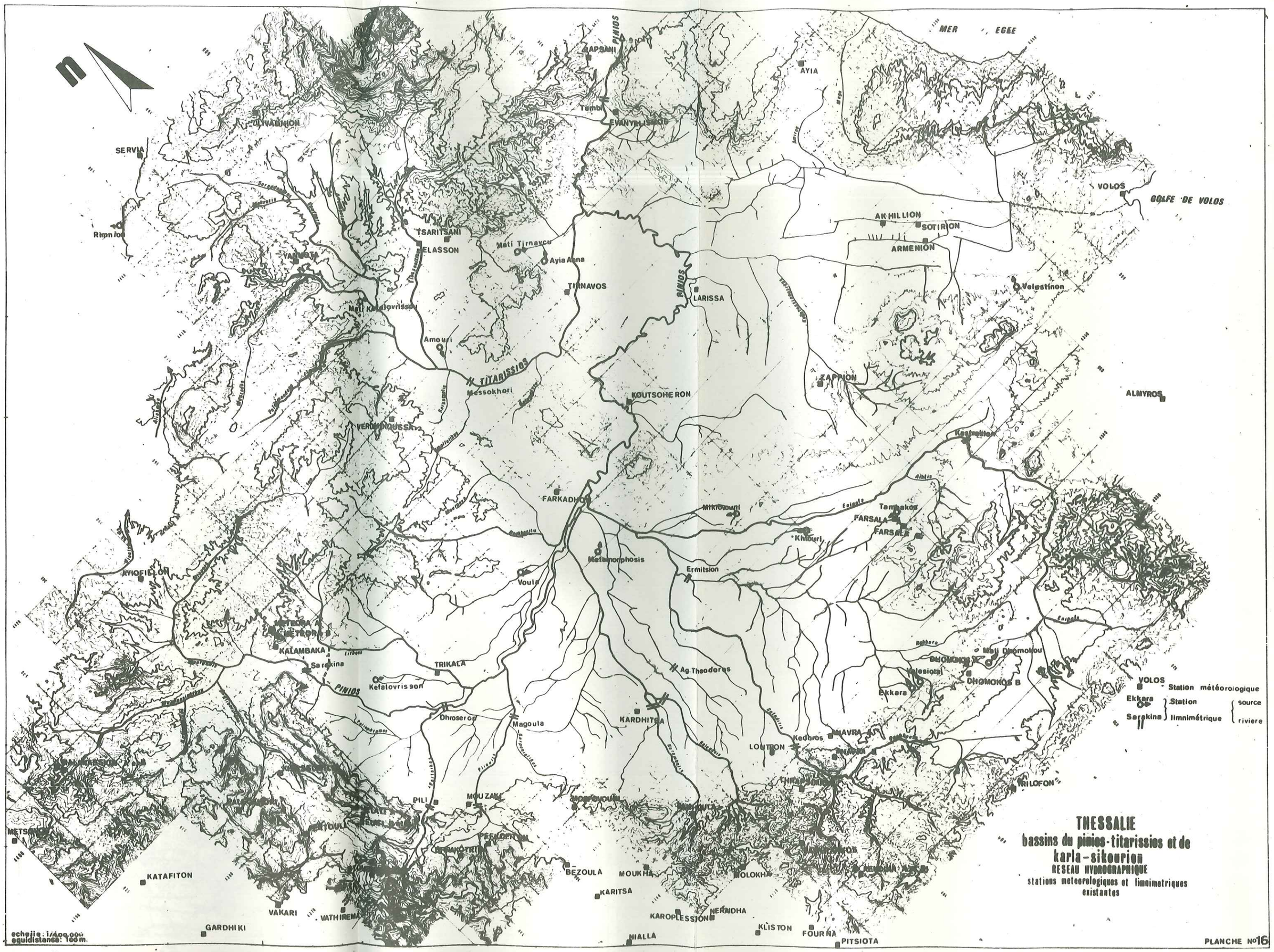
Courbe de niveau du bed-rock

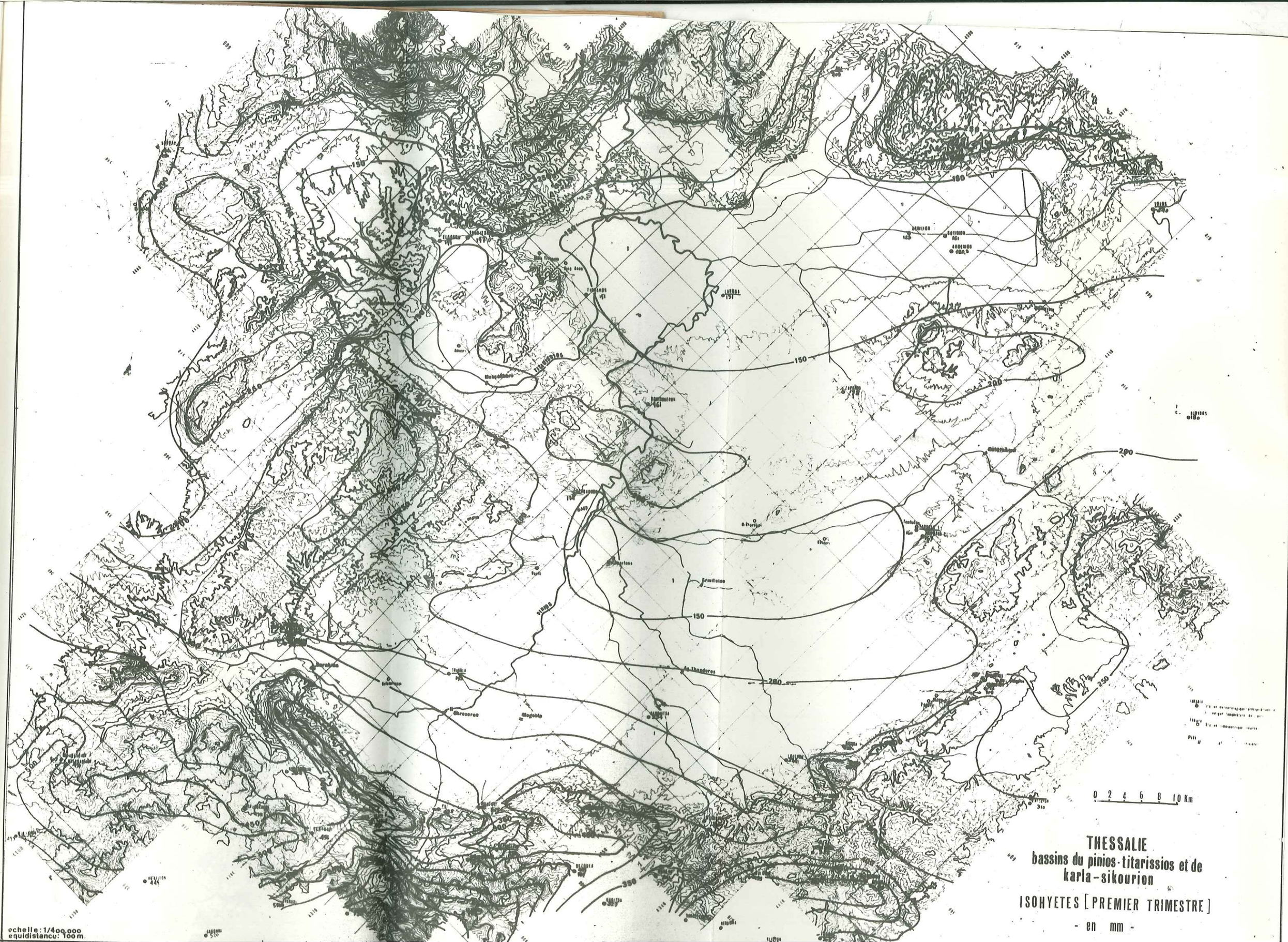
Faille ou flexure

Direction d'écoulement karstique

Source karstique

planche N°15


MER EGEE
AYIA
ZAPSANI
PINIOS
Tembi
EVANYELISMOS
OLYMPION
SERVIA
Rimnion
VOLOS
GOLFE DE VOLOS
AKHILLION
SOTIRION
ARMENION
TSARITSANI
ELASSON
Mati Tirnavou
Ayia Anna
TIRNAVOS
LARISSA
Velestinon
Mati Karditovrisso
Amouri
TITARISSIOS
Messokhori
KOUTSOHERON
ZAPPION
ALMYROS
VERDIKOUSSA
FARKADHON
Metamorphosis
Voulx
Ermitsion
Khlouri
FARSALA
Tampakos
KYPHOFITON
KALAMBAKA
Sarakina
TRIKALA
Kefalovrisson
Ag.Theodoros
Dhroseron
Magoula
KARDHITSA
Mati Dhomokou
DHOMOKOS
DHOMOKOS B
Ekkara
LOUTRON
Kedhros
MAVRA
PILI
MOUZAKI
PERIVOLI
KATAFITON
VAKARI
VATHIREMA
GARDHIKI
BEZOULA
MOUKHA
KARITSA
KAROPLESSION
NERAIDHA
KLISTON
FOURNA
PITSIOTA
NIALLA
VOLOS Station météorologique
Ekkara Station limnimétrique source
Sarakina riviere
THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion
RESEAU HYDROGRAPHIQUE
stations meteorologiques et limnimetriques existantes
echelle : 1/400 000
equidistance: 100 m.

