THESE

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE 3ÈME CYCLE

en

Génie géologique et minier

par

Jean-Pierre LABORDE

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE NANCY

NOTION D'INDICE DE PENTE : APPROCHE PAR LE CALCUL AUTOMATIQUE

Soutenue publiquement le 13 septembre 1976 devant la Commission d'examen

D 136 035317 5

P. BOIS — Président

L. DEMASSIEUX — Rapporteur

J.L. MALLET — Examinateurs

136035 3175

[H] 1976 LABORDE J.P.

THESE

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE 3ÈME CYCLE

en

Génie géologique et minier

par

Jean-Pierre LABORDE

NOTION D'INDICE DE PENTE : APPROCHE PAR LE CALCUL AUTOMATIQUE

Soutenue publiquement le 13 septembre 1976 devant la Commission d'examen

MM.	P. BLAZY	Président
	P. DUBREUIL	Rapporteur
	P. BOIS	Examinateurs
	L. DEMASSIEUX	
	J.L. MALLET	

"Si tous ceux qui croient avoir raison n'avaient pas tort, la vérité ne serait pas loin ...

Ceux qui ne savent rien en savent toujours autant que ceux qui n'en savent pas plus qu'eux".

Pierre DAC

AVANT - PROPOS

Il m'est agréable de pouvoir, ici, exprimer ma gratitude à tous ceux grâce à qui j'ai pu mener ce travail à bien.

Je remercie Monsieur le Professeur BLAZY, Directeur de l'E.N.S.G. qui me fait aujourd'hui le grand honneur de présider ce jury.

Ma très profonde reconnaissance va à Monsieur J.L. MALLET, sans qui ce travail ne serait ce qu'il est, tant sur le fond que sur la forme, et qui m'a toujours fait bénéficier sans réserves de son savoir et de son travail.

Je remercie Monsieur P. DUBREUIL d'avoir accepté de participer à ce jury et de m'avoir fait profiter ainsi de sa très large expérience sur la détermination des caractéristiques du milieu.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur P. BOIS pour les conseils qu'il m'a prodigués et sa participation au jury.

Je dois beaucoup à Monsieur L. DEMASSIEUX, Directeur du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'E.N.S.G. qui m'a accueilli au sein de son équipe, et a mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail. Qu'il en soit ici remercié, ainsi que des efforts qu'il a poursuivis pour développer l'Hydraulique et l'Hydrologie de surface dans notre maison.

Je n'oublie pas non plus mes amis, tant géologues qu'hydrologues, en particulier, du Centre Mécanique des Sols et des Roches, de l'Agence Financière du Bassin Rhin-Meuse et du Service Régional d'Aménagement des Eaux de Lorraine pour les discussions fructueuses que j'ai pu avoir avec eux et qui m'ont été d'une très grande utilité.

Je remercie enfin tous ceux qui ont participé à la réalisation matérielle de ce travail en particulier Mademoiselle FOLTA qui en a assuré la frappe et Monsieur LESTREIT qui a réalisé la plupart des dessins.

RESUME

Après avoir, dans un premier chapitre, défini la notion d'indice de pente et justifié son utilisation, on décrit dans le deuxième chapitre la plupart des indices classiques et les facteurs pris en compte dans leur élaboration.

Puis, nous proposons une méthode d'estimation des pentes ponctuelles sur l'ensemble d'un bassin versant, par le calcul automatique. Les différentes données nécessaires, et les résultats obtenus, sont décrits dans le chapitre trois.

Afin de tester cette méthode de calculs, vingt neuf bassins versants vosgiens, dont onze équipés ont été ainsi étudiés. A partir de ces résultats, que l'on trouvera récapitulés en annexe, nous avons comparé les pentes calculées aux pentes mesurées ponctuellement sur cartes topohraphiques. Puis, nous avons tenté de relier la caractéristique des pentes mesurées, d'une part aux différents indices de pente existants, et d'autre part, aux paramètres de surface et de géologie. En dernier lieu, nous avons comparé les différents indices de pente classiques à l'indice obtenu par calcul automatique. Celui-ci s'est avéré être plus étroitement lié que tous les autres à la statistique des pentes.

En conclusion, on pourra retenir que le calcul de cet indice de pente ne justifie pas à lui seul l'étude d'un bassin versant par voie informatique. Mais il s'accompagne de toute une série de résultats annexes utiles, et ouvre la voie à des études géomorphologiques beaucoup plus finies que ne le permettent des études géométriques classiques.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I

LA PLACE DES INDICES CARACTERISTIQUES DU MILIEU EN HYDROLOGIE DE SURFACE

Pages

I.1 - LES METHODES DE TRAVAIL EN HYDROLOGIE DE SURFACE 9

I.2 - NECESSITE DES INDICES MORPHOMETRIQUES 11

I.2.1 - NATURE D'UN INDICE MORPHOMETRIQUE 11

I.2.2 - UTILISATION DES INDICES MORPHOMETRIQUES 12

I.2.3 - CHOIX D'UN INDICE 12

I.3 - CARACTERISATION DES PENTES 13

I.3.1 - PROFIL EN LONG 13

I.3.2 - PENTES DES VERSANTS 13

I.3.3 - NOMBRE DE PARAMETRES NECESSAIRES POUR CARACTERISER LES PENTES 13

I.4 - BUT DE L'ETUDE 14

CHAPITRE II

INVENTAIRE DES FACTEURS EXPLICATIFS ET DES INDICES DE PENTES

II.1 - FACTEURS PRIS EN COMPTE DANS LES INDICES 19

II.2.1 - SURFACE DU BASSIN VERSANT 19

II.2.2 - FORME DU BASSIN VERSANT 19

II.2.3 - REPARTITION DES ALTITUDES 21

Pages

II.2 - INDICES DE PENTE UTILISES CLASSIQUEMENT 22

II.2.1 - INDICE DE PENTE GLOBALE I_G 22

II.2.2 - DENIVELEE SPECIFIQUE D_s 22

II.2.3 - INDICE DE PENTE DE ROCHE 22

II.2.4 - "RELIEF RATIO" 23

II.2.5 - REMARQUES 24

II.3 - FACTEURS NON PRIS EN COMPTE MAIS POUVANT INTERVENIR 24

II.3.1 - GEOLOGIE 25

II.3.2 - RESEAU HYDROGRAPHIQUE 26

a - Hiérarchisation du réseau 26

b - Difficultés de mise en oeuvre 26

c - Les lois de Horton 28

d - Autres caractéristiques du chevelu 29

II.3.3 - PENTES DES VERSANTS 30

CHAPITRE III

APPROCHE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT PAR LE CALCUL AUTOMATIQUE

III.1 - CONTEXTE DANS LEQUEL ON A ENTREPRIS CETTE ETUDE 33

III.1.1 - DONNEES ALTIMETRIQUES DISPONIBLES 33

III.1.2 - PROGRAMMES EXISTANTS 33

III.1.3 - ADAPTATION DES DONNEES MORPHOMETRIQUES AUX PROGRAMMES EXISTANTS 34

III.2 - DESCRIPTION DES DONNEES 34

III.2.1 - MAILLAGE DU BASSIN VERSANT 34

III.2.2 - FRONTIERES DU BASSIN VERSANT 35

III.2.3 - ALTITUDES 35

III.2.4 - PRESENTATION DES CARTES DE DONNEES 36

Pages

III.3 - DESCRIPTION DES METHODES DE CALCUL 38

III.3.1 - GEOMETRIE PLANE 38

a - Calcul du périmètre 38

b - Calcul de la surface 38

c - Calcul du rectangle équivalent et du coefficient de compacité 39

d - Centre de gravité 39

III.3.2 - ETUDE DES ALTITUDES 39

a - Courbe hypsométrique 39

b - Statistique des altitudes 41

III.3.3 - INDICES DE PENTE 42

a - Indice de pente de Roche 42

b - Indice de pente globale 42

III.3.4 - ETUDE DES PENTES 43

a - Calcul des pentes et des azimuts 43

b - Justification de la méthode 43

c - Relation entre azimut et pente 44

d - Statistique des pentes et courbe clinographique 44

III.3.5 - SOUS-PROGRAMMES ANNEXES 45

a - GRAPH 45

b - DISNI 45

c - DISN 45

d - TRANØR 46

e - TRAGAL 46

f - CØREL 46

g - SØRCØ 46

III.4 - EXEMPLE D'UNE ETUDE TYPE SUR UN BASSIN VERSANT 47

III.4.1 - SORTIE TYPE DU PROGRAMME I.D.P. 47

III.4.2 - CORRELATION ENTRE PENTE REELLE ET PENTE CALCULEE 47

III.4.3 - AUTRES SORTIES GRAPHIQUES 47

a - Bloc-diagramme 47

b - Carte topographique 48

III.4.4 - DETECTION ET CORRECTION DES ERREURS DE DONNEES 48

a - Vérification des points frontière 50

b - Vérification des altitudes 50

c - Vérification des pentes calculées 51

III.4.5 - COUT D'UNE ETUDE COMPLETE 52

CHAPITRE IV

APPLICATION A UNE REGION TYPE : LE VERSANT LORRAIN DES VOSGES

Pages

IV.1 - DESCRIPTION DU MILIEU HYDROLOGIQUE 57

IV.1.1 - CHOIX ET LISTE DES STATIONS ETUDIEES 57

IV.1.2 - CADRE GEOLOGIQUE 60

a - Coupe lithostratigraphique 60

b - Classification adoptée 63

IV.1.3 - SUPPORTS CARTOGRAPHIQUES UTILISES 64

a - Cartes topographiques 64

b - Cartes géologiques 66

IV.2 - PRESENTATION ET CRITIQUE DES RESULTATS 67

IV.2.1 - SURFACE DES BASSINS VERSANTS 67

IV.2.2 - FORME DES BASSINS VERSANTS 68

IV.2.3 - REPARTITION DES ALTITUDES 70

a - Répartition des altitudes à l'échelle du bassin 70

b - Statistique sur les paramètres de dispersion 70

IV.2.4 - CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES 72

a - Paramètre de perméabilité 72

b - Paramètre de dureté 73

IV.2.5 - LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE 74

a - Densité de drainage et fréquence des thalwegs d'ordre 1 74

b - Rapport de confluence et rapport des longueurs 75

IV.2.6 - LES INDICES DE PENTES 77

a - Répartition statistique des indices de pente 77

b - Relation entre indice de pente de Roche et indice de pente globale.. 78

c - Dénivelée spécifique 80

IV.2.7 - LES PENTES DES BASSINS VERSANTS 81

a - Statistique des pentes au niveau du bassin 82

b - Rapports entre paramètres de tendance centrale et paramètre de dispersion 82

c - Retour à la notion d'indice de pente 85

Pages

IV.3 - ESSAI DE SYNTHESE 85

IV.3.1 - RELATION ENTRE PENTE ET SURFACE 85

IV.3.2 - RELATION ENTRE PENTE ET NATURE GEOLOGIQUE 86

IV.3.3 - RELATION ENTRE PENTE ET INDICES DE PENTE 88

a - Normalisation des variables 88

b - Comparaison entre les différents indices de pente 90

c - Remarques sur la précision du calcul des pentes 92

d - Etude du cas particulier des confluences 94

CHAPITRE V

C O N C L U S I O N S

V.1 - REFLEXIONS SUR LES METHODES DE CALCUL 99

V.2 - REFLEXIONS SUR LA CARACTERISATION DES PENTES 100

V.3 - RAPPORT ENTRE LES DIFFERENTS ELEMENTS CARACTERISTIQUES DU MILIEU HYDROLOGIQUE ... 101

V.4 - INTERET GENERAL DE L'ETUDE 101

TABLE DES FIGURES DANS LE TEXTE 103

BIBLIOGRAPHIE 105

ANNEXES 107

CHAPITRE I

LA PLACE DES INDICES CARACTERISTIQUES DU MILIEU EN HYDROLOGIE DE SURFACE

Pages

I.1 - Les méthodes de travail en hydrologie de surface 9

I.2 - Nécessité des indices morphométriques 11

I.2.1 - Nature d'un indice morphométrique 11

I.2.2 - Utilisation des indices morphométriques 12

I.2.3 - Choix d'un indice 12

I.3 - Caractérisation des pentes 13

I.3.1 - Profil en long 13

I.3.2 - Pentes des versants 13

I.3.3 - Nombre de paramètres nécessaire pour caractériser les pentes 13

I.4 - But de l'étude 14

CHAPITRE I

LA PLACE DES INDICES CARACTERISTIQUES DU MILIEU EN HYDROLOGIE DE SURFACE

L'hydrologie de surface est la science qui traite essentiellement des problèmes qualitatifs, et surtout quantitatifs, des débits des cours d'eau. Ces problèmes se ramènent généralement à des prévisions ou des prédéterminations de débits ou de volumes en un point ou sur une surface. La nature des problèmes posés, et les méthodes pour les résoudre, nécessitent pour l'hydrologue, des connaissances dans des domaines aussi divers que : "hydraulique, hydrodynamique fluviale, calculs des probabilités, climatologie, géologie, pédologie, géomorphologie..." (*).

Cette science procède donc à la fois des sciences exactes et des sciences naturelles, mais ce dernier côté domine très nettement, et, pour l'hydrologue, la qualité essentielle (si elle n'est pas suffisante), est le sens de l'observation. Aussi n'est-il pas étonnant de voir un chercheur de formation naturaliste, trouver sa voie dans cette branche encore peu académique.

I.1 - LES MÉTHODES DE TRAVAIL EN HYDROLOGIE DE SURFACE

L'hydrologie de surface est une science essentiellement appliquée. La recherche et le développement de cette branche ont toujours été liés à l'existence de problèmes concrets. Ceux-ci ont évolué au cours des temps : on s'est d'abord intéressé aux crues, on en vient seulement à prendre conscience de l'intérêt de l'étude des étiages. En effet, aux besoins quantitatifs s'ajoutent à présent des problèmes de qualité. Parallèlement à l'évolution des besoins, les progrès des techniques ont transformé nos méthodes de travail. On peut essayer de schématiser chronologiquement ces dernières de la façon suivante:

Dans une première phase (fig. 1, voie 1), à chaque problème particulier qui se posait, la réponse de l'hydrologue s'appuyait sur des observations effectuées au point particulier intéressant. Il en déduisait les solutions recherchées : alimentation en eau, protection contre les crues, possibilité de navigation, etc...

* J. RODIER dans (24) page 11.

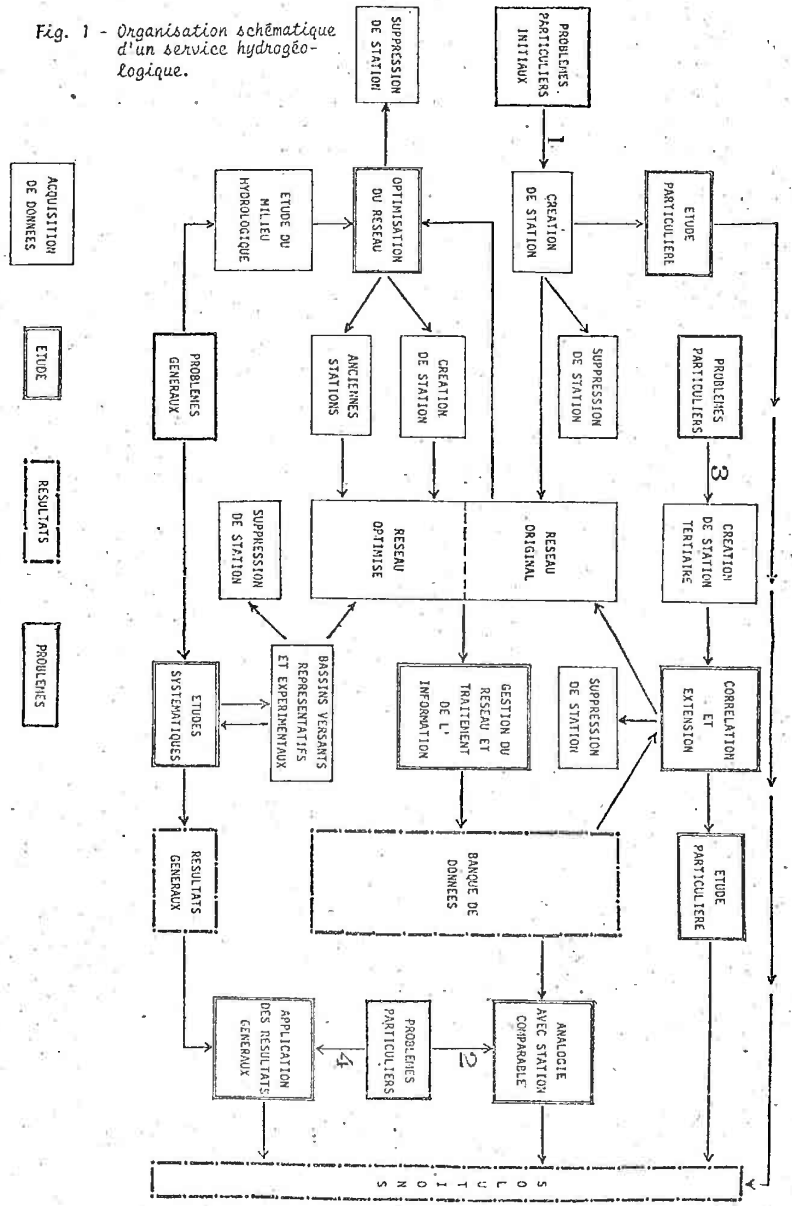


Fig. 1 - Organisation schématique d'un service hydrogéologique.

Au cours des temps, les stations créées pour chaque problème particulier n'ont pas toutes été abandonnées, et l'on s'est trouvé en présence d'un réseau appelé réseau original, constitué de stations très hétéroclites : chacune d'entre elles répondait à des besoins divers et spécifiques. De même, elles étaient gérées par différents services (en France par exemple : Ponts et Chaussées, Electricité de France, Ministère de l'Agriculture, Ministère de l'Industrie...).

L'ensemble des résultats acquis sur le réseau original constitue une banque de données.

On en arrive alors à un deuxième stade, où l'hydrologue n'est plus obligé d'établir de nouvelles stations pour résoudre un problème. Il peut (fig. 1, voie 2), obtenir des résultats en extrapolant ceux obtenus sur des stations du réseau original, voisines ou comparables. Il peut par ailleurs (fig. 1, voie 3), se contenter d'une station nouvelle (station tertiaire ou station de projet), mais observée sur une courte période. Les données de cette station seront étendues par corrélation avec celles, plus longues, du réseau original.

Par la suite, les services hydrologiques peuvent parfois ne plus s'intéresser uniquement aux problèmes particuliers. On atteint le stade des problèmes généraux qui se ramènent essentiellement à deux types principaux :

- l'optimisation et la planification du réseau :

Ces deux types de travaux reposent sur l'étude du milieu hydrologique. On ramène l'ensemble des paysages à un nombre fini de régions dites hydrologiquement homogènes. La planification permet de déterminer le nombre minimal de stations nécessaires à la connaissance de chaque type de milieu hydrologique. L'optimisation met en évidence, par comparaison avec le réseau original, les zônes sur-observées, et par conséquent, les stations à supprimer, et éventuellement les zônes à équiper.

- les études systématiques :

Elles s'intéressent à un même phénomène (crues, étiages...) sur les différentes stations du réseau. Elles essaient de mettre en évidence des facteurs explicatifs et, si possible, de quantifier leurs influences ; ceci afin d'extrapoler ces résultats généraux à des bassins versants non étudiés.

A ce dernier stade, s'ouvre une quatrième voie (fig. 1, voie 4) pour résoudre un problème particulier en un point. Celle-ci consiste à déterminer les résultats généraux obtenus sur l'ensemble du réseau.

Nous allons montrer à quel moment intervient, dans ce schéma général, la nécessité de connaître les caractéristiques physiques des bassins versants.

I.2 - NECESSITE DES INDICES MORPHOMETRIQUES

I.2.1 - NATURE D'UN INDICE MORPHOMETRIQUE

Le milieu hydrologique dépend de différents facteurs qui sont essentiellement le climat, les caractéristiques du sol et du sous-sol, la couverture végétale et la morphométrie (surface,

forme dans le plan, reliefs, réseau hydrographique*...). Les indices morphométriques ont pour but de donner des indications chiffrées, permettant d'établir au moins des relations d'ordre pour différents éléments de la morphométrie. A partir de ces indices chiffrés, on espère mettre en évidence l'influence de chacun des éléments de la morphométrie sur certains aspects du régime hydrologique.

I.2.2 - UTILISATION DES INDICES MORPHOMETRIQUES

Dans ce schéma général, l'utilisation d'indices morphométriques se justifie au niveau de l'optimisation et de la planification du réseau, à celui des études systématiques, et enfin dans le choix des stations susceptibles d'être corrélées.

Pour l'optimisation et la planification, il est nécessaire de connaître les amplitudes de variation des différents paramètres. On pourra obtenir un découpage en classe, et définir des zones hydrologiquement homogènes (*), correspondant à une classe particulière pour chaque élément de la morphométrie et des autres facteurs du milieu hydrologique. Pour cette utilisation-là, il est bien évident qu'un indice morphométrique peut n'être que sommaire, puisqu'en général on se contente de diviser son intervalle de variation en trois ou quatre classes. Par ailleurs, il s'agit de planifier toute une région, c'est-à-dire de nombreux bassins versants, et il est souhaitable que l'indice choisi soit d'un accès facile à partir des documents existants.

Au niveau des études systématiques, les valeurs qui caractérisent un phénomène (crue, étiage...), sont expliquées par celles des différents indices caractéristiques du milieu hydrologique (**). Pour mettre en évidence,par exemple, l'influence du relief sur le ruissellement, il n'est plus question de se contenter d'indices sommaires, puisqu'il est évident que sur quatre classes, toutes étant égales par ailleurs, la plus "pentue" donne le plus fort ruissellement. Il faut donc à ce stade, des indices plus fins que précédemment, mais ils peuvent, par ailleurs, être d'un accès plus difficile.

I.2.3 - CHOIX D'UN INDICE

Les différents éléments de la morphométrie sont interdépendants. En effet, les pentes dérivent des altitudes en fonction du lieu, mais celles-ci dépendent du réseau hydrographique, etc...

De plus, les éléments de la morphométrie sont plus ou moins liés aux autres facteurs du milieu hydrologique, tels que le climat, la géologie ou la végétation.

Ainsi, si a priori le nombre des indices nécessaires à la définition exacte d'un milieu hydrologique est probablement très grand, du fait de ces corrélations, on peut espérer caractériser un bassin à partir d'un nombre fini d'indices. Du nombre et de la qualité des indices choisis

* J. GUISCAFRE et P. DUBREUIL dans (12) page 7.
** J. GUISCAFRE et P. DUBREUIL dans (12), 2ème partie : synthèse et normes.

dépendra la variance expliquée. Le seuil de tolérance sur la variance expliquée découle de la nature du problème posé.

I.3 - CARACTERISATION DES PENTES

Parmi les éléments de la morphologie d'un bassin, les pentes rencontrées sont un élément très important. En effet, le pourcentage de pluie qui va ruisseler lors d'une averse dépend, pour beaucoup, de la pente du terrain sur lequel se produit l'averse. D'autre part, les pentes des bassins versants conditionnent les vitesses des écoulements tant sur le sol que dans les cours d'eau.

Enfin, dans les secteurs où la direction des vents humides est constante, il est utile de connaître l'exposition des versants, et par conséquent, l'azimut des lignes de plus grande pente.

I.3.1 - PROFILS EN LONG

On se rend compte intuitivement que c'est essentiellement le nombre de cours d'eau, et leur pente longitudinale, qui déterminent les vitesses de propagation. Si on a affaire à un problème d'alerte de crue, il est nécessaire de prendre en compte ces pentes longitudinales à l'aide d'un premier "indice de pente" qui caractérisera les profils en long.

I.3.2 - PENTES DES VERSANTS

Dans la pratique, les problèmes les plus fréquents sont des problèmes relatifs aux volumes écoulés et à leur prédétermination, plus qu'à leur prévision. Dans ce cas, il est nécessaire de pouvoir caractériser les pentes des versants, et non plus des seuls thalwegs. C'est ce but que cherchent à atteindre les différents "indices de pente" que nous allons étudier.

I.3.3 - NOMBRE DE PARAMETRES NECESSAIRES POUR CARACTERISER LES PENTES

Les indices de pente ont donc pour objet de caractériser les pentes d'un bassin versant, c'est-à-dire de condenser en une ou plusieurs valeurs chiffrées, une fonction de quatre variables dans un domaine donné : soit une relation entre la valeur de la pente P, sa direction Az et l'abscisse x et l'ordonnée y, à l'intérieur du bassin versant. Trouver un tel indice semble une gageure à moins que les différentes variables de la fonction soient corrélées, ou que l'influence de certaines variables soit négligeable !

En premier lieu, généralement, l'azimut de la pente n'est pas pris en compte. Il reste alors à qualifier la fonction $P = f(x, y)$ sur le bassin versant.

On peut ensuite négliger la position relative des différentes pentes, et par conséquent, s'intéresser uniquement à la valeur des pentes en fonction de la surface. Et si l'on s'affranchit de la surface du bassin versant, on aboutit à une courbe donnant la surface relative occupée par des pentes inférieures ou supérieures à une certaine valeur. Cette courbe n'est autre que la courbe clinographique (*). Elle est une représentation de la statistique des pentes. En effet, le pourcentage de la surface pour lequel la pente est inférieure à une certaine valeur, peut être considéré comme la probabilité au dépassement de cette valeur (fig. 2).

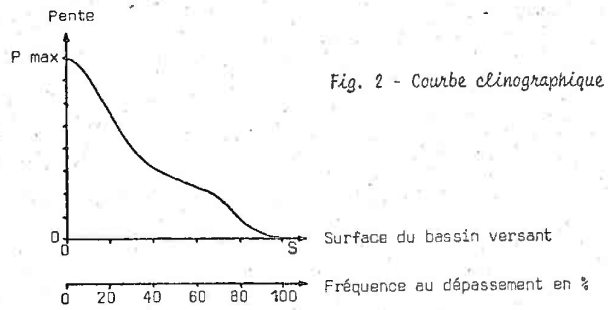


Fig. 2 - Courbe clinographique

A ce stade de l'analyse des pentes, dans un premier temps, on doit déterminer le type de loi statistique auquel s'ajuste au mieux, la répartition des pentes. En second lieu, on doit déterminer les paramètres de cette loi.

En faisant une nouvelle hypothèse selon laquelle la loi adéquate est toujours la même, il restera encore à déterminer les paramètres qui seront au moins au nombre de deux : un paramètre de tendance centrale et un paramètre de dispersion (éventuellement un troisième paramètre de forme).

En dernier lieu, on peut espérer que ces deux ou trois paramètres sont corrélés entre eux. Il est possible, dans ces conditions restrictives, de caractériser la fonction $P = f(x, y)$ par un scalaire.

I.4 - BUT DE L'ETUDE

Jusqu'à présent, les indices de pente existants ont donné des résultats entièrement satisfaisants pour la détermination de classes de relief (sept classes par exemple), allant du relief "très faible" au relief "très fort" dans le cas de la classification de l'O.R.S.T.O.M. (**).

Par contre, lorsque l'on essaie de voir l'influence sur les pentes de la hiérarchie du réseau, de la forme et de la surface du bassin ou de la densité de drainage, les résultats sont

* M. DERRUAU dans (7) page 8.
** P. DUBREUIL et J. GUISCAFRE dans (12) pages 13 et 14.

décevants. Par exemple, dans une étude menée sur environ 240 bassins versants des régions intertropicales, P. DUBREUIL a montré une quasi-indépendance entre longueur du rectangle équivalent, indice de pente, densité de drainage, et rapport de confluence (*).

Ces résultats semblent montrer que quatre phénomènes au moins sont nécessaires pour donner une image de la topographie. Pourtant, les pentes d'un bassin versant peuvent-elles être indépendantes du réseau hydrographique ? Certainement pas, mais il y a différentes façons d'expliquer cette apparence :

- l'influence du chevelu hydrographique peut être masquée par l'influence d'autres facteurs tels que la nature géologique des terrains, l'âge et le style de la tectonique, le climat, etc...
- l' "indice de pente" peut être mal choisi.
- la précision de l'indice de pente peut n'être pas suffisante pour mettre en évidence cette influence.
- un seul indice de pente ne suffit peut-être pas, comme on l'a dit plus haut, à caractériser les pentes.
- enfin, ces quatre raisons sont peut-être valables ensemble.

Compte tenu de ces réflexions, notre démarche sera la suivante :

- choisir une région hydrologique homogène, de façon à réduire les influences des paramètres tels que le climat et le type d'érosion.
- étudier finement sur ces bassins la statistique des pentes, et voir ainsi le nombre de paramètres nécessaires pour en donner une bonne image.
- enfin, éventuellement mettre en évidence des corrélations avec des paramètres tels que le chevelu hydrographique, la géologie, la forme du bassin.

* P. DUBREUIL dans (15).

CHAPITRE II

INVENTAIRE DES FACTEURS EXPLICATIFS ET DES INDICES DE PENTE

Pages

II.1 - Facteurs explicatifs pris en compte dans les indices 19

II.1.1 - Surface du bassin versant 19

II.1.2 - Forme du bassin versant 19

II.1.3 - Répartition des altitudes 21

II.2 - Indices de pente utilisés classiquement 22

II.2.1 - Indice de pente globale I_G 22

II.2.2 - Dénivelée spécifique D_s 22

II.2.3 - Indice de pente de Roche 22

II.2.4 - "Relief Ratio" 23

II.2.5 - Remarques 24

II.3 - Facteurs non pris en compte mais pouvant intervenir 24

II.3.1 - Géologie 25

II.3.2 - Réseau hydrographique 26

a - Hiérarchisation du réseau 26

b - Difficultés de mise en oeuvre 26

c - Les lois de Horton 28

d - Autres caractéristiques du chevelu 29

II.3.3 - Pentes des versants 30

CHAPITRE II

INVENTAIRE DES FACTEURS EXPLICATIFS ET DES INDICES DE PENTES

Dans un souci de reproductibilité des résultats d'un opérateur à l'autre, nous devons travailler sur des documents nécessitant le moins d'interprétation possible, et préciser un mode opératoire strict. Avec ces précautions, il est possible d'étudier quantitativement, les différents éléments explicatifs de la statistique des pentes.

II.1 - FACTEURS PRIS EN COMPTE DANS LES INDICES

Les facteurs pris en compte dans les indices de pente classiques, se mesurent directement sur cartes topographiques ou photos aériennes. Bien évidemment, l'échelle des cartes dont on dispose, conditionne la précision sur les valeurs que l'on va mesurer. Cependant, on peut avoir une bonne idée, a priori, de cette précision, comme l'ont montré différentes études (*). Les facteurs ainsi pris en compte se ramènent à trois éléments de la morphométrie :

II.1.1 - SURFACE DU BASSIN VERSANT

La délimitation du contour du bassin versant ne présente pas de difficultés à partir d'une carte topographique. La précision du tracé dépend de l'échelle de la carte, mais l'erreur commise sur la mesure de la surface est certainement très faible, de l'ordre de quelques pour cent.

II.1.2 - FORME DU BASSIN VERSANT

Les caractéristiques de forme du bassin versant sont très nombreuses. Elles ont pour but de rendre compte de la disposition dans le plan du bassin versant.

---

* P. DUBREUIL dans (11).

On a pour cela, souvent introduit la notion de périmètre P du bassin versant.

Le choix de cette variable est discutable car difficilement accessible à la mesure, et ce, pour plusieurs raisons :

- la précision du tracé dépend de l'échelle de la carte (il faudrait toujours déterminer les périmètres à partir de cartes à la même échelle).

- les petits détails du tracé n'ont pas d'influence sur la répartition des surfaces dans le bassin, mais ils augmentent considérablement le périmètre. Il est donc nécessaire de schématiser le contour.

- dans le cas de bassins repliés sur eux-mêmes, il convient d'allonger le périmètre suivant la ligne de partage des eaux sur le pli du bassin (*).

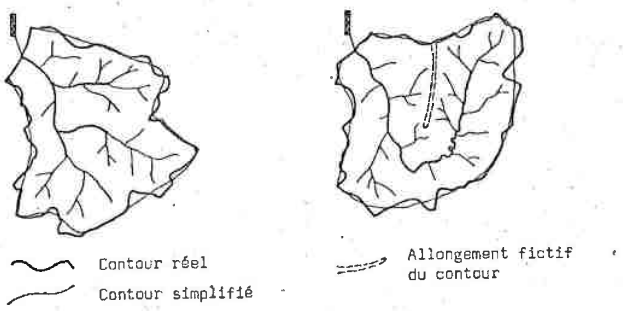


Fig. 3 - Périmètre d'un bassin versant

La mesure du périmètre P présente donc l'inconvénient de laisser une part d'interprétation à l'opérateur. De ce fait, on n'est pas assuré que cette mesure soit reproductible.

Connaissant la surface et le périmètre, on peut caractériser la forme du bassin versant par :

- le rectangle équivalent, rectangle de même périmètre et même surface que le bassin versant. (longueur L, largeur ℓ) :

$$S = L.\ell \quad ; \quad P = 2\,(L + \ell)$$

- le coefficient de compacité de Gravelius K_c, rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant même surface :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0{,}28\ \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Un autre procédé, qui ne présente pas l'inconvénient cité plus haut, consistera à mesurer la distance du centre de gravité du bassin versant à l'exutoire. Cette distance présente l'avantage de tenir compte de la position dans le bassin du réseau hydrographique (**).

* P. DUBREUIL dans (11) - M. ROCHE dans (24).
** Anonyme dans (31).

Enfin, d'autres éléments peuvent être pris comme des caractéristiques de la forme du bassin versant : rapport de la plus grande longueur à la plus grande largeur (perpendiculaire à la longueur), longueur du plus long thalweg, etc... (*).

II.1.3 - REPARTITION DES ALTITUDES

La façon la plus complète de représenter les altitudes est d'en donner la répartition en fonction de la surface ou du pourcentage de la surface. C'est ce que donne la courbe hypsométrique que l'on obtient à partir des courbes de niveau. Cette courbe peut être tracée point par point, en planimétrant les surfaces où l'altitude est supérieure à une cote donnée.

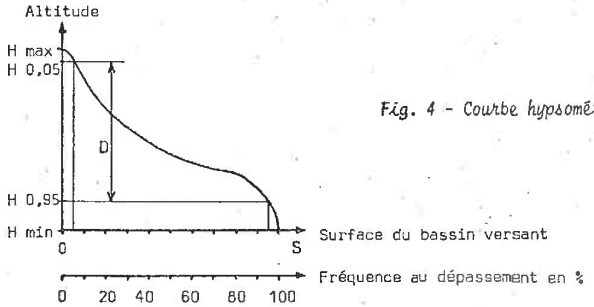


Fig. 4 - Courbe hypsométrique

L'altitude moyenne du bassin versant n'est pas prise directement en compte ; en effet, on admet généralement que cette donnée joue surtout sur le climat et non pas sur les pentes du bassin versant. Le problème se ramène donc à donner seulement un paramètre de dispersion des altitudes.

Le paramètre est généralement une différence entre deux altitudes caractéristiques. On utilise le plus souvent, la dénivelée D, définie comme la différence entre les cotes correspondant à 5 % et à 95 % de la surface (**). D'autres caractéristiques H du relief ont été proposées ; par exemple, le "relief maximum" (H max - H min) (*) ou le relief maximum sur le pourtour (différence entre la cote de l'exutoire et la cote maximale sur la frontière du bassin versant (*) . Enfin, on a encore mesuré H sur la plus grande longueur parallèle au thalweg principal (***), etc...

Toutes ces tentatives reviennent à admettre implicitement que l'on peut définir la répartition des altitudes à partir d'un seul paramètre de dispersion. Pour que cela soit possible, il faut d'une part, que la loi statistique à laquelle s'ajustent les altitudes soit toujours la même, et que d'autre part, cette loi soit à deux paramètres (tendance centrale et dispersion, et pas de paramètre de forme). Nous essaierons plus tard de voir ce qu'il en est.

* A. STRAHLER dans (27)
** P. DUBREUIL dans (9)
*** S.A. SCHUMM dans (26) page 612.

II.2 - INDICES DE PENTE CLASSIQUEMENT UTILISES

II.2.1 - INDICE DE PENTE GLOBALE I_G (* et **)

Cet indice simple a été mis au point pour l'étude de bassins représentatifs de faible superficie.

Le calcul en est rapide en estimant la dénivelée D d'après la carte topographique et en calculant la longueur du rectangle équivalent :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Bien souvent I_g est exprimé en mètres par kilomètre.

II.2.2 - DENIVELE SPECIFIQUE D_S

Il s'est avéré difficile de comparer les indices de pente globale de bassins versants de surfaces différentes. En effet, on a noté qu'il existait une relation statistique de la forme $I_g = a\,S^n$ entre l'indice de pente globale et la surface du bassin versant. Pour s'affranchir de cet effet de surface, on a introduit la notion de dénivelée spécifique D_s (***).

Sa formulation est la suivante : $D_s = I_g\, S^{1/2}$

mais en remarquant que $I_g = \frac{D}{L}$, $\quad D_s = D\,\frac{S^{1/2}}{L}$

Or, le rapport $\frac{S^{1/2}}{L}$ ne dépend que du coefficient de compacité; donc la dénivelée spécifique ne dépend que de la dénivelée D du bassin et de sa forme. On s'est bien affranchi de la surface du bassin versant, mais est-ce que la seule connaissance de l'intervalle de variation des altitudes permet de caractériser les pentes ?

II.2.3 - INDICE DE PENTE DE ROCHE I_p (****)

Cet indice se calcule à partir de la courbe hypsométrique et de la longueur du rectangle équivalent.

En effet, on trace sur le rectangle équivalent, des courbes de niveau parallèles à la largeur et donnant la même répartition hypsométrique. On obtient alors une surface ayant même aire, même périmètre et même hypsométrie que le bassin versant.

---

* Anonyme dans (31).
** P. DUBREUIL dans (11).
*** J. GUISCAFRE dans (12).
**** M. ROCHE dans (24).

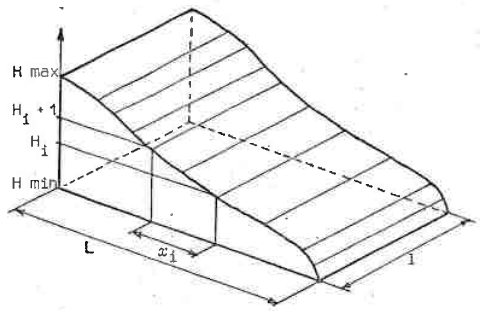


Fig. 5 - Rectangle équivalent

L'indice de pente de Roche est la moyenne pondérée par les surfaces de la racine carrée de la pente moyenne entre deux courbes de niveau.

Soit x_i la surface où les cotes sont comprises entre les valeurs H_i et H_{i+1} : la pente moyenne sur cet élément de surface est :

$$\frac{H_{i+1} - H_i}{x_i}$$

et l'indice de pente de Roche s'écrit :

$$I_p = \frac{1}{S} \sum x_i\, \ell \sqrt{\frac{H_{i+1} - H_i}{x_i}}$$

en remarquant que l'on a : $S = L.\ell$

$$I_p = \frac{1}{L} \sum x_i \sqrt{\frac{H_{i+1} - H_i}{x_i}}$$

et si β_i représente le pourcentage de la surface compris entre les cotes H_{i+1} et H_i, on obtient :

$$\beta_i = \frac{x_i}{L} \qquad I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{\beta_i\,(H_{i+1} - H_i)}$$

Sous cette forme-là, il est très net que l'indice de pente de Roche ne dépend que de la distribution statistique des altitudes et de la longueur du rectangle équivalent.

II.2.4 - "RELIEF RATIO"

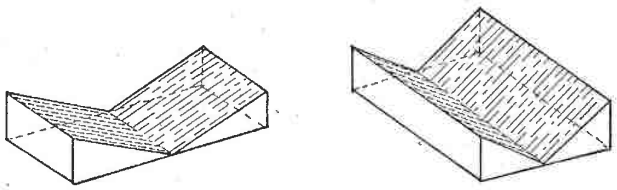
Plusieurs indices de pente sont définis à partir d'une des caractéristiques H du relief et d'une des longueurs caractéristiques de la forme du bassin. On peut citer par exemple :

$$RR = \frac{\text{Dénivelée maximum sur le pourtour}}{\text{Plus grande longueur parallèle au thalweg principal}} \quad (*)$$

$$RR = \frac{\text{Dénivelée maximum sur le pourtour}}{\text{Périmètre du bassin versant}} \quad (**)$$

II.2.5 - REMARQUES

Tous les indices cités se définissent à partir d'une longueur caractéristique, et parmi les indices les plus utilisés, cette longueur est celle du rectangle équivalent. Ce choix n'est pas toujours le meilleur. En effet, en schématisant un bassin versant en une gouttière rectangulaire formée par deux éléments plans, on peut déterminer différentes longueurs de référence qui permettent de caractériser la pente des versants.



Type 1

Type 2

Fig. 6 - Bassins versants schématisés

Soit H la dénivelée dans les deux cas : dans le type 1, la meilleure façon de caractériser les pentes des versants est de prendre le rapport $\frac{H}{L}$, mais dans le type 2, la meilleure solution serait $\frac{H}{\ell}$. Or, ce deuxième cas est très fréquent dans la région que nous étudierons plus loin.

Par ailleurs, à la confluence de deux bassins versants présentant le même relief, la longueur du rectangle équivalent aux deux bassins n'est pas nécessairement égale à celle de chacun des bassins élémentaires ; il s'en suivra que l'indice de pente de l'ensemble des deux bassins sera différent de celui de chacun des deux.

Ceci est très clair dans le cas de la confluence entre deux bassins indentiques : la répartition des altitudes est la même pour l'ensemble que pour chacun des deux bassins élémentaires. Par contre, la surface double, alors que le périmètre ne double pas.

II.3 - FACTEURS NON PRIS EN COMPTE MAIS POUVANT INTERVENIR

Les éléments pris en compte se résument donc à la surface, la forme et les altitudes du

* S.A. SCHUMM dans (26).
** M.A. MELTON dans (22).

bassin versant. Pour passer de ces éléments aux pentes, il faut connaître non pas seulement la statistique des altitudes, mais les variations relatives des altitudes. Ceci est le modelé du relief. Or, celui-ci dépend du climat, de la géologie, etc...

II.3.1 - GEOLOGIE

La géologie au sens large, peut avoir une influence sur le modelé. Cette influence se situe à trois niveaux : la nature lithologique du substratum, le style tectonique, et l'âge de cette tectonique.

Il est difficile d'apprécier par une valeur chiffrée l'âge et le style de la tectonique, et bien souvent, on est amené à se contenter d'un découpage en quelques classes types. Cet inconvénient est en partie compensé par le fait que le style tectonique est une variable régionale que l'on peut considérer bien souvent comme une constante sur une région.

Par contre, la nature lithologique des terrains varie très rapidement et il est nécessaire de préciser cette nature d'un bassin à l'autre. Pour ce faire, on a recours à un découpage en classes, selon cette nature. Pour étudier l'influence de la lithologie sur le modelé, il faut donc différencier les terrains en fonction de leurs qualités mécaniques. Il se trouve que par ailleurs, la nature lithologique des terrains influe également sur le régime hydrologique du bassin versant. Dans ce cas, il faut donc faire une classification suivant les propriétés hydrodynamiques des terrains. Ce deuxième usage est le plus fréquent, et seul le critère hydrodynamique est pris en compte dans la classification adoptée. Ceci explique peut-être la difficulté à faire apparaître d'une façon fine, l'influence de la nature géologique sur le modelé.

La classification adoptée par l'O.R.S.T.O.M. est faite selon ce type :

P1 : zone perméable à aquifère drainant ou non drainé
P2 : zone perméable à aquifère drainé
P3 : zone à perméabilité moyenne ou faible
P4 : zone karstique
P5 : zone imperméable

La classification du B.R.G.M. est de même nature (*) :

- terrain imperméable
- terrain semi-imperméable
- terrain perméable

Il est évident que ce mode de découpage ne peut satisfaire les deux usages que l'on veut en faire. Combiner les deux modes de découpage conduirait en principe à neuf classes : (perméable - semi-perméable - imperméable, et dur - semi-dur - tendre). En fait, toutes les combinaisons ne sont pas possibles, et dans la région Lorraine, il semble préférable d'adopter une classification purement lithologique, avec terrains cristallins et cristallophyliens, calcaires, grès, marnes et argiles.

* J. MARCAT dans (21).

L'agencement de ces cinq classes change selon que l'on considère les critères hydrodynamiques ou mécaniques.

Perméabilité croissante :

argiles et terrains cristallins < marnes < grès et calcaires

Dureté croissante :

argiles < marnes < grès < calcaires < cristallins

II.3.2 - RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le réseau hydrographique peut se caractériser par deux éléments : sa hiérarchisation et son développement (nombre et longueurs des cours d'eau).

a - HIERARCHISATION DU RESEAU

Pour chiffrer la ramification du réseau hydrographique, chaque cours d'eau a reçu un numéro fonction de son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, diffère selon les auteurs : HORTON (1945), STRAHLER (1952), SCHEIDEGGER (1965), SHREVE (1967) (*).