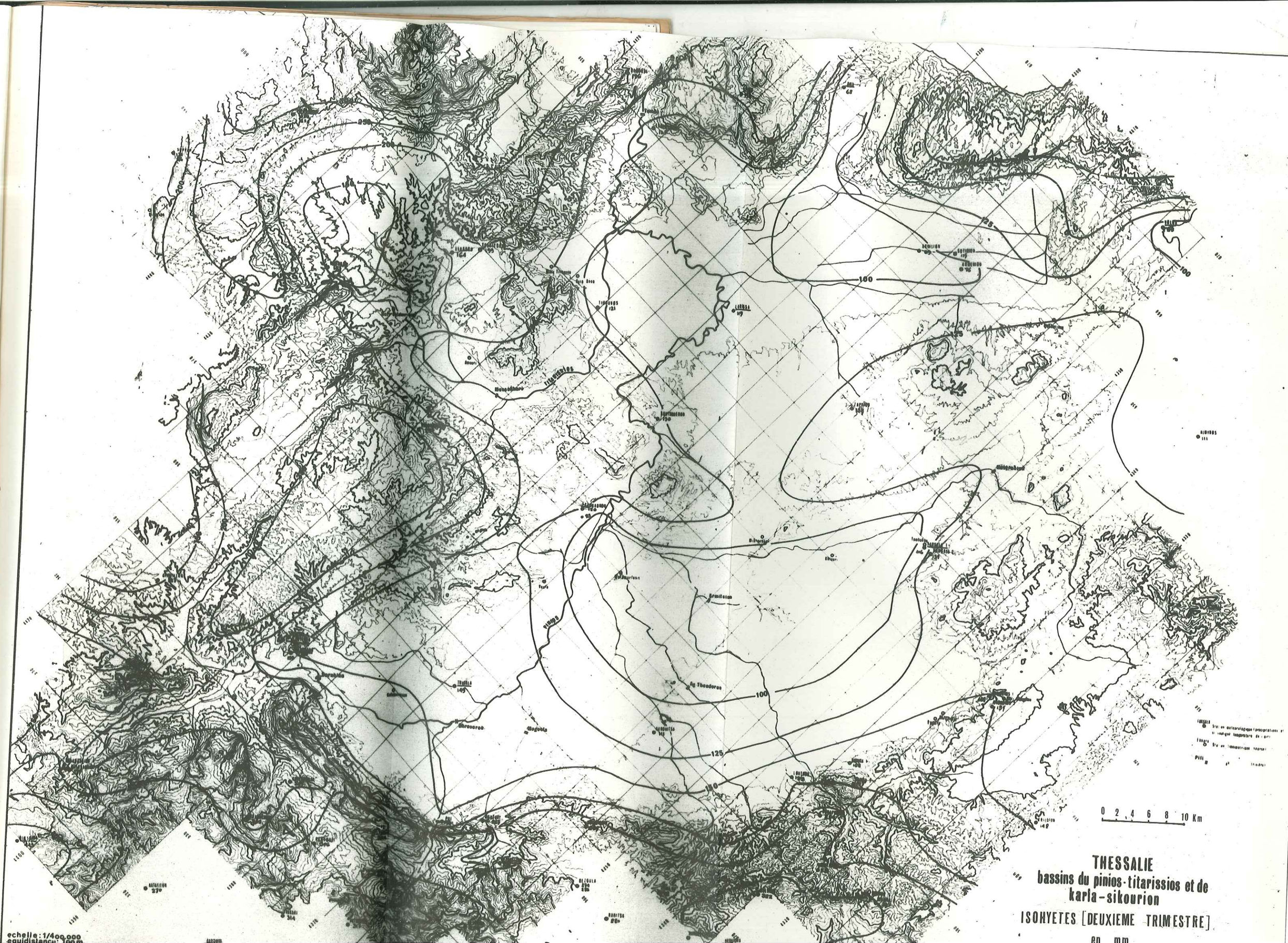


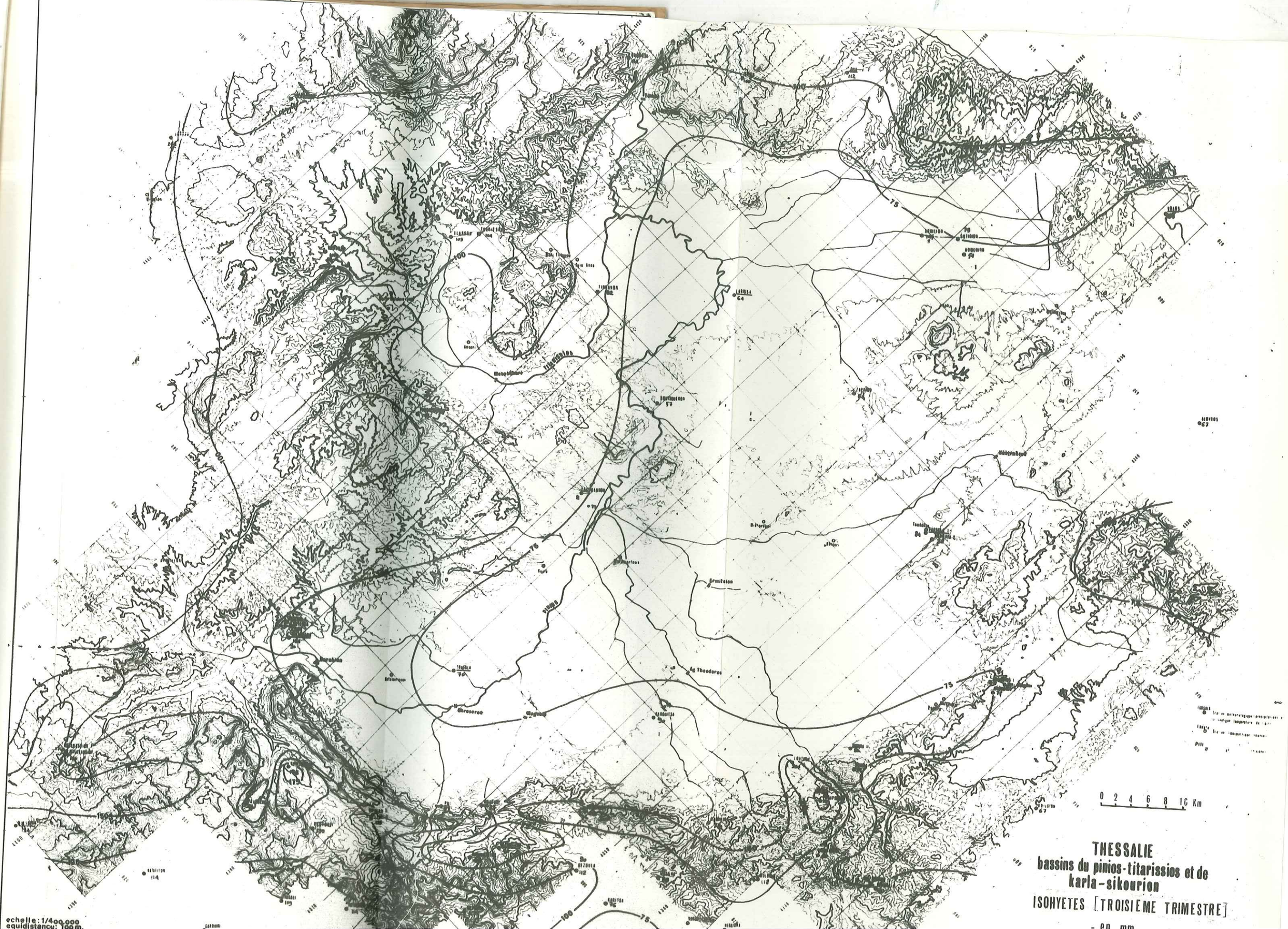
THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion