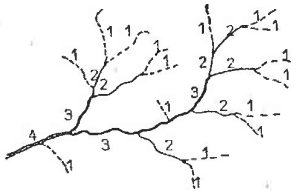


Fig. 7 - Classification de Strahler

Celle que nous allons utiliser est celle de STRAHLER (attribuée aussi parfois à SCHUMM). Dans cette classification, tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1. A la recontre de deux cours d'eau de même ordre, le cours d'eau en aval augmente d'un ordre. Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur au sien garde son ordre.

Ceci se résume sous la forme suivante:

ordre n + ordre n donne ordre n + 1
ordre n + ordre m donne ordre n (si n > m)
ou m (si m > n)

b - DIFFICULTES DE MISE EN OEUVRE

Cette classification paraît sans ambiguïté mais sa mise en oeuvre présente quelques difficultés.

* J.C. DOORNKAMP et CUCKLAINE A.M. KING dans (8).

En effet, elle prend pour départ le cours d'eau d'ordre 1. Celui-ci n'est en fait que le premier thalweg que l'on peut observer sur la représentation de la topographie dont on dispose. Cette notation est donc fonction de l'échelle de la carte. Cependant, des études effectuées sur des bassins versants en France permettent de définir la correspondance moyenne entre l'ordre lu sur la carte et l'ordre réel que révèle la photographie aérienne (*) :

Ordre réel	Ordre lu sur la carte	Echelle de la carte
2	1	20 000
3	1	50 000
4	1	100 000
5	1	200 000

D'autre part, l'ordre lu sur la carte dépend aussi de l'édition et du contexte (problème des ruisseaux sous couvert forestier, problème des hiérarchies dans les zones urbaines).

Les erreurs de graphisme ou d'observation peuvent avoir des conséquences assez fâcheuses, car l'ordre d'une rivière très importante peut changer du fait de l'oubli d'un cours d'eau d'ordre 1 comme le montre la figure 8.

Fig. 8 - Effet de l'oubli d'un thalweg d'ordre 1

Un problème identique se pose dans de nombreuses vallées glaciaires des Vosges où les cours d'eau descendant des versants se jettent dans un marécage drainé par le cours d'eau principal. Selon l'interprétation qui est faite du raccordement, les ordres des cours d'eau peuvent être modifiés comme le montre la figure 9.

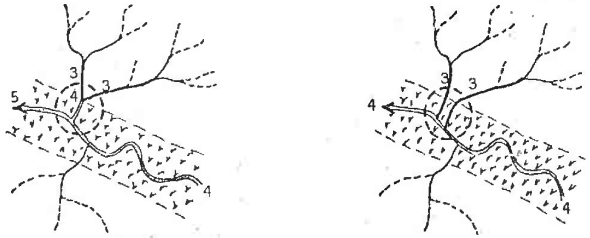


Fig. 9 - Effet d'un raccordement imprécis

* F. HIRSCH dans (16).

A la suite de ces différentes remarques, nous avons décidé de suivre la démarche suivante :

- utiliser un fond topographique uniforme (cartes I.G.N. au 1/50 000, à l'exclusion des cartes dites "orographiques-hydrographiques" car d'une édition ancienne et non disponible pour l'ensemble de la région.

- définir précisément la notion de thalweg : on a pris ici pour thalweg, tous les cours d'eau permanents ou temporaire. Ce choix peut paraître très arbitraire, mais comme on l'a vu plus haut, il existe une relation entre l'ordre lu sur la carte et l'ordre réel. Il en est certainement de même entre le premier cours d'eau apparaissant sur la carte et l'ordre réel. Aussi est-il préférable, dans un souci de reproductibilité, de laisser faire ce passage au photo-interprétateur de l'I.G.N. plutôt que de vouloir soi-même remonter au thalweg d'ordre 1 réel.

- définir une interprétation uniforme pour les cas douteux : ici, la première interprétation de la figure 9.

c - LES LOIS DE HORTON

Horton a, le premier, remarqué que le nombre des cours d'eau de différents ordre était en progression géométrique (selon son mode de classification, mais ceci est aussi valable pour la classification de Strahler). Soit N_x le nombre de cours d'eau d'ordre x ; il existe donc un rapport constant R_c appelé rapport de confluence, et qui s'écrit :

$$R_c = \frac{N_x}{N_x + 1}$$

Par suite, Horton a remarqué qu'il en était de même du rapport des longueurs moyennes des cours d'eau d'un même ordre. Soit $\overline{\ell_x}$ la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre x ; on a :

$$R_\ell = \frac{\overline{\ell_x}}{\overline{\ell_x + 1}}$$

Le rapport constant R_ℓ est appelé rapport des longueurs.

Une difficulté se présente pour la mesure au curvimètre des longueurs des cours d'eau, lorsque les faibles pentes engendrent des méandres du lit mineur. Il a été décidé de ne pas tenir compte dans ce cas, des différents méandres, mais de mesurer la longueur suivant la direction principale du cours d'eau.

La détermination de R_c et R_ℓ se fait par voie graphique, en portant, comme sur la figure 10, le logarithme de la longueur moyenne ou du nombre de cours d'eau en fonction de leur ordre.

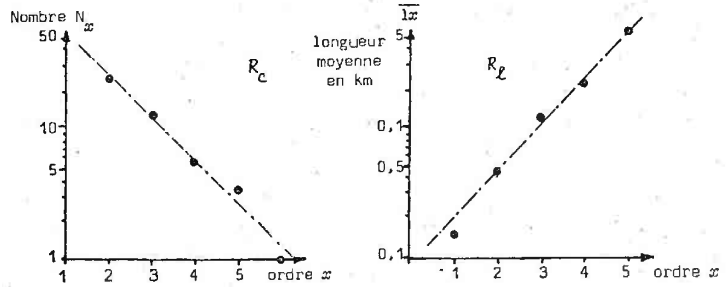


Fig. 10 - Détermination de R_c et R_ℓ

d - AUTRES CARACTERISTIQUES DU CHEVELU

D'autres éléments que R_c et R_ℓ sont pris comme caractéristiques du réseau hydrographique. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- la densité de drainage D_d :

Celle-ci se définit comme le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin versant :

$$D_d = \frac{\Sigma \ell_i}{S}$$

- la fréquence des thalwegs d'ordre 1, F1 :

C'est le rapport du nombre de thalwegs d'ordre 1 à la surface totale du bassin versant. On doit remarquer que l'inverse de cette fréquence ne représente pas la surface moyenne du bassin versant d'ordre 1.

Cependant, la taille moyenne du bassin versant d'ordre 1 et l'inverse de la fréquence des thalwegs d'ordre 1 sont certainement liés étroitement. Aussi, nous considérerons F1 comme un bon indice de la taille du bassin versant élémentaire.

- la courbe distance-surface (*) :

Cette courbe donne les surfaces du bassin versant situées à une distance de l'exutoire supérieure à un seuil donné.

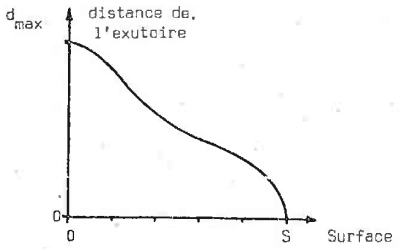


Fig. 11 - Courbe distance-surface

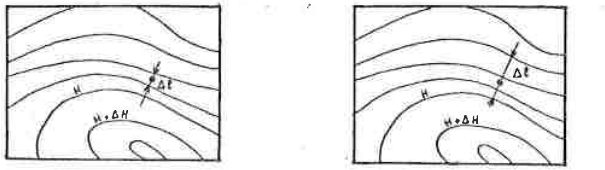
* Anonyme dans (31).

Cette courbe est difficile à obtenir puisqu'il faut mesurer les distances d'un point à l'exutoire en suivant les lignes de plus grande pente.

Par ailleurs, cet indice présente l'inconvénient de comptabiliser de la même façon les distances parcourues sur le sol et les distances parcourues par un cours d'eau.

II.3.3 - PENTE DES VERSANTS

Il paraît évident que les pentes des versants sont un facteur explicatif à prendre en compte dans un indice. Cependant, aucun indice ne s'appuie sur des mesures de pentes. La prise d'échantillons ponctuels de la valeur des pentes permettrait certainement d'obtenir un bon indice, mais cette façon de procéder semble à la fois lourde et imprécise. En effet, le calcul de la pente nécessite la mesure de la distance horizontale entre deux courbes de niveau. Pour augmenter la précision sur cette mesure, on est tenté d'augmenter la distance horizontale (l'erreur absolue sur la lecture reste constante et l'erreur relative décroît), c'est-à-dire de travailler sur une plus grande surface de terrain mais en augmentant la surface sur laquelle on opère la mesure, on s'écarte de la notion de pente ponctuelle pour atteindre la mesure d'une pente moyenne sur un élément de surface. Il y a donc incompatibilité entre mesure ponctuelle et mesure précise. Selon que l'on s'intéresse à l'étude de la pente en un point précis ou à l'étude globale de la statistique des pentes, on peut être amené à donner le pas à l'un ou l'autre de ces points de vue, comme on le verra plus tard.



Mesure ponctuelle mais imprécise

$$I = \frac{\Delta H}{\Delta l}$$

Mesure moyenne mais précise

$$I = \frac{3\,H}{\Delta l}$$

Fig. 12 - Difficultés de la mesure des pentes ponctuelles

CHAPITRE III

APPROCHE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT PAR LE CALCUL AUTOMATIQUE

Pages

III.1 - Contexte dans lequel on a entrepris cette étude 33

III.1.1 - Données altimétriques disponibles 33

III.1.2 - Programmes existants 33

III.1.3 - Adaptation des données morphométriques aux programmes existants 34

III.2 - Description des données 34

III.2.1 - Maillage du bassin versant 34

III.2.2 - Frontières du bassin versant 35

III.2.3 - Altitudes 35

III.2.4 - Présentation des cartes de données 36

III.3 - Description des méthodes de calcul 38

III.3.1 - Géométrie plane 38

a - Calcul du périmètre 38

b - Calcul de la surface 38

c - Calcul du rectangle équivalent et du coefficient de compacité 39

d - Centre de gravité 39

III.3.2 - Etude des altitudes 39

a - Courbe hypsométrique 39

b - Statistique des altitudes 41

III.3.3 - Indices de pente 42

a - Indice de pente de Roche 42

b - Indice de pente globale 42

III.3.4 - Etude des pentes 43

a - Calcul des pentes et des azimuts 43

b - Justification de la méthode 43

c - Relation entre azimut et pente 44

d - Statistique des pentes et courbe clinographique 44

pages

III.3.5 - Sous-programmes annexes 45

a - GRAPH 45
b - DISNI 45
c - DISN 45
d - TRANØR 46
e - TRAGAL 46
f - CØREL 46
g - SØRCØ 46

III.4 - Exemple d'uneétude type sur un bassin versant 47

III.4.1 - Sortie type du programme I.D.P. 47

III.4.2 - Corrélation entre pente réelle et pente calculée 47

III.4.3 - Autres sorties graphiques 47

a - Bloc-diagramme 47
b - Carte topographique 48

III.4.4 - Détection et correction des erreurs de données 48

a - Vérification des points frontière 50
b - Vérification des altitudes 50
c - Vérification des pentes calculées 51

III.4.5 - Coût d'une étude complète 52

CHAPITRE III

APPROCHE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT PAR LE CALCUL AUTOMATIQUE

III.1 - CONTEXTE DANS LEQUEL A ETE ENTREPRIS CETTE ETUDE

III.1.1 - DONNEES ALTIMETRIQUES DISPONIBLES

La façon classique de construire la courbe hypsométrique consiste à planimétrer les surfaces où l'altitude est supérieure à une valeur donnée. En planimétrant les surfaces correspondant à différentes altitudes, on peut construire point par point, la courbe hypsométrique.

Une autre façon de procéder consiste à prendre un échantillon d'altitudes et d'en tirer leur répartition statistique. Pour cela, on adopte généralement un maillage carré, et on admet que la cote du point situé au centre d'une maille représente la cote moyenne de la maille.

Cette façon de procéder n'est, ni plus courte, ni plus précise que la méthode par planimétrage, mais elle présente l'immense avantage d'avoir pour résultat intermédiaire, une matrice contenant les valeurs des altitudes h, et leur position relative. A partir de cette matrice, il sera donc possible de calculer des pentes, puisque l'on connaît point par point, la fonction $h = f(x, y)$ qui caractérise l'altitude h en fonction des abscisses x et ordonnées y sur le bassin versant.

III.1.2 - PROGRAMMES EXISTANTS

Depuis 1970, le Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Laboratoire du Centre National de la Recherche Scientifique, associé à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, a entrepris la mise au point de programmes de cartographie automatique. Les études effectuées par J.L. MALLET ont débouché sur la création d'une bibliothèque de sous-programmes permettant différentes opérations sur des données en trois dimensions. L'ensemble de cette bibliothèque peut se répartir en trois types de travaux : passage des données réparties non uniformément à des données réparties selon un maillage carré, opérations d'intégration et de dérivation à partir d'un maillage carré ; enfin, cartographie proprement dite à partir de ce maillage carré (* et **).

* J.L. MALLET dans (18).
** J.L. MALLET dans (19).

III.1.3 - ADAPTATION DES DONNEES MORPHOMETRIQUES AUX PROGRAMMES EXISTANTS

Pour les besoins de la construction de la courbe hypsométrique, il était nécessaire de lire les altitudes selon un maillage carré. Ces données ont été stockées dans un tableau unidimentionnel compatible avec les sous-programmes de J.L. MALLET, et il était alors possible d'accéder aux sous-programmes de dérivations qui permettent de calculer les pentes puis d'effectuer, par voie automatique, les calculs classiques d'indice de pente, de surface, de périmètre, etc...

Cette mise sur support informatique des données morphométriques ouvre par ailleurs, la voie à des études qu'il serait fastidieux d'effectuer à la main, telle l'étude du rapport entre la direction et la valeur de la pente, la direction et la fréquence des pentes, etc...

III.2 - DESCRIPTION DES DONNEES

III.2.1 - MAILLAGE DU BASSIN VERSANT

Le réseau aux noeuds duquel on mesure les altitudes est à mailles carrées. Les altitudes sont mesurées sur NX verticales et NY horizontales. Les noeuds de ce réseau sont numérotés de 1 à NX * NY, en procédant ligne par ligne, et de la gauche vers la droite. Le noeud correspondant à la $n^{ième}$ ligne est la $j^{ième}$ colonne, est donc repéré par le numéro : N° = NX * (I - 1) + J.

La taille des mailles est donnée par la distance PX entre deux verticales et la distance PY entre deux horizontales. Dans notre cas particulier, on a donc PX = PY. Ces valeurs seront fournies au programme en millimètres sur la carte utilisée. La position du maillage par rapport à un système d'axe (ox, oy) de référence, sera précisée sur la position (XO, YO) du noeud numéro un. Les valeurs de XO et YO seront également données ne millimètres sur la carte.

Les azimuts des pentes calculées sont donnés par rapport à l'axe des y. Il est donc préférable dans la mesure du possible, de prendre l'axe des y orienté Nord-Sud.

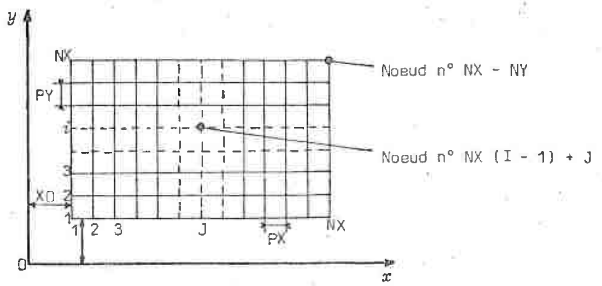


Fig. 13 - Différents éléments du maillage

Enfin, pour passer des données en millimètres sur la carte, aux données réelles sur le terrain, il convient de fournir l'échelle ECH de celle-ci.

III.2.2 - FRONTIERES DU BASSIN VERSANT

Les limites du bassin versant, constituées par des lignes de plus grande pente et par des lignes de crête, sont schématisées par une ligne brisée dont les cassures constituent ce que nous appellerons les "points-frontière". Par convention, nous numéroterons les points-frontière de 1 à NFRØN, en commençant par l'exutoire du bassin versant et en notant la succession des points-frontière en décrivant la périphérie du bassin (le sens de la rotation n'a pas d'importance). Afin de fermer le contour, on numérotera à nouveau NFRØN l'exutoire. Il en résulte que l'exutoire sera comptabilisé deux fois.

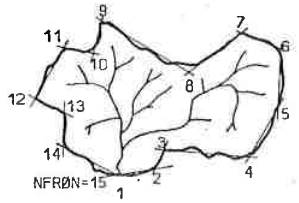


Fig. 14 - Numérotation des points-frontière

(dans l'exemple choisi, le contour du bassin s'appuie sur 14 points, mais on a NFRØN = 15).

Les abscisses et ordonnées de ces points-frontière seront mesurées en millimètres sur la carte utilisée et par rapport aux axes Ox et Oy. Ces deux valeurs sont rangées dans un tableau NFRØN (2, NFRØN) où FRØN (1, I) est l'abscisse du point-frontière numéro I et FRØN (2, I) son ordonnée.

III.2.3 - ALTITUDES

Le maillage ayant été réalisé, ainsi que le tracé de la frontière du bassin versant, on notera l'altitude en chaque noeud du réseau situé à l'intérieur du bassin.

Par ailleurs, le calcul de la pente en un noeud nécessite la connaissance des altitudes sur les 24 autres noeuds entourant le premier. Nous devons donc lire aussi l'altitude sur tous les noeuds susceptibles d'être utilisés pour les dérivations. Sur la figure suivante, on trouvera un exemple de noeuds où on doit lire l'altitude.

Dans la mesure du possible, on ménagera NX et NY de façon à avoir toujours les 24 noeuds autour des premiers points à l'intérieur du bassin.

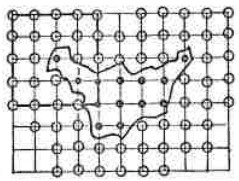


Fig. 15 - Altitudes dont la connaissance est nécessaire

III.2.4 - PRESENTATION DES CARTES DE DONNEES

La première carte donne les caractéristiques générales du bassin étudié, du maillage utilisé et de la carte topographique employée. Ces données se présentent sous la forme suivante :

colonnes 1 à 32 : nom en clair du bassin étudié (NØM)
colonnes 34 à 40 : échelle de la carte topographique. Ainsi, pour une carte au 1/50 000, on notera le nombre 50000 calé à droite (ECH)
colonnes 42 à 46 : cote maximale du bassin versant, en mètres (ZMAX)
colonnes 48 à 52 : cote minimale du bassin versant, en mètres (ZMIN)
colonnes 54 et 55 : le nombre de points-frontière (NFRØN)
colonnes 57 à 60 : l'abscisse XO en millimètres du noeud numéro 1
colonnes 62 à 65 : l'ordonnée YO en millimètres du noeud numéro 1
colonnes 67 et 68 : le nombre NX de verticales
colonnes 70 et 71 : le nombre NY d'horizontales
colonnes 73 à 75 : le pas en x (NX) exprimé en millimètres
colonnes 77 à 79 : le pas en y (NY) exprimé en millimètres
} NX = NY

Les cartes suivantes donnent les altitudes ligne par ligne, et à raison de 15 altitudes par carte (si NX = 47, une ligne nécessite 4 cartes de données).

Les cinq premières cases ne sont pas lues mais permettent de reconnaître l'ordre et la nature de la carte. A partir de la colonne 6, on notera les altitudes en mètres, dans 15 zones de cinq colonnes chacunes.

Dans le cas où on aurait NX = 47 et NY = 13, les altitudes seraient portées sur 4 × 13 = 52 cartes, les quatre premières porteraient les altitudes sur la première ligne, les quatre suivantes sur la deuxième ligne, etc...

A la suite des cartes donnant les altitudes, on trouve les cartes donnant les abscisses et ordonnées des points-frontière.

Sur chaque carte, on portera les coordonnées des points-frontière de la façon suivante :

colonnes 1 à 6 : ces colonnes ne sont pas lues, mais on pourra y indiquer la nature et l'ordre de la carte

colonnes 7 à 14
colonnes 15 à 22
colonnes 71 à 78
} 9 zones de deux fois 4 cases dans lesquelles on notera FRØN (1,i) et ordonnées FRØN (2,i) pour les NFRØN points-frontière successifs.

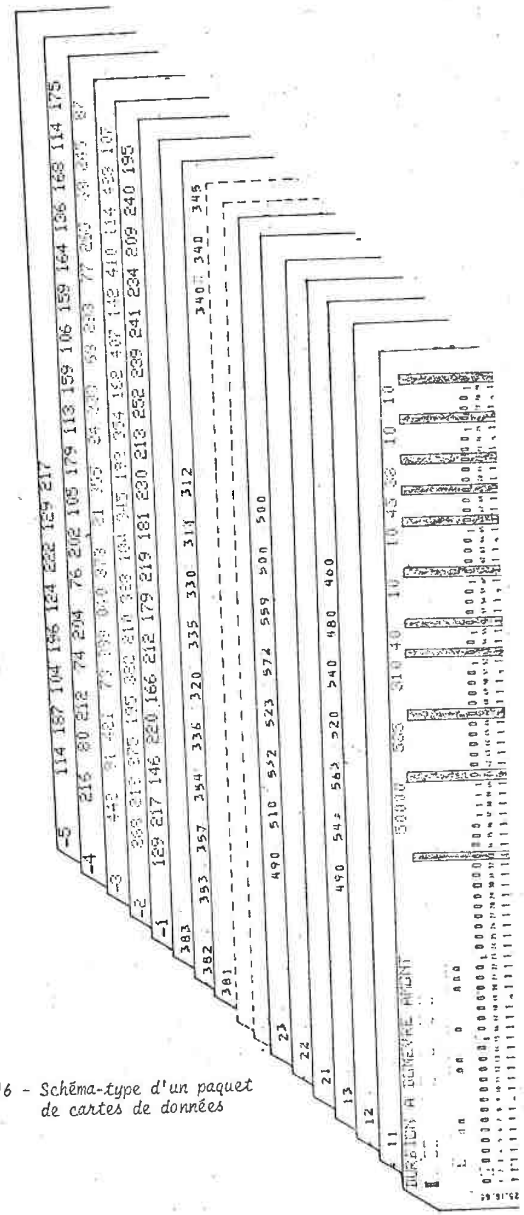


Fig. 16 - Schéma-type d'un paquet de cartes de données

On trouvera, figure 16, le schéma type d'un paquet de cartes de données.

III.3 - DESCRIPTION DES METHODES DE CALCUL

III.3.1 - GEOMETRIE PLANE

Dans un premier temps, nous examinons pour tous les noeuds du réseau, s'ils sont à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin versant. Pour ce faire, nous avons utilisé la fonction INØUT (X,Y,FRØN, NFRØN) décrite dans J.L. MALLET dans (20).

Cette fonction prend la valeur plus un ou moins un, selon que le point de coordonnées (X,Y) se trouve ou non à l'intérieur de la frontière. La valeur de INØUT pour le $i^{ème}$ noeud du réseau est rangé dans REZØ (2,i) et REZØD (2,i) [l'altitude et la pente au $i^{ème}$ noeud du réseau étant dans REZØ (1,i) et REZØD (1,i)]. Nous pouvons alors avoir une estimation de la surface du bassin versant en multipliant le nombre de point ITER situés à l'intérieur du bassin versant, par la surface d'une maille.

a - CALCUL DU PERIMETRE

Le périmètre PERI du bassin versant s'obtient aisément en calculant la somme des distances entre les points-frontière successifs, et en multipliant par un coefficient approprié, en tenant compte de l'échelle de la carte, de façon à obtenir le périmètre en kilomètres.

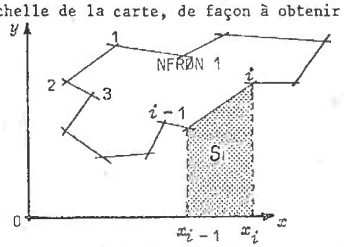
Soit x_i et y_i, les coordonnées du $i^{ème}$ point frontière :

$$PERI = K\ (\text{échelle}) \sum_{i=2}^{i=NFRØN} \sqrt{(x_i - x_i)^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

Cette valeur du périmètre correspond donc directement au contour discrétisé du bassin versant.

b - CALCUL DE LA SURFACE

Pour calculer la surface SURF du bassin, nous avons d'abord calculé la somme des surfaces algébriques comprises entre un segment de frontière, l'axe des x et deux verticales. Nous retenons pour surface du bassin, la valeur absolue de cette somme multipliée par un coefficient tenant compte de l'échelle de la carte, de façon à obtenir les surfaces en kilomètres-carrés.



$$S_i = (x_i - x_{i-1})\ (y_i + y_{i-1})\ /2$$

$$SURF = K\ (\text{échelle}) \sum_{i=2}^{i=NFRØN} S_i$$

Fig. 17 - Calcul de la surface du bassin versant

c - CALCUL DU RECTANGLE EQUIVALENT ET DU COEFFICIENT DE COMPACITE

Le coefficient de compacité CC est calculé par application de la formule donnée au paragraphe II.1.2 : $CC = 0{,}28 \frac{P}{\sqrt{SURF}}$.

De même, nous calculerons la longueur XLØ et la largeur XLA du rectangle équivalent de la façon suivante (*) :

$$XLØ = \frac{CC\ \sqrt{SURF}}{1{,}12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1{,}12}{CC}\right)^2}\right]$$

$$XLA = \frac{CC\ \sqrt{SURF}}{1{,}12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1{,}12}{CC}\right)^2}\right]$$

d - CENTRE DE GRAVITE

Pour calculer l'abscisse et l'ordonnée du centre de gravité, nous avons admis que la surface du bassin versant pouvait être représentée par l'ensemble des carrés élémentaires de côté PX = PY centré sur les noeuds intérieurs du bassin. Moyennant cette hypothèse, l'abscisse AX et l'ordonnée AY du centre de gravité du bassin sont les abscisses et les ordonnées moyennes des noeuds intérieurs du bassin.

Si x_i et y_i représentent les coordonnées du $i^{ème}$ point intérieur au bassin, on a :

$$AX = \frac{\sum_{i=1}^{ITER} x_i}{ITER} \quad ; \quad AY = \frac{\sum_{i=1}^{ITER} y_i}{ITER}$$

Cette façon de procéder provoque une erreur sur la détermination de AX et AY puisque ce n'est pas le centre de gravité du bassin, mais d'une surface qui ne tend vers le bassin que lorsque PX et PY tendent vers zéro.

Il ne semble cependant pas que, pour des bassins où ITER dépasse 100, l'erreur commise sur AX et AY dépasse la précision graphique du millimètre sur la carte.

Pour obtenir la distance DCG de l'exutoire, au centre de gravité, nous faisons directement le calcul à partir des coordonnées du point-frontière numéro 1 et de AX et AY...

III.3.2 - ETUDE DES ALTITUDES

a - COURBE HYPSOMETRIQUE

Comme pour la courbe clinographique, la courbe hypsométrique peut se définir comme la courbe donnant les altitudes (en ordonnées) en fonction de leur fréquence au dépassement.

* M. ROCHE dans (24).

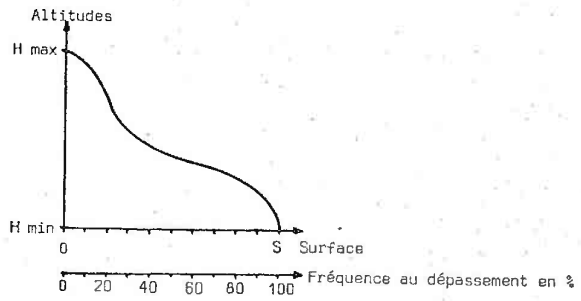


Fig. 18 - Fréquence au dépassement des altitudes

Pour tracer cette courbe, il faut donc associer à chaque valeur de l'altitude, sa fréquenc expérimentale au dépassement. Pour cela, nous avons adopté la méthode suivante (*) :

Nous rangeons par ordre décroissant, l'échantillon des ITER altitudes aux noeuds intérieur au bassin. Nous affectons à la $i^{ème}$ valeur, la fréquence empirique au dépassement F, calculée p

$$F(H_i) = \frac{i - 0,5}{ITER}$$

ce qui semble être la meilleure façon de procéder.

La courbe que l'on obtient ainsi est-elle d'une bonne précision ?

En anticipant sur les résultats que nous décrirons plus loin, nous pouvons considérer que altitudes mesurées aux noeuds d'un bassin versant homogène, sont distribuées selon une loi de G tronquée. Et on voit alors que la dénivelée $D = H_{95\ \%} - H_{5\ \%}$, est sensiblement égale à quatre f l'écart type des altitudes :

$$D \simeq 4\ \sigma_H$$

Nous pouvons alors déterminer l'erreur commise σ_{H_P} sur l'estimation de l'altitude H_P ayant une probabilité P d'être dépassée. On a effet la relation (**) :

$$\sigma_{H_P} = \frac{\sigma_H}{\sqrt{2\,n}} \sqrt{u_P^2 + 2}$$

où n est le nombre d'éléments de l'échantillon, et u_P la valeur de la variable réduite de Gauss correspondant à la probabilité P.

$$\sigma_{H_P} = \frac{D}{4\sqrt{2\,n}} \sqrt{u_P^2 + 2}$$

Pour que l'erreur type commise sur l'estimation de $H_{20\ \%}$ soit inférieure à 2 % de D, on d donc avoir :

$$0,02 \geq \frac{\sqrt{u_P^2 + 2}}{4\sqrt{2\,n}}$$

* Y. BRUNET-MORET dans (4).
** P. DUBREUIL dans (13).

A la probabilité 20 % correspond la variable réduite de Gauss u = 0,84 et le nombre n de points intérieurs au bassin doit donc être :

$$n \geq \left[\frac{50\sqrt{0,84^2 + 2}}{4\sqrt{2}}\right]^2$$

$$n \geq 211$$

Si on veut avoir la même précision sur $H_{10\ \%}$, on devra avoir :

$$F = 10\ \% \Longrightarrow u = 1,28$$

$$n \geq 284$$

Les bassins que nous étudierons ont des surfaces allant de 50 à 200 km² et comme nous prenons un maillage de 500 m de côté, le nombre de points intérieurs aux bassins, oscille entre 200 et 800. La précision sur l'estimation de H_P exprimée en pourcentage de D, sera donc comprise entre les nombres suivants :

P	u	n = 200	n = 800
$H_{5\ \%}$	1,64	2,7 %	1,4 %
$H_{10\ \%}$	1,28	2,4 %	1,2 %
$H_{20\ \%}$	0,84	2,0 %	1,0 %
$H_{25\ \%}$	0,68	2,0 %	1,0 %
$H_{33\ \%}$	0,43	1,9 %	0,9 %
$H_{50\ \%}$	0	1,8 %	0,9 %

Nous sommes donc assurés d'avoir une précision toujours acceptable pour la détermination des altitudes comprises en $H_{20\ \%}$ et $H_{30\ \%}$.

b - STATISTIQUE DES ALTITUDES

Cet échantillon de ITER altitudes est présenté également dans un graphique de Gauss, avec les altitudes en ordonnée et les fréquences expérimentales en abscisse (graduation arithmétique en variable réduite de Gauss). Si les altitudes sont distribuées normalement, les points s'alignent dans ce système de coordonnées. Pour évaluer la qualité de l'ajustement, nous n'avons pas jugé utile d'effectuer un test (type χ^2) car les écarts observés se produisent surtout pour les fréquences rares, fréquences pour lesquelles les points n'ont guère de poids dans ces tests. Nous nous contenterons donc de qualifier l'adéquation et l'ajustement uniquement à la vue du graphique.

Une deuxième présentation de l'échantillon des altitudes a été effectuée en l'ajustant à une loi de Galton. Nous portons dans ce cas, le logarithme décimal des altitudes en fonction de la fréquence expérimentale (graduation arithmétique en variable réduite de Gauss).

III.3.3 - INDICES DE PENTE

a - INDICE DE PENTE DE ROCHE

L'indice de pente de Roche est calculé sur vingt tranches égales d'altitude. Nous calculerons donc les 19 altitudes comprises entre ZMAX et ZMIN qui divisent cet intervalle en vingt tranches égales.

Pour une de ces altitudes H, il faut trouver le pourcentage de la surface où l'altitude est supérieure à H. Nous cherchons le rang fictif R_i de cette altitude H dans l'échantillon des altitudes aux noeuds du réseau.

Différents cas peuvent se présenter :

- H est compris entre les altitudes de rang i et i + 1. On calcule alors le rang fictif R_i en interpolant linéairement suivant les valeurs relatives de H_i, H_{i+1} et H.

- H est égal à une altitude particulière de rang i; si H_i et H_{i+1} sont différents, on posera $R_i = i$; si les n valeurs suivantes de H_i sont égales ($H_i = H_{i+1} = \dots H_{i+n}$), on associera à R_i la valeur moyenne :

$$R_i = \frac{\Sigma i + (i+1) \dots + (i+n)}{n}$$

- H est supérieure à H1 (ou inférieure à H_{ITER}). Nous avons adopté pour le calcul des fréquences expérimentales, la formule $F = \frac{i-0,5}{n}$. Par conséquent, lorsque H varie de ZMAX à ZMIN, et par conséquent F de 0 à 1, R_i doit varier de 0,5 à ITER + 0,5. Nous calculerons donc R_i en interpolant linéairement entre I = 0,5 et I = 1 (entre i = ITER et i = ITER + 0,5) en fonction des valeurs relatives de H, ZMAX et H1 (ou H, ZMIN et H_{ITER}).

Pour obtenir le pourcentage P de la surface où l'altitude est supérieure à H, nous calculerons $P = \frac{R_i - 0,5}{ITER}$.

Il suffit alors de soustraire à cette valeur de P celle obtenue pour l'altitude précédente, pour obtenir le pourcentage S_i de la surface comprise dans la tranche d'altitude considérée. On calcule alors l'indice de pente de Roche RIP :

$$RIP = \frac{1}{\sqrt{XL\emptyset}} \sum_{i=1}^{20} \frac{ZMAX - ZMIN}{20} \times P_i$$

Afin de rendre RIP indépendant des unités, les altitudes et les longueurs sont exprimées en kilomètres.

b - INDICE DE PENTE GLOBAL

Pour calculer l'indice de pente global RIG, nous devons d'abord déterminer la dénivelée D, comprise entre $H_{95\ \%}$ et $H_{5\ \%}$. Pour cela, nous calculons le rang fictif R_i qui correspond aux fréquences 95 % et 5 % :

$$R_i = 0,05\ ITER\ 0,5 \text{ et } R_i = 0,95\ ITER + 0,5$$

La détermination de D étant sommaire, nous pouvons ne retenir pour valeur de R_i que la valeur entière et nous calculons alors D par différence entre les altitudes de rang $R_{i_{5\%}}$ et $R_{i_{95\ \%}}$.

L'indice de pente global RIG sera donné sans dimension, en faisant :

$$RIG = \frac{D \text{ (en mètres)}}{XL\emptyset \text{ (en mètres)}}$$

III.3.4 - ETUDE DES PENTES

a - CALCUL DES PENTES ET DES AZIMUTS

Nous avons utilisé la fonction FXY (X, Y, IDX, IDY, KF, REZØ) décrite par J.L. MALLET dans (20). Cette fonction donne la dérivée IDX fois par rapport à x et IDY fois par rapport à y de la fonction $h = f(x, y)$ donnée point par point dans la ligne KF du tableau REZØ.

Nous posons donc $GX = \frac{\partial h(x, y)}{\partial x}$ et $GY = \frac{\partial h(x, y)}{\partial y}$.

Selon les valeurs relatives de GX et GY, nous calculons l'azimut AZ de la ligne de plus grande pente descendante par rapport à l'axe Ox (Nord-Sud généralement).

De la même façon, nous calculons à partir de GX et GY, la plus grande pente P en tenant compte de l'échelle de la carte.

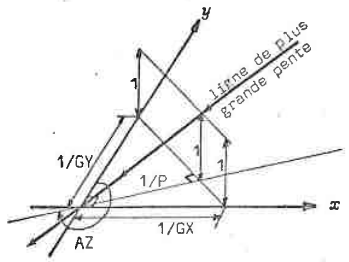


Fig. 19 - Différents éléments de la ligne de plus grande pente

b - JUSTIFICATION DE LA METHODE

La topographie d'un bassin versant peut être considérée comme une fonction $H = f(x, y)$ où H est l'altitude en un point de coordonnées x et y.

Nous pouvons facilement supposer que cette fonction $H = f(x, y)$ est continue, dérivable et univoque [une et une seule valeur de H pour un couple (x, y)]. Moyennant ces hypothèses, on est assuré de pouvoir présenter cette fonction avec une approximation polynominale $\hat{f}(x, y)$ et avec n'importe quelle précision fixée à l'avance.

Nous avons ici choisi, a priori, de représenter la surface topographique au voisinage d'un

point par une interpolation de Lagrange, basée sur les 25 noeuds les plus proches (au sens défini au paragraphe II.2.3).

Ceci revient à admettre que la topographie peut être représentée par un polynome de degré 4 en x et 4 en y :

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{i=0}^{4} \cdot \sum_{j=0}^{4} \cdot a_{ij}\, x^i\, y^j$$

Les paramètres a_{ij} se calculent en égalant ces estimations aux altitudes, aux 25 points choisis. Nous avons alors le système suivant :

$$\begin{cases} \hat{f}(x, y) = \sum_{i=0}^{4} \cdot \sum_{j=0}^{4} \cdot a_{ij}\, x^i\, y^j \\ \hat{f}(x_i, y_i) = H_{ij} \quad \forall \begin{cases} i = (0,1,2,3,4,) \\ j = (0,1,2,3,4,) \end{cases} \end{cases}$$

La précision sur l'estimation de la fonction $H = f(x, y)$ ne dépend plus maintenant que de la distance entre les points d'échantillonnage. Lorsque cette distance augmente, l'estimation de $H = f(x, y)$ est de plus en plus lissée, et les pentes que nous allons calculer seront des pentes moyennes. Selon les dimensions des reliefs dont on veut rendre compte, il faudra augmenter ou diminuer le pas d'échantillonnage en x et en y. Si nous désirons mettre en évidence les thalwegs correspondant à des bassins versants d'ordre 1, il faudra qu'au moins trois points tombent dans ce bassin élémentaire. Afin d'avoir des précisions comparables, il conviendrait donc d'adapter le pas d'échantillonnage à la taille du bassin d'ordre 1 pour chaque bassin versant.

Nous avons suivi ici une autre voie qui consiste à se donner a priori, un pas d'exploration et d'évaluer ensuite l'erreur commise sur l'estimation des pentes, par comparaison avec des mesures "ponctuelles" effectuées sur la carte topographique.

Nous pouvons espérer étudier alors, statistiquement, la relation entre l'estimation de la pente calculée (lissée), la pente mesurée (ponctuelle), et la taille du bassin versant d'ordre 1.

Afin de visualiser le "lissage" tant pour l'azimut que pour la pente, nous pourrons comparer les courbes de niveau réelles aux courbes de niveau tracées à partir de l'estimation des pentes par cette méthode (sous-programme ISØVAL de J.L. MALLET).

c - RELATION ENTRE AZIMUT ET PENTE

Les pentes en chaque noeud intérieur au bassin, sont portées en abscisse en fonction de leur azimut. Ensuite, nous avons classé les ITER azimuts, ce qui permet de déterminer le pourcentage des surfaces exposées suivant différentes directions.

d - STATISTIQUE DES PENTES ET COURBE CLINOGRAPHIQUE

Pour établir la courbe clinographique, nous avons procédé avec les pentes comme pour la courbe hypsométrique avec les altitudes. Les précisions des estimations données au paragraphe III.3.2-a, demeurent valables, mais sont exprimées en pourcentage de l'intervalle de variation des pentes entre 5 % et 95 % de la surface.

L'échantillon des pentes a été ajusté graphiquement à une loi de Gauss et à une loi de Galton. Le procédé est identique à celui utilisé pour les altitudes.

III.3.5 - SOUS-PROGRAMMES ANNEXES

Nous ne décrirons pas ici, les sous-programmes INØUT et FXY cités plus haut, et qui sont dus à J.L. MALLET. On trouve tous renseignements les concernant dans (20) et (21).

Nous ne décrirons ici que les sous-programmes écrits dans le cadre de cette étude. On en trouvera les listings en annexe.

a - SUBROUTINE GRAPH (N, X, Y, XMIN, YMIN, XMAX, YMAX)

Ce sous-programme provoque l'impression d'un graphique comprenant 50 lignes et 100 colonnes, gradué arithmétiquement suivant l'axe des x de XMIN à XMAX et de YMIN à YMAX, suivant l'axe des y. N points sont portés dans ce graphique en prenant pour valeurs de x et y, les N valeurs contenues dans les tableaux à une dimension X et Y.

Le programme indique en clair les échelles ainsi choisies, ainsi que le nombre de points portés.

b - FUNCTION DISNI (P)

Cette fonction calcule la valeur de la variable réduite de Gauss u, correspondant à la probabilité P :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u} e^{-\frac{u^2}{2}}\, du$$

Pour ce faire, nous avons utilisé l'approximation suivante (*) pour P inférieur ou égal à 0,5 :

$$u = x - \sum_{i=0}^{2} a_i\, x^i \;/\; \sum_{i=1}^{3} b_i\, x^i$$

avec $x = \sqrt{\mathrm{Ln}\,(1/P^2)}$

$a_0 = 2{,}515517$	$b_0 = 1{,}432788$
$a_1 = 0{,}802853$	$b_1 = 0{,}189269$
$a_2 = 0{,}010328$	$b_2 = 0{,}001308$

c - FUNCTION DISN (u)

Cette fonction calcule la valeur de la probabilité au non-dépassement correspondant à la valeur u de la variable réduite de Gauss.

Nous avons utilisé l'approximation suivante (*) pour u positif :

(*) M. ABRAMOWITZ dans (29).

$$P = 1 - f(u) \sum_{i=1}^{5} a_i x^i$$

avec $x = 1 / (1 + a_0 u)$

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

$a_0 = 0,2316419$ $a_3 = 1,781478$

$a_1 = 0,3193815$ $a_4 = 0,821256$

$a_2 = -0,3565638$ $a_5 = 1,330274$

d - SUBROUTINE TRANØR (N, X, XMIN, XMAX)

Ce sous-programme permet de réaliser un ajustement graphique à une loi de Gauss en portant les N valeurs obtenues dans le tableau X en fonction de leur fréquence expérimentale au non-dépassement. Les valeurs sont portées arithmétiquement entre les bornes XMIN et XMAX, les fréquences sont portées en abscisses selon une graduation de Gauss allant de u = -2,5 à u = +2,5.

e - SUBROUTINE TRAGAL (N, X, XO, XMIN, XMAX)

Ce sous-programme permet de réaliser un ajustement graphique à une loi de Galton en portant les N valeurs contenues dans le tableau X en fonction de leur fréquence expérimentale au non-dépassement. Les valeurs de $\log_{10} [X_{(i)} - XO]$ sont portées arithmétiquement en ordonnée entre les valeurs de log (XMIN - XO) et log (XMAX - XO), les fréquences sont portées en abscisse selon une graduation de Gauss allant de u = -2,5 à u = +2,5.

f - SUBROUTINE CØREL (N, X, Y, XM, YM, SX, SY, R, AX, BX, AY, BY, SYX, SXY)

Ce sous-programme effectue la régression linéaire entre les N couples de points contenus dans les tableaux à une ligne X et Y. Les arguments de sortie sont :

XM et YM	moyennes des x et des y
SX et SY	estimation de l'écart-type des x et des y
R	coefficient de corrélation
AX et BX	coefficients de la droite de régression de y en x : $y = ax + b$
AY et BY	coefficients de la droite de régression de x en y : $x = ay + b$
SYX et SXY	erreurs-types commises sur l'estimation de y à partir de x et de x à partir de y

g - SUBROUTINE SØRCØ (N, XM, YM, SX, SY, R, AX, BX, AY, BY, SYX, SXY)

Ce sous-programme provoque l'impression d'un tableau récapitulant les résultats obtenus par CØREL. Les arguments de SØRCØ ont la même signification que ceux de CØREL.

III.4 - EXEMPLE D'UNE ETUDE TYPE SUR UN BASSIN VERSANT

Nous présentons ici, l'ensemble des résultats obtenus par le calcul automatique, à partir des données établies comme il a été dit au paragraphe III.2. L'ensemble des résultats provient de différents programmes et sous-programmes qui ne sont pas systématiquement utilisés. Nous décrivons donc ici, le maximum de résultats qu'il est possible d'obtenir en l'état actuel des choses.

III.4.1 - SORTIE TYPE DU PROGRAMME I.D.P.

On trouvera dans l'annexe A, le listing brut obtenu par appel du sous-programme I.D.P. Les résultats mentionnés ont deux buts : de permettre d'abord une vérification des données, puis la détermination des paramètres physiques du bassin versant. Nous décrirons dans les paragraphes suivants, les vérifications qu'il est possible de faire. L'exploitation des résultats a été présentées dans les annexes.