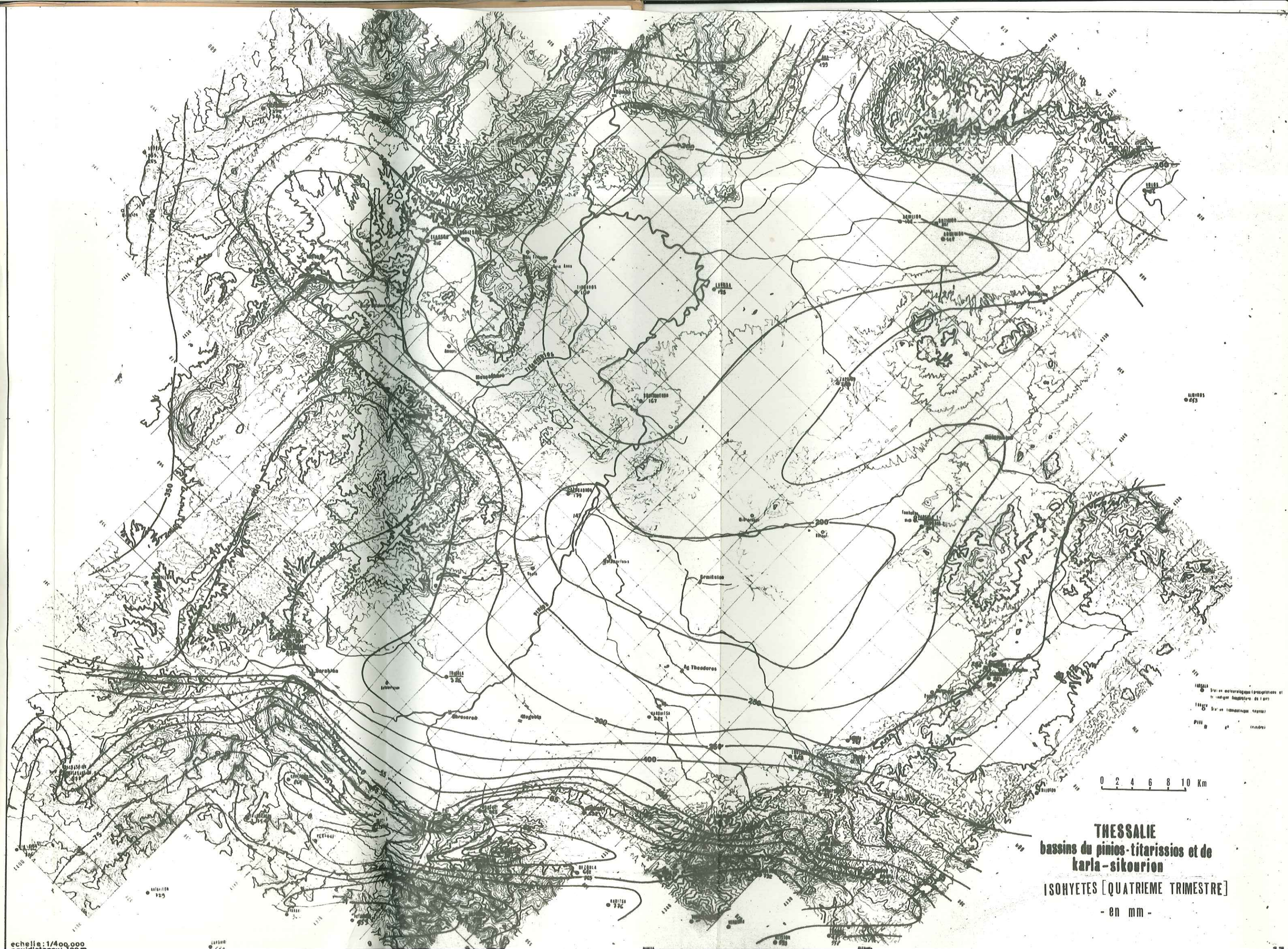
ISOHYETES [PREMIER TRIMESTRE]

- en mm -

echelle: 1/400.000
equidistance: 100 m.


100
125
150
0 2 4 6 8 10 Km
THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion
ISOHYETES [DEUXIEME TRIMESTRE]
en mm
echelle : 1/400.000
equidistance : 100 m


0 2 4 6 8 10 Km
THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion
ISOHYETES [TROISIEME TRIMESTRE]
- en mm
echelle : 1/400.000
equidistance: 100 m.


0 2 4 6 8 10 Km
THESSALIE
bassins du pinios-titarissios et de karla-sikourion
ISOHYETES [QUATRIEME TRIMESTRE]
- en mm -
echelle : 1/400.000