III.4.2 - CORRELATION ENTRE PENTE REELLE ET PENTE CALCULEE

Pour chaque bassin et après le passage du programme I.D.P., nous avons mesuré sur la carte topographique, les plus grandes pentes selon un maillage de dimension double du précédent. Ainsi avons-nous pu, pour un point sur quatre, obtenir à la fois la pente calculée et la pente mesurée (ou pente "réelle"). Nous avons alors effectué des corrélations sur ces données. Cependant, dans le but que nous poursuivons, nous ne nous intéressons pas tellement à la pente en un point donné, mais plutôt à la répartition statistique des pentes. Compte tenu de cette remarque, nous avons également effectué des régressions linéaires sur les pentes et le log des pentes après les avoir classés. Une bonne corrélation linéaire signifie seulement que les lois de distribution sont du même type.

III.4.3 - AUTRES SORTIES GRAPHIQUES

En utilisant d'autres programmes de la bibliothèque de programmes de J.L. MALLET (en particulier ISØVAL et ISØBLØ), il est possible d'obtenir très aisément toute une série de sorties graphiques dont nous donnerons ici deux exemples. Ces travaux n'ont pas été effectués systématiquement, mais uniquement sur quelques bassins caractéristiques de chaque type de relief, afin de vérifier la fiabilité de la méthode.

a - BLOC DIAGRAMME

Cette présentation des résultats permet de visualiser la topographie du bassin versant schématisé. Son exploitation ne peut guère qu'être qualitative, bien que la représentation soit

isométrique et à l'échelle de la carte au 1/50 000. Les altitudes ont été par contre multipliées par 4.

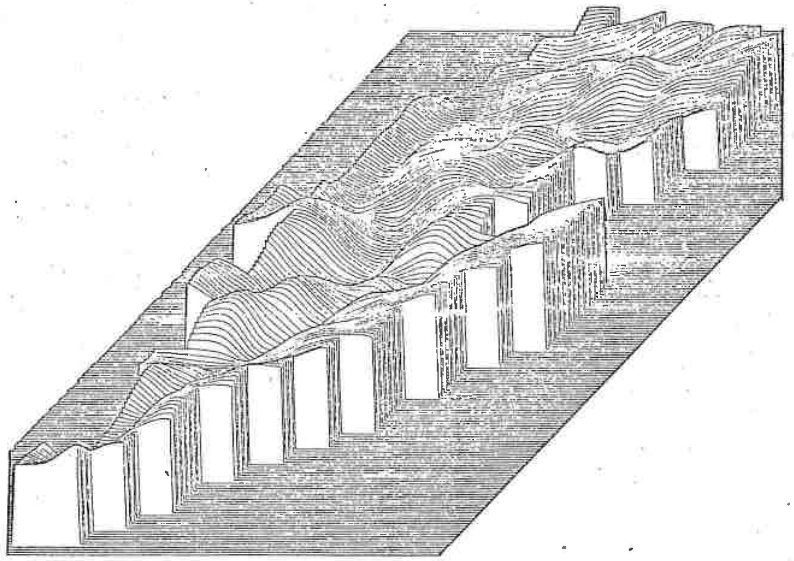


Fig. 20 - Bloc-diagramme du bassin de la Meurthe à Fraize

b - CARTE TOPOGRAPHIQUE

Cette présentation permet de comparer directement le bassin schématisé aux données cartographiques de base, et de comparer les azimuts des pentes calculées à ceux des pentes réelles.

Nous présentons ci-après, la carte topographique calculée au 1/50 000 du bassin de la Meurthe à Fraize.

Des essais de cartographie des pentes ont été également calculés. Cependant, cette donnée se prête mal à la cartographie détaillée du fait de sa très grande variabilité spatiale, et les résultats graphiques obtenus ont été décevants. Par ailleurs, l'estimation de la pente en un point est médiocre, bien qu'elle soit bonne lorsque l'on considère l'ensemble des pentes, aussi les cartes obtenues représentent-elles un faible intérêt.

III.4.4 - DETECTION ET CORRECTION DES ERREURS

Toutes les données introduites dans le modèle sont imprimées en sortie, ce qui permet de vérifier, a posteriori, leur exactitude.

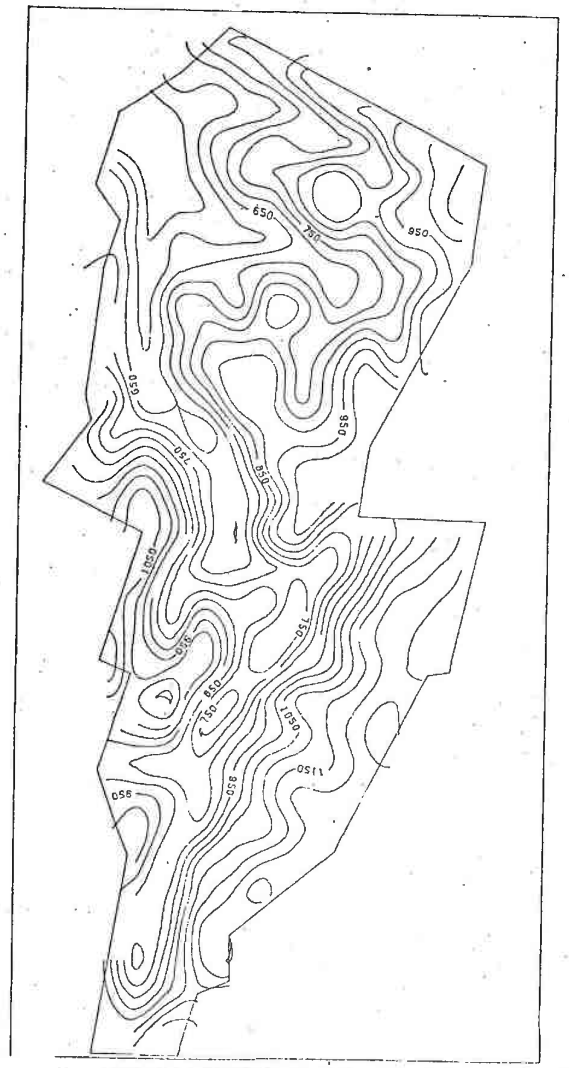


Fig. 21 - Carte topographique calculée du bassin de la Meurthe à Fraize

a - VERIFICATION DES POINTS-FRONTIERE

Les données d'altitudes sont sorties carte par carte et ligne par ligne ; on peut ainsi reconstituer le maillage du bassin versant. Les points à l'intérieur du bassin sont comptés positivement et les points extérieurs négativement. Ceci permet de tracer schématiquement le contour du bassin et en vérifiant que chaque point intérieur est entouré par 24 valeurs non nulles ; on s'assure que les points-frontière ne sont pas erronés.

0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
-320.	-319.	0.	0.	0.	0.	0.
-335.	-345.	0.	0.	0.	0.	0.
-340.	-350.	-361.	345.	341.	0.	0.
-354.	-342.	-338.	0.	0.	0.	0.
-351.	-343.	-338.	0.	0.	0.	0.
351.	-345.	-348.	338.	345.	-349.	0.
349.	-350.	-350.	349.	330.	-356.	0.
342.	348.	353.	357.	356.	-368.	-360.
348.	349.	350.	-355.	361.	-370.	-375.
352.	359.	358.	-365.	-373.	-368.	-386.
360.	362.	365.	-376.	-384.	-375.	-395.
370.	378.	372.	-380.	-398.	-378.	-402.
370.	391.	380.	-401.	-413.	-389.	-407.
382.	400.	396.	-421.	-404.	-421.	-425.
380.	410.	407.	-428.	-420.	-430.	0.
410.	425.	431.	-445.	-450.	-490.	0.
440.	459.	420.	-455.	-475.	-560.	0.
452.	496.	440.	480.	-540.	-611.	0.
490.	511.	480.	555.	-585.	-570.	0.
-515.	526.	545.	583.	-560.	-540.	0.
-532.	-523.	-572.	-559.	-500.	-500.	0.
-545.	-563.	-520.	-540.	-480.	-460.	0.

Fig. 22 - Exemple de détection d'une erreur sur les points-frontière

b - VERIFICATION DES ALTITUDES

Deux types d'erreurs se produisent assez fréquemment. L'ensemble des altitudes d'une ligne est parfois décalé d'une ou plusieurs colonnes. Cette erreur se détecte facilement sur le même tableau que précédemment, puisque l'on trouvera par exemple, trois cotes négatives à l'extrémité d'une ligne, et une seule cote négative à l'autre extrémité.

Un autre type d'erreur est une cote décalée d'une colonne (la lecture de cette donnée donne alors le dixième de décuple). Cette erreur provoque dans la topographie, un trou ou un pic énorme. De ce fait, les pentes calculées sur les quatre points qui encadrent la valeur erronée, sont très fortes et orientées Est-Ouest et Nord-Sud. Sur le graphique donnant les azimuts en fonction de la pente, on trouvera donc quatre points isolés comme ci-après.

Par contre, il est pratiquement impossible de détecter les erreurs sur les altitudes qui ne provoquent pas le calcul de pentes très fortes. Ce type d'erreur ne peut être reconnu que si la cote erronée (erreur de frappe ou de lecture) est extérieure au domaine (ZMAX ; ZMIN). Ceci est visible d'après le tableau donnant les altitudes classées.

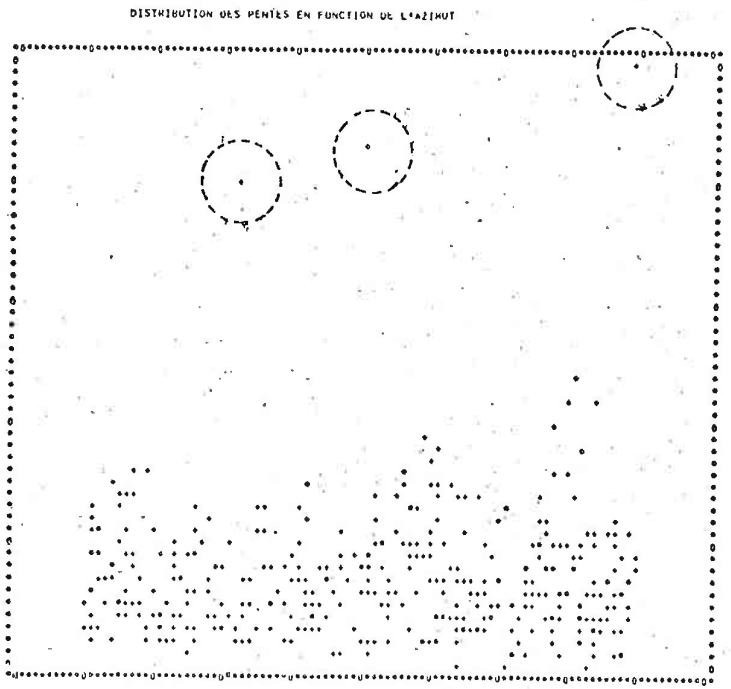


Fig. 23 - Exemple de détection d'une erreur sur les altitudes

c - VERIFICATION DES PENTES CALCULEES

Systématiquement, nous avons corrélé une fois tous les quatre noeuds, les pentes calculées avec les pentes mesurées aux mêmes points. Les coefficients de corrélation obtenus sur les 29 bassins étudiés oscillent entre 0,3 et 0,65 et sont donc toujours significatifs sauf pour quelques très petits bassins.

Afin de vérifier l'azimut des pentes calculées, on peut comparer les directions des courbes de niveau puisqu'elles sont perpendiculaires aux lignes de plus grande pente. Ce travail a été effectué sur les bassins pour lesquels on avait tracé les cartes topographiques calculées. Les résultats ont toujours été satisfaisants comme peut le montrer l'exemple suivant et les thalwegs d'ordre 1 sont presque toujours marqués dans la topographie schématisée.

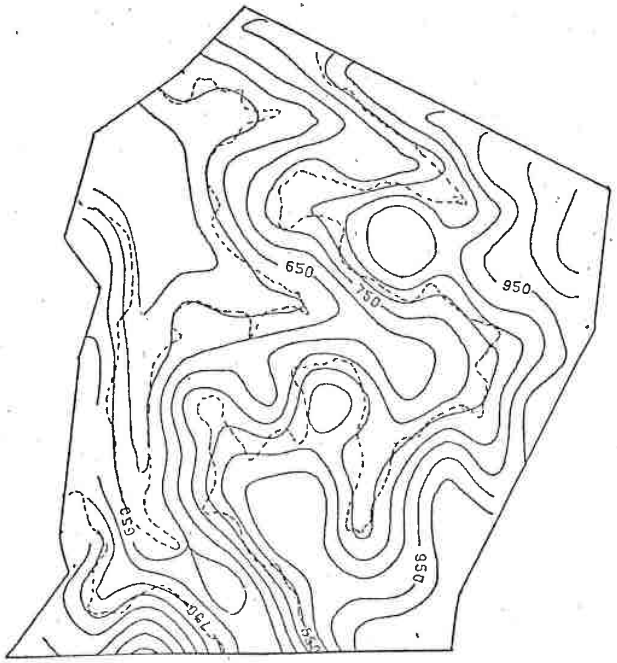


Fig. 24 - Comparaison entre ligne de niveau mesurée et calculée

III.4.5 - COUT D'UNE ETUDE COMPLETE

Cette étude morphométrique par voie informatique présente l'avantage de fournir différents paramètres qu'il n'est pas possible de calculer manuellement. Ces paramètres (tels que pente et azimut) ne sont pas essentiels puisque jusqu'à présent, les hydrologues ont pu s'en passer le plus souvent. Cependant, ces paramètres n'en sont pas moins utiles et le passage par voie informatique dépendra de son rapport "qualité-prix".

Afin de cerner l'ordre de grandeur du prix à payer pour obtenir par exemple la sortie du programme I.D.P., la carte topographique calculée (1 courbe tous les 50 mètres), le bloc-diagramme, et la corrélation entre pente calculée et pente mesurée, nous pouvons nous baser sur le coût de l'étude de la Meurthe à Fraize (66,8 km^2) :

- maillage du bassin, lecture des données et transcription sur bordereau de perforation . . . . . 4 h de technicien
- perforation et vérification des cartes de données :
  82 cartes à 0,50 F . . . . . 41 F

- calcul des pentes réelles et transcription sur bordereau de perforation . . . . . 2 h de technicien
- temps de calcul et sortie imprimante (2 passages afin de corriger les erreurs inévitables) :
  10 minutes . . . . . 250 F
- coût global du tracé de la carte et du bloc-diagramme . . . . . 24 F

L'ensemble de ces travaux est comptabilisé à la fois en heures de travail et en francs. Afin de rendre comparable ces modes d'estimation, nous pouvons tout ramener au prix de revient de la journée d'un technicien. Dans ce cas, l'étude peut présenter le coût de deux journées de technicien.

On peut admettre que le tracé à la main de la courbe hypsométrique et le calcul des différents indices, représentent le travail d'un technicien durant une journée.

A la suite de ce calcul approximatif, on peut se rendre compte que l'étude par voie informatique n'est pas d'un prix prohibitif, compte tenu des résultats obtenus, nettement supérieurs.

CHAPITRE IV

APPLICATION A UNE REGION TYPE : LE VERSANT LORRAIN DES VOSGES

Pages

IV.1 - Description du milieu hydrologique 57

IV.1.1 - Choix et liste des stations étudiées 57

IV.1.2 - Cadre géologique 60

a - Coupe lithostratigraphique 60

b - Classification adoptée 63

IV.1.3 - Supports cartographiques utilisés 64

a - Cartes topographiques 64

b - Cartes géologiques 66

IV.2 - Présentation et critique des résultats 67

IV.2.1 - Surface des bassins versants 67

IV.2.2 - Forme des bassins versants 68

IV.2.3 - Répartition des altitudes 70

a - Répartition des altitudes à l'échelle du bassin 70

b - Statistique sur les paramètres de dispersion 70

IV.2.4 - Caractéristiques géologiques 72

a - Paramètre de perméabilité 72

b - Paramètre de dureté 73

IV.2.5 - Le réseau hydrographique 74

a - Densité de drainage et fréquence des thalwegs d'ordre 1 74

b - Rapport de confluence et rapport des longueurs 75

IV.2.6 - Les indices de pentes 77

a - Répartition statistique des indices de pente 77

b - Relation entre indice de pente de Roche et indice de pente globale.. 78

c - Dénivelée spécifique 80

IV.2.7 - Les pentes des bassins versants 81

a - Statistique des pentes au niveau du bassin 82

b - Rapports entre paramètres de tendance centrale et paramètre de dispersion 82

c - Retour à la notion d'indice de pente 83

Pages

IV.3 - Essai de synthèse 85

IV.3.1 - Relation entre pente et surface 85

IV.3.2 - Relation entre pente et nature géologique 86

IV.3.3 - Relation entre pente et indices de pente 88

a - Normalisation des variables 88

b - Comparaison entre les différents indices de pente 90

c - Remarques sur la précision du calcul des pentes 92

d - Etude du cas particulier des confluences 94

CHAPITRE IV

APPLICATION A UNE REGION TYPE : LE VERSANT LORRAIN DES VOSGES

Afin de tester les méthodes de calcul automatique décrites aux chapitres précédents, et d'en comparer les résultats à ceux obtenus par les moyens classiques, nous avons effectué l'étude d'une trentaine de bassins du versant Lorrain des Vosges.

IV.1 - DESCRIPTION DU MILIEU HYDROLOGIQUE

La région étudiée constitue la limite Est du Bassin Parisien. Nous y rencontrons le contact entre les terrains sédimentaires du Bassin Parisien à l'Ouest, et les terrains cristallins et cristallophyliens du massif hercynien des Vosges à l'Est. Cette région, limitée par les longitudes et latitudes de Toul et Thann, est drainée essentiellement par le bassin de la Moselle, et pour une faible part, par le bassin du Rhin à l'Est, de la Saône au Sud, et de la Meuse à l'Ouest.

IV.1.1 - CHOIX ET LISTE DES STATIONS ETUDIEES

A l'intérieur de cette zone, nous avons sélectionné onze bassins versants équipés de stations de jaugeage, et drainés par la Meurthe et la Moselle. Le choix de ces stations a été effectué à partir de l'inventaire des stations existantes(*).

Nous nous sommes d'abord limités à des bassins dont la surface est inférieure à 200 km^2, et nous avons ensuite essayé de ne retenir que deux ou trois bassins pour un même type de terrain. Compte tenu de ces remarques, nous avons sélectionné les stations hydrométriques suivantes :

Nom de la station	Cours d'eau	Service gestionnaire
Zainviller	la Moselotte	2ème C.E.
Fraize	la Meurthe	2ème C.E.
Cleurie	la Cleurie	S.R.A.E.L.
Autrey	la Mortagne	S.R.A.E.L.

* Anonyme dans (29).

Moyenmoutier	le Rabodeau	S.R.A.E.L.
Frizon	l'Avière	S.R.A.E.L.
Vaxoncourt	le Durbion	S.R.A.E.L.
Barbas	le Vacon	A.F.B.R.M.
Froville	l'Euron	A.F.B.R.M.
Blemerey	le Ruisseau de Leintrey	A.F.B.R.M.
Autrey	le Brénon	S.R.A.E.L.

2ème C.E. : 2ème Circonscription Electrique
A.F.B.R.M. : Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse
S.R.A.E.L. : Service Régional de l'Aménagement des Eaux de Lorraine

Le travail de relevé des altitudes étant très fastidieux, nous avons décidé de recouper en différents bassins emboîtés, les bassins les plus étendus. Ceci permet, pour un même bassin, de mettre en évidence l'évolution des pentes en fonction de la surface. Néanmoins nous admettons que la taille de l'échantillon obtenu permet d'avoir des résultats significatifs. Cependant, les 29 valeurs obtenues pour chaque paramètres ne sont pas indépendantes. En effet, le paramètre que l'on mesure sur un grand bassin versant dépend de la valeur qu'il prend pour chaque sous-bassin.

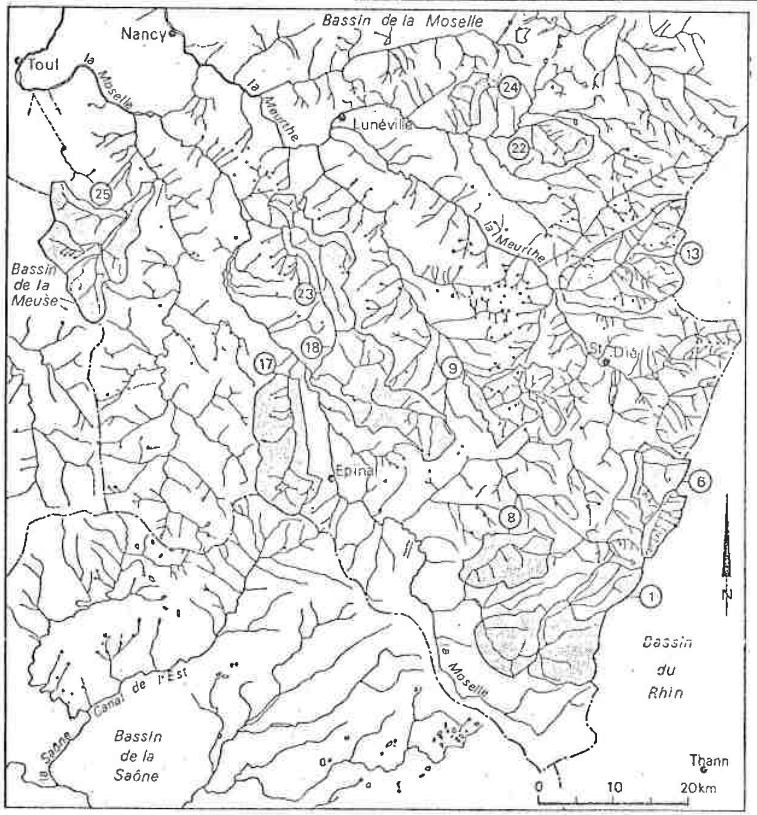
Sur la figure 26, on trouvera la position des bassins versants équipés. Les limites des sous-bassins sont portées sur les cartes en annexe.

La liste définitive des bassins versants étudiés et la numérotation adoptée, sont les suivantes :

1 - la Moselotte à Zainvillers
2 - la Moselotte au Daval
3 - la Moselotte à la Bresse (aval du confluent)
4 - la Moselotte à la Bresse (amont du confluent)
5 - le Ruisseau de Chajoux à la Bresse
6 - la Meurthe à Fraize
7 - la Meurthe au Rudlin
8 - le Rupt de Cleurie à Cleurie
9 - La Mortagne à Autrey
10 - la Mortagne en aval du confluent avec le Ruisseau de Blanche Fontaine
11 - la Mortagne en amont de Blanche Fontaine
12 - le Ruisseau de Blanche Fontaine
13 - le Rabodeau à Moyenmoutier
14 - le Rabodeau à la Petite-Raon (aval du confluent)
15 - le Rabodeau à la Petite-Raon (amont du confluent)
16 - le Rupt à la Petite-Raon
17 - l'Avière à Frizon
18 - le Durbion à Vaxoncourt
19 - le Durbion à Domèvre (aval du confluent)
20 - le Durbion à Domèvre (amont du confluent)
21 - le Ruisseau d'Onzaine à Domèvre
22 - le Vacon à Barbas

Fig. 25 - Localisation générale de la zone étudiée

Fig. 26 - Positions des bassins versants équipés



23 - l'Euron à Froville

24 - le Ruisseau de Leintrey à Blemerey

25 - le Brénon à Autrey

26 - l'Uvry à Vézelise

27 - le Brénon à l'Etanche (aval du confluent)

28 - le Brénon à l'Etanche (amont du confluent)

29 - le Ruisseau de Velle à l'Etanche

On a choisi ces divisions de façon à obtenir un bon échantillonnage des surfaces. La plupart des paramètres hydrologiques varie avec le logarithme de la surface du bassin. Aussi, comme le montre la figure 27, nous avons une distribution sensiblement uniforme du nombre de bassin en fonction du logarithme des surfaces.

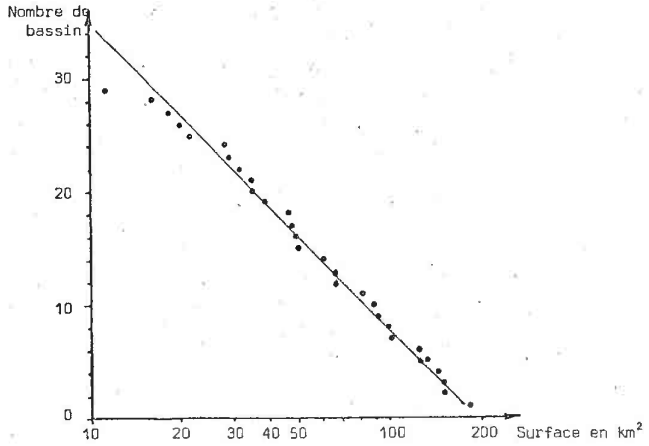


Fig. 27 - Distribution du nombre de bassins en fonction de leurs surfaces

IV.1.2 - CADRE GEOLOGIQUE

a - COUPE LITHOSTRATIGRAPHIQUE

Il est difficile de donner une coupe lithostratigraphique type valable pour un domaine aussi étendu. En effet, les faciès aussi bien que les puissances, sont variables dans l'espace. Nous nous contenterons donc de citer les caractères lithostratiques dominants. La série se présente ainsi, des terrains les plus récents aux plus anciens :

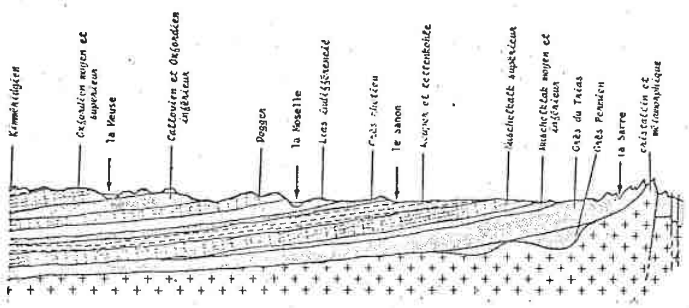


Fig. 28 - Coupe géologique schématique Est-Ouest

α - formations superficielles quaternaires

- les éboulis de pente :

Rarement cartographiés, ces éboulis se développent aux pieds des différentes côtes (Bajocien, Rhétien inférieur, Buntsandstein, granit). Leur importance est surtout hydrogéologique car ils peuvent d'une part, masquer et abaisser les exutoires des nappes qu'ils recouvrent, et d'autre part, constituer eux-mêmes des réservoirs temporaires.

- les alluvions anciennes :

Réparties essentiellement entre la Meurthe et la Vezouze, elles sont constituées de sables et graviers, mais bien souvent recouvertes de limons fins très peu perméables.

- les alluvions récentes :

Les alluvions modernes ont comblé plus ou moins largement tous les thalwegs. La nature des matériaux est très variable dansle détail. Cependant, l'ensemble est constitué de sables et graviers perméables et poreux d'une épaisseur pouvant dépasser 10 mètres.

β - le Jurassique moyen

L'essentiel des terrains du Jurassique moyen rencontré dans la région étudiée est constitué par des calcaires oolithiques bajociens qui forment le vaste plateau situé à l'Ouest de la Moselle et de la Meurthe, et dont la limite Est est marquée par les Côtes de Moselle. Cet ensemble, fissuré, est le siège d'une nappe aquifère importante. A sa base, on note la présence d'un niveau marneux dit "des marnes micacées", qui constitue le mur de la nappe du Bajocien.

γ - le Lias

Dè haut en bas, nous distinguerons :

- l'Aalénien :

Cette formation de calcaire oolithique ferrugineux, qui constitue le gisement du fer lorrain, peut se rattacher par ses qualités mécaniques et hydrodynamiques, aux formations du Bajocien. Ce niveau est généralement le siège d'un aquifère propre ou en relation avec la nappe du Bajocien, par suite de fractures à travers les marnes micacées, ou du fait même de leur absence.

- le Toarcien :

Cet étage est essentiellement constitué d'une série marneuse, puissante (50 à 100 m). On y recontre successivement : des niveaux de marnes argileuses micacées, localement gréseuses, qui constituent le faciès dit "des Grès supraliasiques", des marnes grises schisteuses et pyriteuses, contenant des nodules phosphatés et calcaire ; enfin, une séquence de schistes bitumineux pouvant atteindre 10 mètres de puissance, et connus sous le vocable de "schistes cartons". Le Toarcien est donc essentiellement imperméable et tendre.

- le Pliensbachien (ex. Charmouthien) :

De faciès très variable, on rencontre successivement : un niveau de calcaires gréseux "les Grès médioliasiques", susceptibles d'abriter un aquifère de faible importance. Ensuite, un puissant horizon de marnes pyriteuses. Enfin à la base, et épisodiquement, un horizon calcaire peu épais.

- le Sinémurien-Hettangien :

Le Sinémurien supérieur débute par un mince banc de calcaire dit "calcaire ocreux". Ensuite, nous rencontrons à la partie inférieure, des marnes dites "marnes à hyppopodium", qui constituent le toit du Lias inférieur. Le Sinémurien inférieur et l'Hettangien se confondent en un même faciès constitué d'une alternance de marnes et de calcaires (dit "calcaires à gryphées"). Ce niveau renferme une nappe aquifère pouvant atteindre 20 à 25 m de puissance.

δ - le Trias

- le Rhétien :

Il débute par un horizon repère marneux appelé "Argiles de Levallois". Cette formation, peu épaisse (6 à 8 mètres), constitue le toit des grès infraliasiques du Rhétien inférieur. Ceux-ci sont constitués de bancs massifs de grès quartzeux. Ce niveau est le siège d'une nappe localement importante.

- le Keuper :

Le Keuper supérieur est constitué par une trentaine de mètres de marnes versicolores dites "marnes irisées supérieures". Le Keuper moyen débute par une dizaine de mètres de dolomies calcaires appelées "dolomies-moëllons". Puis on rencontre sur quelques mètres, des marnes bariolées en alternance avec des grès à roseaux plus ou moins marneux. Le Keuper inférieur est constitué d'une masse imperméable marneuse contenant des niveaux de gypse, d'anhydrite et de sel. La puissance de ce niveau varie de 80 à 150 m.

- la Lettenkohle :

Elle constitue un terme de passage entre le Muschelkalk et le Keuper. Sur 10 à 20 mètres, on

rencontre une séquence marneuse prise entre deux niveaux dolomitiques.

- le Muschelkalk :

Le Muschelkalk supérieur est constitué d'un ensemble d'environ 60 mètres, présentant en alternance, des calcaires plus ou moins marneux, et à la base, des calcaires à entroques. Le sommet du Muschelkalk moyen, constitué par les couches blanches d'une dolomie, est à rapprocher du Muschelkalk supérieur calcaire. Le Muschelkalk moyen se poursuit par environ 70 mètres de marnes argileuses grises (couches grises). Enfin, la base du niveau est constituée par des marnes bariolées d'environ 20 mètres de puissance. Le Muschelkalk inférieur comprend, sur une quarantaine de mètres, un niveau dolomitique, puis un niveau marneux, et enfin, un horizon gréseux plus ou moins argileux.

- le Buntsandstein :

Le sommet de l'étage présente du haut en bas et sur 50 à 70 mètres, un horizon de grès micacés à ciment argileux (le "Grès à Voltzia"), une assise de grès rouges lie-de-vin, et enfin, des grès de plus en plus chargés en galets de quartz présentant des passages argileux. Le sommet du Buntsandstein constitue les "Grès bigarrés". Le grès vosgien, qui constitue la base du Buntsandstein, est séparé des Grès bigarrés par le Conglomérat principal, formé de gros galets de quartz, de quartzites, et cimentés par des sables siliceux fins. Ce niveau, très résistant, marque profondément la topographie. Sous cette formation, on rencontre une très importante assise de grès dont la puissance oscille autour de 400 à 500 mètres. La base de cette assise est marquée par le conglomérat de base, de 6 à 10 mètres de puissance. Le Buntsandstein peut donc se caractériser comme un ensemble de formations puissantes, perméables et résistantes. Elles sont le siège de nappes très importantes et plus ou moins bien individualisées.

ε - le Permien

Les sédiments du Permien reposent en discordance sur le socle hercynien. Ces dépôts détritiques datés du Permien supérieur, ne sont pas continus et ont une extension et une épaisseur très variables. La série est en général argilo-gréseuse, et de perméabilité très variable. Elle peut atteindre une puissance de plusieurs centaines de mètres.

ζ - le socle hercynien

Le socle est formé de roches cristallines et cristallophyliennes (granites, gneiss, micaschistes, schistes chloriteux, etc...). L'ensemble est imperméable et très résistant. Cependant, localement, et soit au niveau des fractures, soit au niveau des éboulis ou des placages glaciaires, ils se développent des nappes aux dimensions restreintes mais nombreuses.

b - CLASSIFICATION ADOPTEE

Afin de simplifier l'ensemble de ces observations, nous avons regroupé différentes formations séparées stratigraphiquement, mais présentant une certaine homogénéité dans les caractéristiques mécaniques et hydrogéologiques de leur faciès. En cela, nous avons suivi les travaux présentés dans (2).

Nous avons fait la distinction, comme nous l'avons dit plus haut, entre les caractéristiques hydrogéologiques et les caractéristiques mécaniques des terrains. Pour la perméabilité, nous avons affecté la valeur 0 aux terrains imperméables, la valeur 1/2 aux terrains de perméabilité moyenne ou faible, et la valeur 1 aux zones perméables. Nous n'avons pas envisagé le cas des zones karstiques, puisque celui-ci ne peut se présenter que pour le Muschelkalk supérieur et très localement.

En ce qui concerne les qualités mécaniques des terrains, nous avons affecté la valeur 1 aux terrains très résistants, la valeur 0,75 aux terrains résistants, la valeur 0,50 aux terrains semi-tendres, et la valeur 0 aux terrains tendres.

Nous trouverons dans le tableau ci-dessous, les valeurs adoptées pour chaque formation, et pour les paramètres de perméabilité et de dureté.

FORMATIONS	Paramètre de perméabilité	Paramètre de dureté
Alluvions récentes et terrasses anciennes	1	0
Bajocien et Aalénien	1	0,75
Toarcien	0	0
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	0,5	0,5
Rhétien inférieur	1	0,5
Keuper et Lettenkohle	0	0
Muschelkalk supérieur	1	0,5
Muschelkalk moyen et inférieur	0	0
Buntsandstein et Permien	1	0,75
Socle cristallin et cristallophyllien	0	1

A partir de cette classification, nous avons établi un indice de perméabilité et un indice de dureté. Ceux-ci s'obtiennent en multipliant le paramètre de dureté ou de perméabilité par le pourcentage de la surface du bassin versant occupé par cette formation, et en faisant leur somme. On obtient des indices variant de 0 à 1, 0 pour les bassins imperméables et tendres, et 1 pour les bassins perméables et résistants.

Nous avons représenté sur la figure 29, la position des bassins versants étudiés par rapport aux différentes formations citées.

IV.1.3 - SUPPORT CARTOGRAPHIQUE UTILISE

Les éléments descriptifs de la topographie du réseau hydrographique et de la géologie des bassins étudiés ont été relevés sur différents supports cartographiques.

a - CARTES TOPOGRAPHIQUES

Compte tenu des surfaces des bassins versants étudiés, il nous a semblé préférable de choisir l'échelle du 1/50 000ème. Nous avons pu disposer de l'ensemble des cartes topographiques I.G.N. couvrant la zone étudiée. Nous avons obtenu par ailleurs, quelques cartes oro-hydrographiques à

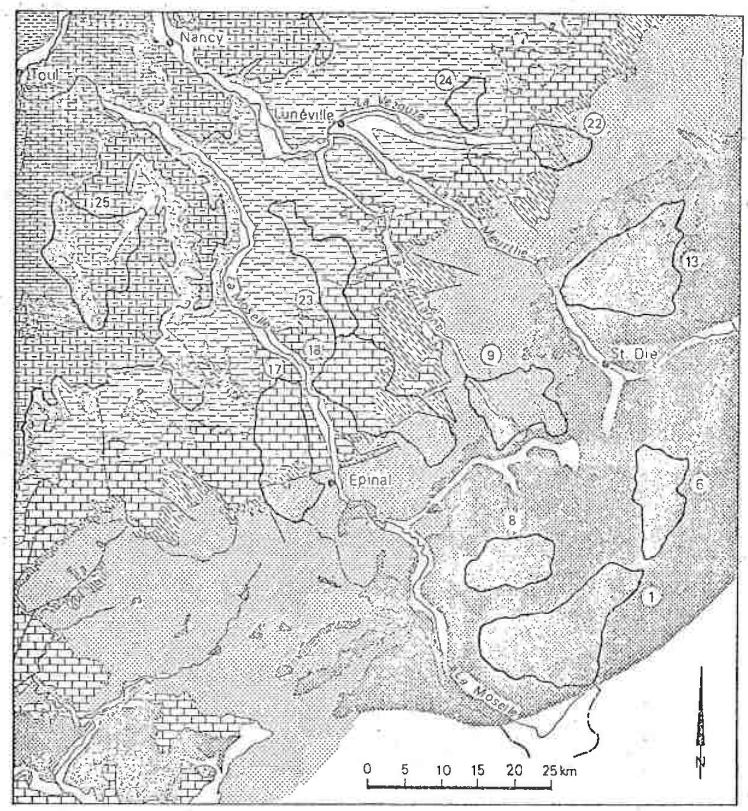


Fig. 29 - Cadre géologique

1 - Alluvions récentes
2 - Terrasses anciennes
3 - Marnes et argiles du Callovo-Oxfordien
4 - Calcaires du Bathonien, Bajocien, Aalénien
5 - Marnes et argiles du Toarcien
6 - Calcaires et marnes de l'Hettangien-Sinémurien - Charmouthien
7 - Argiles de Levallois et Rhétien supérieur
8 - Grès du Rhétien inférieur
9 - Marnes, grès et dolomie du Keuper et de la Lettenkohle
10 - Calcaires et dolomie du Muschelkalk supérieur
11 - Marnes et argiles du Muschelkalk moyen et inférieur
12 - Grès du Buntsandstein et du Permien
13 - Socle cristallin et cristallophyllien
14 - Limites des bassins versants étudiés

cette même échelle. Ces cartes présentent l'avantage de ne porter que les renseignements concernant l'hydrographie et la topographie. Elles sont donc plus lisibles pour notre usage. Malheureusement, elles sont d'une édition ancienne, dont plusieurs feuilles sont épuisées. Après avoir fait des comparaisons sur les résultats obtenus, pour un même bassin, à partir de la carte I.G.N. normale, et de la carte oro-hydrographique, nous avons constaté des différences très notables sur le réseau hydrogrpahique, et même sur les altitudes. Dans un souci d'homogénéité des données, nous avons donc décidé de nous référer uniquement à la carte I.G.N. normale au 1/ 50 000. Les coupures utilisées sont les suivantes :

Bayon	Gérardmer	Rambervillers
Bruyères	Lunéville	Remiremont
Châtenois	Mirecourt	Saint Dié
Cirey-sur-Vezouze	Munster	Sarrebourg
Epinal	Parroy	Vézelise

L'échelle du 1/50 000 choisie permet généralement d'évaluer la cote à ± 2,5 m, et par ailleurs, la densité de point que nous avons choisie (1 point pour 0,25 km^2) conduit à tracer sur la carte, un maillage centimétrique. Ce maillage peut être aisément tracé au demi-millimètre près, ce qui représente une erreur relative sur la position de 5 %, ce qui est parfaitement admissible compte tenu des précisions sur les autres paramètres.

b - CARTES GEOLOGIQUES

Il n'existe de couvertures cartographiques complètes de la France qu'aux échelles du 1/200 000 et du 1/80 000. Les relevés de ces cartes sont anciens et bien souvent peu précis. Nous disposons également de quelques feuilles au 1/50 000, d'une édition plus récente. Selon les supports cartographiques choisis, les coupures lithostratigraphiques sont différentes ainsi que les limites d'extension.

Contrairement à ce que nous avons fait pour la topographie, nous avons utilisé ici, les trois échelles citées. En effet, il aurait vraiment été trop dommageable d'utiliser des données "périmées", alors que l'on dispose, localement, de données plus fiables. Nous avons donc caractérisé la géologie de chaque bassin en réalisant une synthèse entre les trois possibilités, et en nous inspirant parfois même, de cartes hydrogéologiques au 1/500 000.

La liste des documents utilisés est donc la suivante :

Echelle 1/500 000 : Carte hydrogéologique du Bassin Parisien (B.R.G.M. - 1961)
Carte hydrogéologique du Bassin Rhin-Meuse (Mission Déléguée de Bassin - 1975)

Echelle 1/80 000 : Cartes géologiques, feuilles de : Epinal, Lunéville, Strasbourg, Lure, Mirecourt

Echelle 1/50 000 : Cartes géologiques, feuilles de : Lunéville, Rambervillers, Vézelise, Châtenois

IV.2 - PRESENTATION ET CRITIQUE DES RESULTATS

Dans ce paragraphe, nous donnerons les résultats obtenus pour les estimations de chaque paramètre d'une même famille. Nous n'essayerons pas de relier les paramètres d'une famille à l'autre, laissant cela pour plus loin. Les résultats, bassin par bassin, sont donnés en annexe.

IV.2.1 - SURFACES DES BASSINS VERSANTS

La surface de chaque bassin versant peut être obtenue de trois manières différentes : la première consiste à planimétrer sur la carte, le contour exact du bassin versant ; la seconde utilise le calcul automatique en intégrant les surfaces intérieures à l'image du bassin versant schématisé par un polygone. La dernière méthode plus sommaire, consiste à évaluer la surface à partir du nombre de noeuds du maillage situés à l'intérieur du bassin schématisé.

Il est évident, a priori, que les résultats obtenus par ces trois méthodes seront assez voisins. Aussi, la distribution des surfaces des bassins versants, donnés à la figure 27, est certainement correcte : dans le cadre de notre étude, le logarithme des surfaces est distribué sensiblement uniformément entre 10 km^2 et 200 km^2.

Un sondage effectué sur les bassins équipés a permis de constater que les écarts sur les surfaces, entre le résultat du calcul automatique et les chiffres fournis par les services gestionnaires sont très faibles. En effet, l'erreur type en pourcentage est de 2,6 %, l'erreur systématique étant sensiblement nulle : + 0,2 %.

Il faut remarquer que cette variance est surtout provoquée par deux stations où l'erreur est supérieure à 4 %. Il est fort possible que dans ces deux cas, il y ait eu des erreurs sur le tracé des contours des bassins. Nous pouvons donc dire que l'estimation des surfaces à partir du schéma polygonal n'introduit qu'une erreur inférieure à 2,6 %. Cette précision est sensiblement la même que celle que l'on obtient par planimétrage direct, compte tenu de la précision des planimètres et de la précision du tracé des contours des bassins versants.

Nous avons également étudié la relation entre le nombre de points intérieurs au bassin versant et sa surface. Comme on pouvait s'y attendre, nous avons trouvé une très bonne corrélation :

$$\text{nombre de points intérieurs} = 4{,}004\ S - 0{,}299$$

avec $\rho = 0{,}9997$; $\sigma_{nb} = 199{,}2$; $\sigma_S = 49{,}73$.

Nous retrouvons donc sensiblement la formule théorique : Nb = 4 S, puisque nous avons pris uniformément un point tous les centimètres carrés sur la carte au 1/50 000 (soit 1 point pour 0,25 km^2).

L'erreur type commise sur l'estimation de S à partir du nombre de points intérieurs est de 1,22 km^2. Pour être sûr d'avoir moins de 5 % de chance de se tromper de plus de 2 % sur les surfaces, le bassin versant doit avoir une surface de 122 km^2. En admettant que ce résultat obtenu avec une densité de 4 points par kilomètre est valable pour d'autres densités, le planimétrage correct d'un bassin obtenu par décomptage des points intérieurs ne peut se faire que si le nombre

de points est supérieur à 500. Nous insistons sur ce point, car contrairement à ce que pourrait laisser penser le coefficient ρ =0,9997, cette méthode d'estimation n'est pas précise.

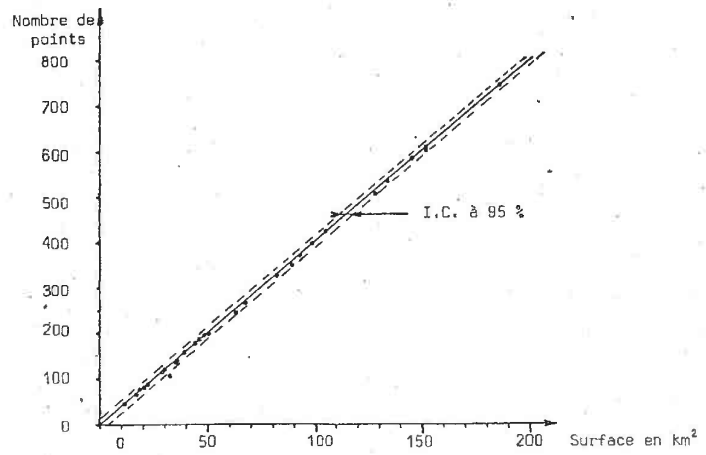


Fig. 30 - Corrélation entre nombre de point et surface du bassin versant

IV.2.2 - FORME DES BASSINS VERSANTS

Nous n'avons retenu comme paramètres de forme, que le coefficient de Gravelius. Ce coefficient, sans dimension, a été calculé à partir de la surface du bassin schématisé par un polygone, et du périmètre de ce polygone. Moyennant la connaissance de deux de ces paramètres, on peut en déduire la longueur du rectangle équivalent.

Il est difficile de comparer les résultats obtenus sur l'estimation du périmètre à la main ou à la machine, puisque dans les deux cas, il convient de schématiser le contour du bassin. Nous admettrons donc, a priori, que les valeurs du périmètre ne sont peut-être pas "exactes", mais qu'elles sont tout au moins homogènes.

La distribution des coefficients de compacité qui a été observé est la suivante :

n° du bassin	K_c	n° du bassin	K_c	n° du bassin	K_c
23	1,631	29	1,436	13	1,268
19	1,613	27	1,429	3	1,225
9	1,590	11	1,403	16	1,224
25	1,582	8	1,361	22	1,222
18	1,559	15	1,358	28	1,212
10	1,549	17	1,344	12	1,200
20	1,540	5	1,336	21	1,170
4	1,473	2	1,324	24	1,169
6	1,467	14	1,321	1	1,155
1	1,458	26	1,303		

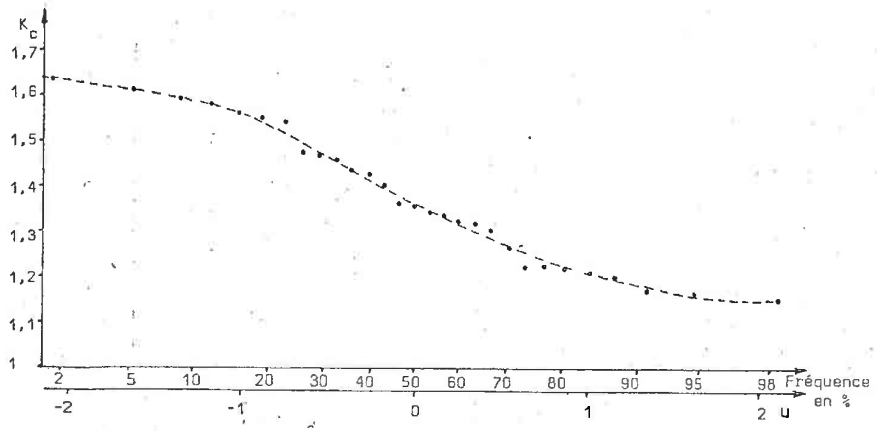


Fig. 31 - Statistique des coefficients de compacité

La schématisation que nous avons réalisée sur les différents bassins est une schématisation par ligne brisée. Ceci diffère de la méthode préconisée pour mesurer les périmètres, où l'on doit, au contraire, "arrondir" le tracé. De ce fait, les différences entre le périmètre vrai curvimètre sur la carte au 1/50 000, et le périmètre du bassin schématisé, sont peu différentes. On note même parfois une majoration du périmètre schématisé par rapport au périmètre réel, comme le montre la figure 32.

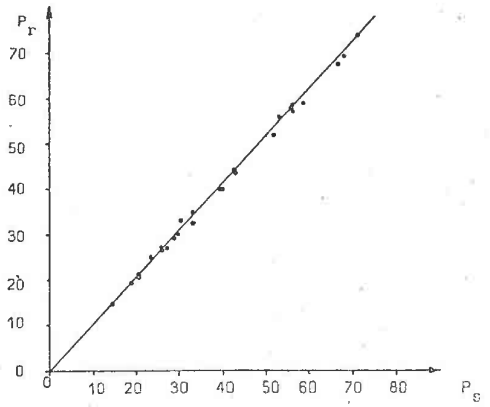


Fig. 32 - Corrélation entre périmètre réel (P_r) et schématisé (P_s)

Le coefficient de corrélation est très bon puisque l'on a : ρ = 0,998. La droite de régression a pour équation :

$$P_{réel} = 1,0275\ P_{schématisé} - 0,1233$$

ce qui, compte tenu de la précision des mesures, peut se ramener à :

$$P_{réel} = 1,03\ P_{schématisé}$$

IV.2.3 - REPARTITION DES ALTITUDES

a - REPARTITION DES ALTITUDES A L'ECHELLE DU BASSIN

Pour chaque bassin, nous avons essayé des ajustements statistiques sur les altitudes. Nous avions, a priori, réduit notre choix aux lois de Gauss et de Galton. Nous avons alors commis une erreur qui s'est avérée par la suite sans importance, et qui consistait à ajuster le logarithme des altitudes à une loi de Gauss. Or, l'intervalle de variation des altitudes est faible devant l'altitude moyenne. Dans ces conditions, la transformation de H en log H était presque linéaire, et en fait, nous avons sensiblement réalisé deux fois le même ajustement. Ceci n'est pas grave puisque nous avons pu constater que l'ajustement à une loi de Gauss était satisfaisant.

La loi de Gauss n'était pourtant pas adéquate pour rendre compte de la statistique des altitudes qui sont bornées en H max et H min. Nous avons néanmoins réalisé ces ajustements, mais nous avons déterminé graphiquement les paramètres de s lois de Gauss, en ne considérant que l'intervalle de populations compris entre les fréquences 0,067 et 0,933 ($-1,5 < u < +1,5$) soit sur les 87 % de la population.

Moyennant cette restriction, nous avons constaté que pour tous les bassins, les altitudes étaient distribuées selon une loi de Gauss, à l'exception du bassin du Durbion. Ce cas s'explique très facilement au vu de la carte topographique et de la carte géologique : la rivière s'écoule en grande partie dans les terrains relativement tendres du Muschelkalk moyen et inférieur, alors que son origine se trouve dans les grès vosgiens résistants. Ce bassin est donc très hétérogène du point de vue "dureté" des terrains, et la distribution des altitudes que nous obtenons provient certainement de la somme de deux populations normales, mais très différentes.

Notre conclusion est que l'on peut admettre que la répartition des altitudes peut être considérée comme normale pour 90 % des surfaces des bassins homogènes, du point de vue des duretés.

Cette remarque est probablement valable aussi pour les grands bassins puisqu'ils sont constitués d'un ensemble de petits bassins aux altitudes distribuées normalement.

b - STATISTIQUE SUR LES PARAMETRES DE DISPERSION

Nous ne nous sommes pas intéressés aux altitudes moyennes qui n'influent pas directement sur les pentes. Elles influent surtout sur la climatologie et donc indirectement sur le relief.

Par contre, nous avons retenu trois paramètres pour caractériser la dispersion des altitudes :

- l'intervalle de variation : IVH = H max - H min en m
- la dénivelée $D = H_{0,95} - H_{0,05}$ en m
- l'écart type des altitudes : σ_H en m

L'écart type $_H$ est obtenu par ajustement graphique des altitudes comprises entre les fréquences 0,067 et 0,933.

Ces trois paramètres sont très fortement liés entre eux, puisque le coefficient de corrélation entre l'intervalle de variation et l'écart type des altitudes est $\rho = 0,9465$ et ces deux paramètres sont liés par la relation :

$$\sigma_H = 0,2327\ IVH - 5,6274$$

ce qui donne sensiblement :

$$IVH \simeq 4,3\ \sigma_H$$

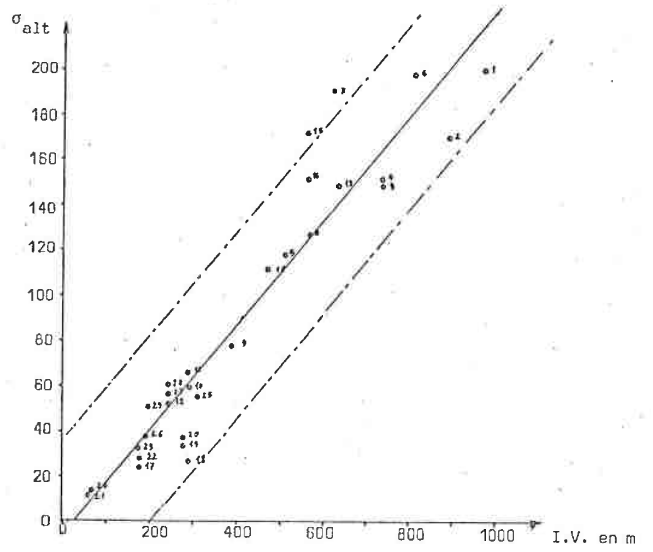


Fig. 33 - Corrélation entre l'intervalle de variation et l'écart type des altitudes

De la même façon, la relation entre la dénivelée D et l'écart type σ_H est très forte puisque l'on a avec $\rho = 0,933$:

$$\sigma_H = 0,32\ D - 1,07$$

soit sensiblement :

$$D = 3,125\ \sigma_H$$

Cette relation permet une vérification sur la normalité des altitudes. En effet, les tables de Gauss nous indiquent que 90 % de la population (entre 0,05 et 0,95) est situé entre la moyenne moins 1,64 fois l'écart type et la moyenne plus 1,64 fois l'écart type. Donc, si les distributions étaient normales, on aurait la relation :

$$D = 3,28\ \sigma_H$$

ce que nous vérifions sensiblement sur la figure 34.

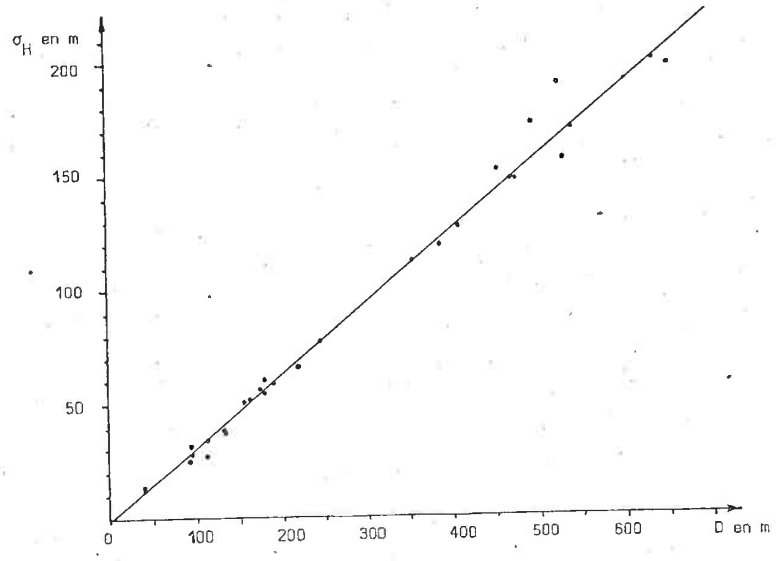


Fig. 34 - Corrélation entre dénivelée D et écart type des altitudes σ_H

Naturellement, la corrélation entre la dénivelée D et l'intervalle de variation donne avec un coefficient de corrélation $\rho = 0,99$:

$$D = 0,735\ IVH - 17$$

soit sensiblement :

$$D = 0,735\ IVH \simeq \frac{0,2327}{0,3125} = 0,745$$

IV.2.4 - CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES

Nous avons décidé de caractériser la géologie d'un bassin par deux paramètres variant de 0 à 1, un paramètre de perméabilité (0 imperméable, 1 perméable) et un paramètre de dureté (0 tendre, 1 dur).

a - PARAMETRE DE PERMEABILITE

La distribution des indices de dureté est très éloignée de la loi normale et de la loi uniforme (fig. 35). On note, avec des fréquences non nulles : I perm. = 1 et I perm. = 0.

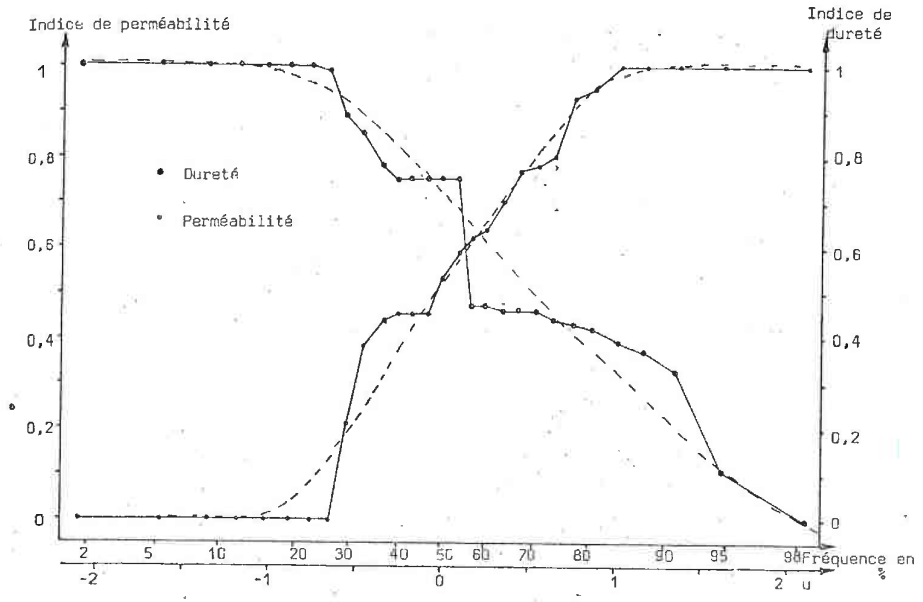


Fig. 35 - Statistique des indices géologiques

b - PARAMETRE DE DURETE

Comme pour les paramètres de perméabilité, on note avec une fréquence non nulle (fig. 35) : I dur = 1, puis d'autres plages avec I dur ≃ 0,75 et I dur ≃ 0,43.

Il n'est guère possible de calculer une régression linéaire entre ces deux paramètres car leur distribution est très éloignée de la normale. Cependant, sur la figure 36, on peut remarquer que si dans l'ensemble, perméabilité et dureté sont indépendantes pour les faibles duretés, les terrains sont imperméables (la réciproque n'étant pas vraie). Ceci est dû au fait que les terrains tendres et perméables (alluvions) recouvrent un très faible pourcentage des surfaces, et n'ont guère d'influence sur les indices.

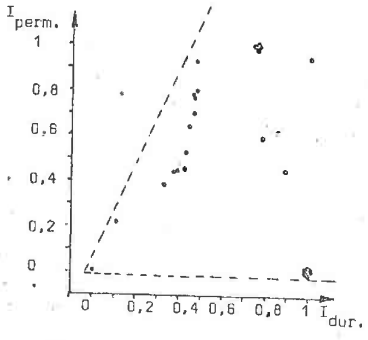


Fig. 36 - Rapport entre perméabilité et dureté

IV.2.5 - LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Nous avons retenu quatre paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. Ce sont dans l'ordre :

- la fréquence des thalwegs d'ordre 1
- la densité de drainage
- le rapport de confluence
- le rapport des longueurs

Les deux premiers paramètres sont des paramètres quantitatifs (nombre et longueur des cours d'eau). Les derniers sont qualitatifs (forme du réseau). Afin de déterminer ces paramètres, nous avons retenu sur la carte au 1/50 000, tous les cours d'eau permanents ou non. Dans le cas où un ruisseau se perd temporairement, nous l'avons prolongé suivant la topographie. Enfin, pour mesurer la longueur des cours d'eau, nous n'avons pas retenu les méandres mineurs, et nous avons curvimétré dans ce cas, un tracé schématisé.

a - DENSITE DE DRAINAGE ET FREQUENCE DES THALWEGS D'ORDRE 1

Comme le montre la figure 37, ces deux paramètres semblent être distribués non selon une loi de Gauss, mais plutôt selon une loi de Galton.

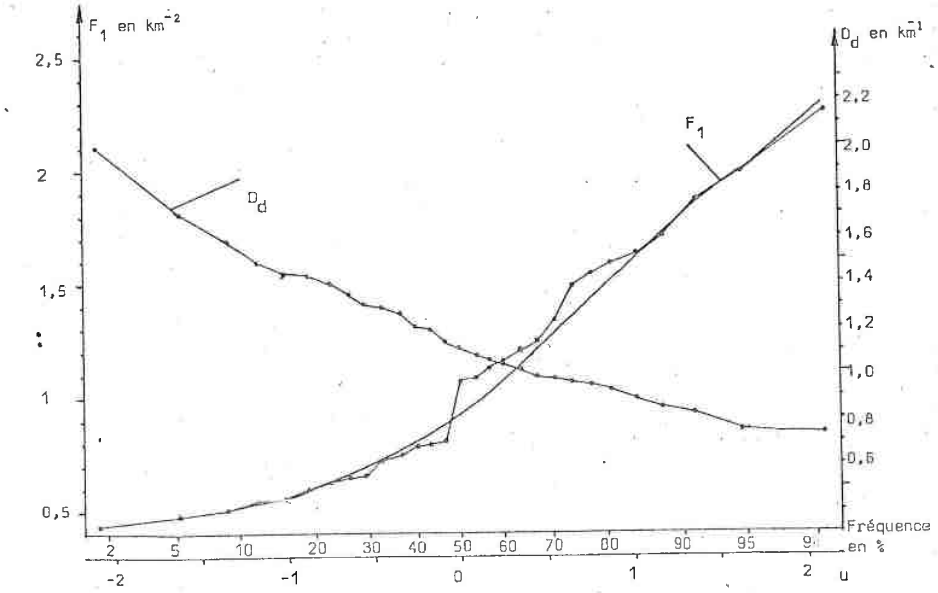


Fig. 37 - Statistique de D_d et F_1

Comme le montre la figure 38, il existe une corrélation assez forte entre D_d et F_1 : le coefficient de corrélation est : $\rho = 0,914$.

La relation entre F_1 et D_d est, selon cette régression (en log-log puisque les distributions sont plutôt log-normales) :

$$D_d = 1,156\ F^{0,47}$$

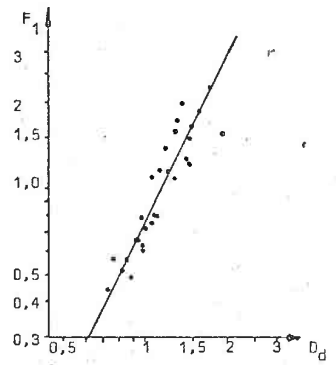


Fig. 38 - Corrélation entre F_1 et D_d

b - RAPPORT DE CONFLUENCE ET RAPPORT DES LONGUEURS

Ces deux paramètres semblent distribués normalement, comme le montre la figure 39.

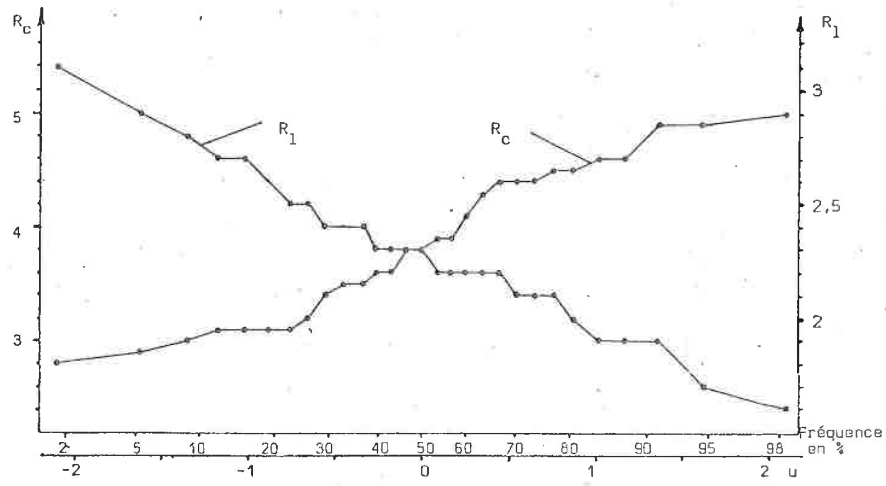


Fig. 39 - Statistique des R_c et R_ℓ

Nous avons tenté de relier les paramètres R_c et R_ℓ entre eux, puis avec F_1. Les résultats ont toujours été médiocres (fig. 40, 41, 42).

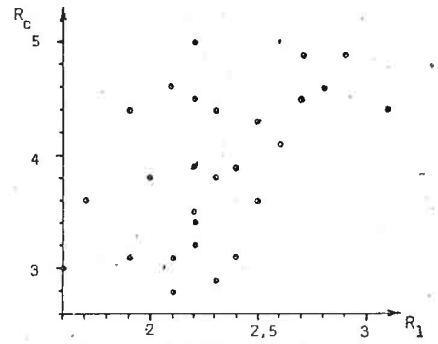


Fig. 40 - Relation entre R_c et R_ℓ

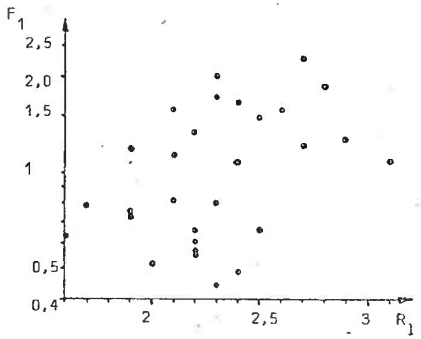


Fig. 41 - Relation entre F_1 et R_ℓ

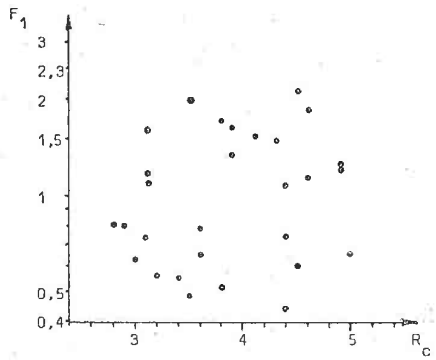


Fig. 42 - Relation entre F_1 et R_c

Notre conclusion est donc la suivante : le réseau hydrographique doit être caractérisé par au moins trois paramètres : le rapport des longueurs R_ℓ, le rapport de confluence R_c, et la densité de drainage D_d, ou la fréquence des thalwegs d'ordre 1, F_1.

IV.2.6 - LES INDICES DE PENTE

Nous ne retiendrons comme indices de pente, que ceux qui ne sont pas calculés à partir de pentes mesurées ou calculées, seul l'indice de pente de Roche I_p, l'indice de pente globale, et la dénivelée spécifique correspondant à cette définition. Ces trois indices ont été calculés à partir des caractéristiques de surface, d'altitude et de forme du bassin.

a - REPARTITION STATISTIQUE DES INDICES DE PENTE

Les trois indices cités ont une distribution qui semble se rapprocher de la distribution log-normale. Nous avons porté sur la figure 43, les valeurs arithmétiques de I_p, I_G et D_1 en fonction de leur fréquence expérimentale selon une graduation normale.

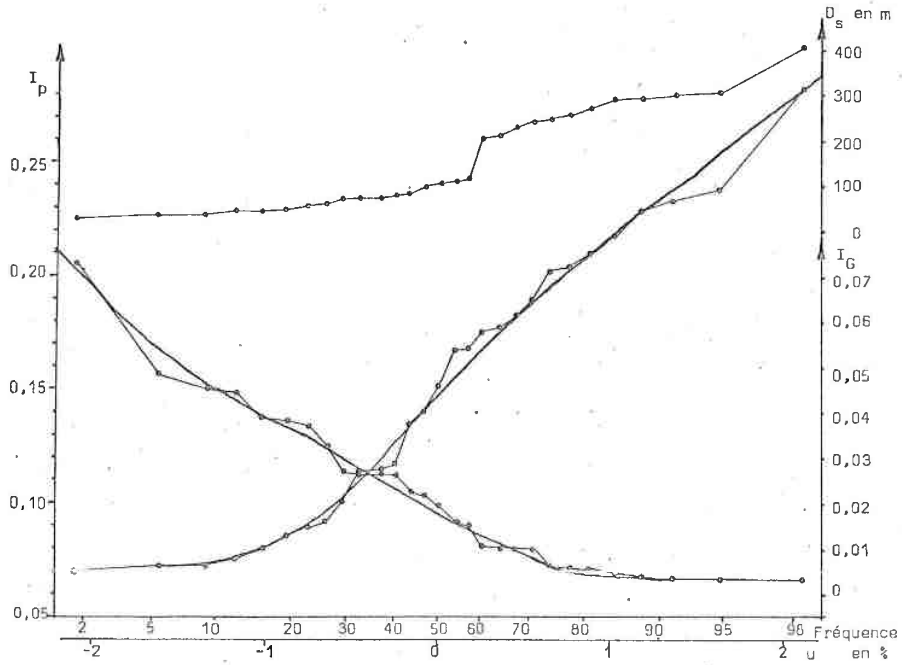


Fig. 43 - Statistiques des indices I_G, I_p et D_s

b - RELATION ENTRE INDICE DE PENTE DE ROCHE ET INDICE DE PENTE GLOBALE

Comme le suggère leur distribution, nous avons tenté une corrélation entre le log de I_p et le log de I_G. Les résultats obtenus sont excellents puisque nous avons obtenu les valeurs suivantes (fig. 44) :

$$\rho = 0,998 \quad ; \quad I_G = 0,9576\ I_p^{2,0859}$$

Ceci pouvait-il être prévisible ? certainement, au vu des conclusions du paragraphe IV.2.3. sur la dispersion des altitudes.

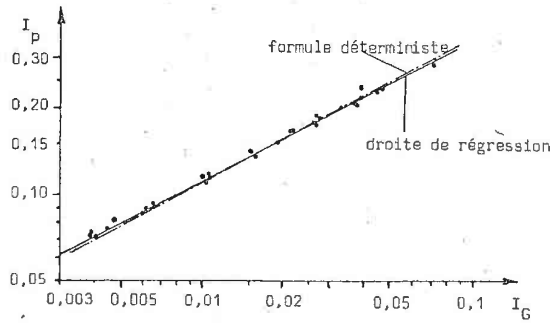


Fig. 44 - Relation entre I_p et I_G

En effet, nous avons observé, du point de vue qualitatif, que les altitudes étaient sensiblement distribuées selon une loi de Gauss ; d'autre part, nous avons mis en évidence une relation empirique entre les écarts types des altitudes σ_H et leurs intervalles de variation IVH :

$$IVH \simeq 4,3\ \sigma_H$$

L'indice de pente de Roche peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{\beta_i\ (a_i - a_{i-1})}$$

où L : longueur du rectangle équivalent

$a_i - a_{i-1}$: différence de cote entre les courbes de niveau a_i et a_{i-1}

β_i : pourcentage de la surface totale comprise entre les cotes a_i et a_{i-1}

Dans notre cas particulier où nous avons utilisé vingt tranches égales d'altitude pour calculer I_p, nous avons donc pris une valeur constante pour $a_i - a_{i-1}$:

$$a_i - a_{i-1} = \frac{H\ max - H\ min}{20} = \frac{IVH}{20} \simeq \frac{4,3\ \sigma_H}{20}$$

Le calcul de I_p se fait donc de la façon suivante :

$$I_p \simeq \frac{1}{L} \sqrt{\frac{4,3\ \sigma_H}{20}} \sum \sqrt{\beta_i}$$

β_i représente pour nous le pourcentage des surfaces compris entre :

$\overline{H} - 2,15\ \sigma_H$, $\overline{H} - 1,935\ \sigma_H$, $\overline{H} - 1,72\ \sigma_H$, $\overline{H} - 1,505\ \sigma_H$, ..., $\overline{H} + 1,935\ \sigma_H$, $\overline{H} + 2,15\ \sigma_H$

Ayant constaté que les altitudes étaient distribuées selon une loi normale, nous trouverons les valeurs de β_i dans une table de Gauss :

u	Prob (x < X)	β_i	u	Prob (x < X)	β_i
0,000	0,500	0,085	1,075	0,859	0,043
0,215	0,585	0,080	1,290	0,902	0,032
0,430	0,666	0,075	1,505	0,934	0,022
0,645	0,740	0,065	1,720	0,956	0,017
0,860	0,805	0,054	1,935	0,973	0,011
1,075	0,859		2,150	0,984	

Des résultats identiques auraient été trouvés pour les valeurs négatives de u. On obtient alors :

$$\sqrt{\frac{0,50}{0,484}} \sum \sqrt{\beta_i} = 4,27$$

d'où l'on tire :

$$I_p = \frac{4,27}{\sqrt{L}} \left(\frac{4,3\ \sigma_H}{20}\right)^{1/2} = 1,980 \left(\frac{\sigma_H}{L}\right)^{1/2}$$

L'indice de pente globale I_G a pour formulation :

$$I_G = \frac{H_{0,95} - H_{0,05}}{L} = \frac{D}{L}$$

Or, nous avons trouvé une relation empirique entre D et σ_H :

$$D = 3,125\ \sigma_H$$

$$I_G = \frac{3,125\ \sigma H}{L}$$

En rapprochant les deux nouvelles formules donnant I_G et I_p, on a :

$$I_G = \frac{3,125\ H}{L} \quad ; \quad I_p = 1,980 \left(\frac{\sigma H}{L}\right)^{1/2}$$

d'où l'on tire en éliminant σ_H :

$$I_G = \frac{3,125}{1980^2} I_p^{\ 2} \Longrightarrow I_G = 0,800\ I_p^{\ 2}$$

Cette formulation paraît différer sensiblement de la relation empirique établie au début du paragraphe :

$$I_G = 0{,}9576\ I_p^{2{,}086}$$

En fait, dans le domaine de variation des indices, ces deux formulations sont sensiblement identiques comme le montre la figure 44.

Ce résultat n'est pas bien nouveau puisque déjà en 1975 dans (6), P. DUBREUIL avait constaté la corrélation suivante : (ramenée à un système sans unité puisque l'auteur travaillait en m/km)

$$I_G = 0{,}8485\ I_p^{2{,}092}$$

qu'il proposait de ramener à la forme simplifiée :

$$I_G = 0{,}826\ I_p^2$$

(avec I_G et I_p en m/km : $I_p = 1{,}10 \sqrt{\frac{I_G}{1000}}$).

Cette relation permet d'estimer I_p d'après I_G avec un intervalle de confiance de 80 % compris entre 5 et 8 % de I_p.

Sans avoir découvert ce résultat, nous en avons donné une explication semi-déterministe. D'autre part, et a posteriori, les résultats de P. DUBREUIL obtenus sur 207 bassins versants représentatifs ou expérimentaux des climats équatoriaux, tropicaux et semi-arides, indiquent que l'uniformité de la distribution des altitudes n'est pas un phénomène propre à notre région (climat tempéré, $0{,}004 < I_G < 0{,}08$) mais bien plus général tant du point de vue du climat que du relief ($0{,}0018 < I_G < 0{,}19$).

c - DENIVELEE SPECIFIQUE

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, l'indice de pente de Roche et l'indice de pente globale dépendent uniquement de la dispersion des altitudes et de la longueur du rectangle équivalent. La dénivelée spécifique D_s, pour s'affranchir de l'influence de la surface, se calcule à partir de I_G par la relation :

$$D_s = I_G\ S^{1/2}$$

Cette dénivelée ne dépend théoriquement que de la dénivelée D et de la forme du bassin. Or, les coefficients de compacité varient relativement peu, et on peut s'attendre à voir D_s ne dépendre sensiblement que de D, et par conséquent de H. C'est ce que nous trouvons en faisant la régression entre σ_H et D (fig. 45) :

$$r = 0{,}968 \text{ et } D_s = 1{,}726\ \sigma_H - 0{,}74$$

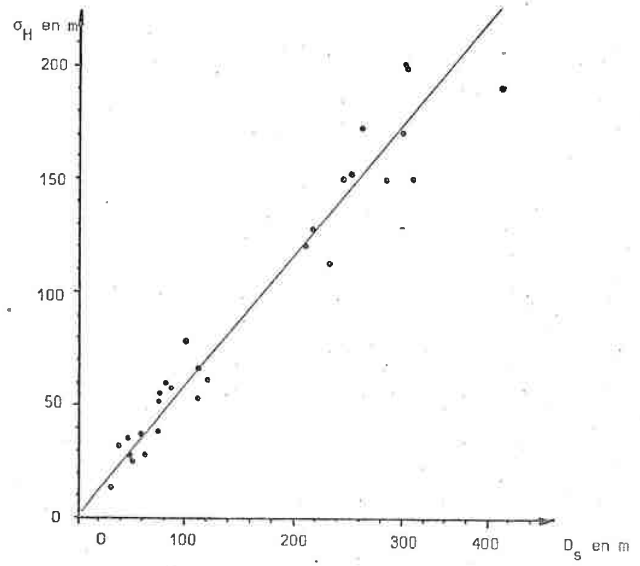


Fig. 45 - Relation entre D_s et σ_H

Ceci nous amène à faire dès à présent, la remarque suivante : puisque la forme du bassin a une faible influence sur les indices de pentes, on a les relations suivantes :

$$D_s \simeq 1{,}7\ \sigma_H \quad , \quad I_G = \frac{3{,}1\ \sigma_H}{L}$$

$$\text{or,} \qquad D_s = I_G\ S^{1/2}$$

et donc la relation

$$D_s = \frac{3{,}1\ \sigma_H}{L}\ S^{1/2} = 1{,}7\ \sigma_H \Longrightarrow S^{1/2} = \frac{1{,}7}{3{,}1}\ L$$

$$L = 1{,}8 \sqrt{S}$$

Ceci signifie que la longueur (et par analogie la largeur du rectangle équivalent) est à ranger dans les indices de surface plutôt que dans les indices de forme, l'influence de K_c sur L étant très faible.

IV.2.7 - LES PENTES DES BASSINS VERSANTS

Dans ce paragraphe, nous traiterons les résultats acquis par des mesures de pente sur la carte topographique et aussi des pentes calculées à l'ordinateur, qui ont servi à étendre les mesures.

a - STATISTIQUE DES PENTES AU NIVEAU DU BASSIN

La loi de distribution des pentes calculées a toujours été la même que celle des pentes mesurées. Seuls les paramètres de ces lois différaient.

Nous avons tenté pour chaque bassin, d'ajuster la distribution des pentes soit à une loi de Gauss, soit à une loi de Galton. Sauf pour trois bassins de petite taille, une au moins de ces deux lois était satisfaisante. Sur les 26 bassins, 11 s'ajustaient à une loi de Gauss, et 15 à une loi de Galton.

Nous avons essayé de trouver si le type de loi adéquate pouvait être prédéterminé. Pour cela, nous avons essayé de corréler la loi choisie aux pentes moyennes et à la géologie. Les résultats sont assez peu probants, car si pour les bassins de faibles pentes (pente moyenne calculée inférieure à 0,1), on trouve très nettement une prédominance des lois de Galton (10 fois sur 12), pour les bassins de forte pente, les lois de Gauss conviennent sensiblement aussi bien que les lois de Galton (Gauss 8 fois sur 17).

Les paramètres géologiques donnent sensiblement les mêmes résultats puisque pour les terrains tendres, nous avons de faibles pentes et une prédominance des lois de Galton.

Pour chaque bassin et quelque soit la loi choisie, nous avons déterminé graphiquement et en utilisant la portion de la population comprise entre les fréquences 0,067 et 0,933 ($-1,5 < u < +1,5$), les paramètres suivants :

- la moyenne du logarithme des pentes calculées
- l'écart type des pentes calculées
- l'écart type du logarithme des pentes calculées

Nous disposions par ailleurs, de la moyenne des pentes calculées. En utilisant les droites de régression obtenues en composant pente calculée et pente mesurée en un point sur quatre, nous avons pû restituer sur l'ensemble des points :

- la moyenne des pentes mesurées
- la moyenne des logarithmes des pentes mesurées

Pour les écarts types, nous avons conservé les valeurs calculées d'après un point sur quatre, puisque l'utilisation de la droite de régression aurait donné une sous-estimation systématique de la dispersion.

b - RAPPORTS ENTRE PARAMETRE DE TENDANCE CENTRALE ET PARAMETRE DE DISPERSION

Nous venons de constater que deux types de lois peuvent être utilisés selon les cas. Il n'est donc pas possible, apparemment, de caractériser la statistique des pentes par un seul paramètre puisqu'il faut, d'une part choisir la loi, et d'autre part fixer les deux paramètres à cette loi. Nous avons essayé de voir s'il y avait une relation entre les paramètres de dispersion et les paramètres de tendance centrale. Les résultats concernant la loi de Gauss sont illustrés par la figure 46. Nous trouvons un coefficient de corrélation $\sigma = 0,947$ et une droite de régression d'équation :

$$\overline{P_{réel}} = 0,52 \ \sigma_P + 0,02$$

Cette équation peut sensiblement se ramener à la forme plus simple :

$$P_{réel} = 0,6 \ \sigma_P$$

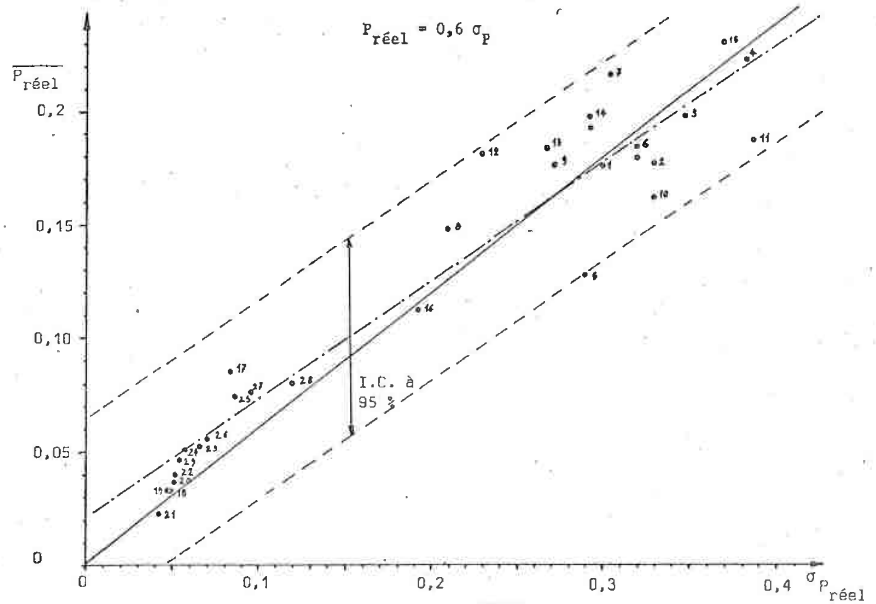


Fig. 46 - Corrélation entre $\overline{P_{réel}}$ et $\sigma_{P_{réel}}$

En première approximation, nous pouvons donc admettre que moyenne et écart type sont directement proportionnels et qu'ainsi, lorsque les pentes sont distribuées selon une loi de Gauss, la connaissance de la pente moyenne suffit à caractériser toute la statistique des pentes.

Dans le cas où les pentes s'ajustent à une loi de Galton, nous avons obtenu un résultat semblable. En effet, comme le montre la figure 47, moyenne et écart type du logarithme des pentes sont pratiquement non corrélés ($\rho = 0,0864$). L'écart type est alors sensiblement constant ($\sigma_{\log P_{réel}} \simeq 0,42$), ce à quoi on pourrait s'attendre puisque précédemment, l'écart type représentait un pourcentage constant de la moyenne.

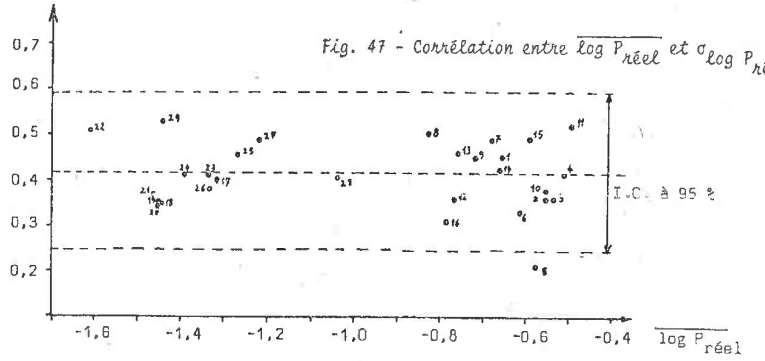


Fig. 47 - Corrélation entre $\overline{\log P_{réel}}$ et $\sigma_{\log P_{réel}}$

Au vu de ces résultats, nous pouvions nous demander s'il y avait aussi une aussi bonne relation entre la pente moyenne et la moyenne du logarithme des pentes. La figure 48 présente ces résultats.

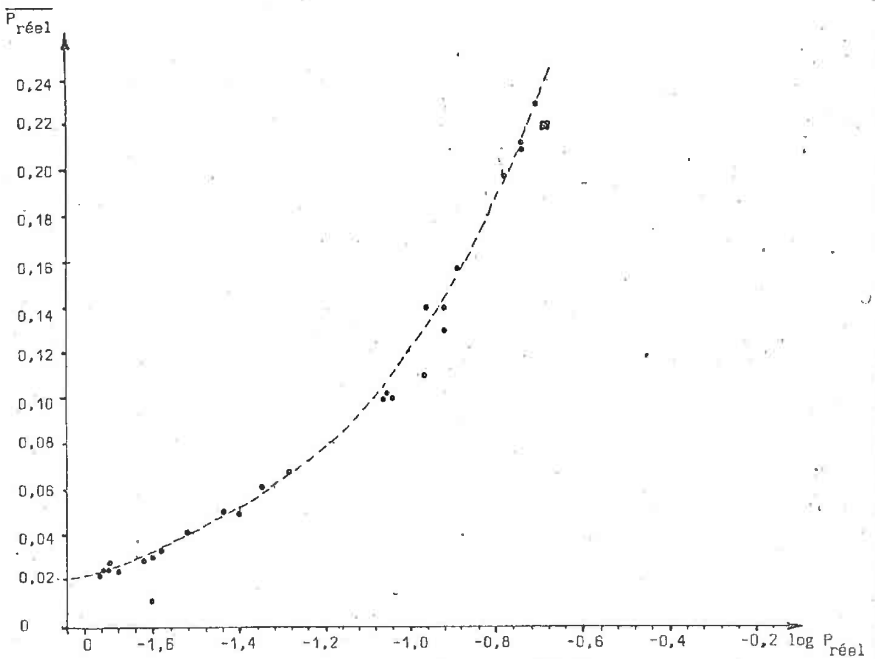


Fig. 48 - Corrélation entre $\overline{P_{réel}}$ et $\overline{log\ P_{réel}}$

La corrélation entre $\overline{\log P_{réel}}$ et $\overline{P_{réel}}$ donne un coefficient ρ de 0,998 ce qui correspond à une liaison quasi-fonctionnelle de la forme :

$$P_{réel} = e^{\frac{\log P_{réel} + 0,0267}{0,46}}$$

En posant G la moyenne géométrique des pentes réelles :

$$\log G = \overline{\log P_{réel}}$$

L'expression précédente se met sous la forme :

$$\overline{P_{réel}} = 1,06\ G^{0,945}$$

Donc, quelque soit la distribution des pentes, un seul paramètre permet de déterminer les trois autres.

c - RETOUR A LA NOTION D'INDICE DE PENTE

Au chapitre I, nous avions défini ce que devrait être un indice de pente idéal : il devrait permettre de retrouver entièrement la distribution statistique des pentes à partir d'une seule valeur chiffrée. Pour cela, il fallait que la loi de distribution soit unique, et qu'il n'y ait qu'un paramètre à déterminer. Les deux paragraphes précédents on montré que les pentes peuvent se distribuer suivant deux lois au moins. Les deux paramètres de chacune de ces lois sont très étroitement liés. Et de plus, nous venons de montrer que d'une loi à l'autre, les paramètres de tendance centrale le sont aussi. Ainsi, la statistique des pentes peut être constituée à partir du choix d'une loi, et de la détermination d'une moyenne. Enfin, dans la mesure où l'on ne s'intéresse qu'aux pentes dont les fréquences sont comprises entre 0,1 et 0,9, les écarts d'une loi à l'autre peuvent être négligés. Dans ces conditions, il n'est pas vain de chercher à déterminer un seul indice de pente, puisqu'il ne nous faudra plus, pour déterminer l'ensemble de la statistique, qu'une pente moyenne.

Nous admettrons comme élément de référence, la moyenne arithmétique des pentes réelles obtenues par mesure sur la carte topographique, avec une mesure par km^2, et étendues à une estimation par 0,25 km^2 à partir de la régression entre pente mesurée et pente calculée. Nous allons à présent rechercher quels paramètres sont les mieux liés à cette pente moyenne réelle.

IV.3 - ESSAI DE SYNTHESE

Après avoir étudié séparément les différents indices de même nature, nous allons essayer à présent, de mettre en évidence les rapports qui peuvent exister d'un groupe à l'autre, et plus particulièrement entre l'indice de pente défini ci-dessus et les paramètres de forme, de surface, etc.

IV.3.1 - RELATION ENTRE PENTE ET SURFACE

On admet généralement que la pente moyenne d'un bassin versant diminue lorsque la surface augmente. En effet, l'influence des basses vallées plus plates, va en augmentant au détriment des têtes de bassin. Ces remarques sont surtout valables pour de très forts contrastes de surface (1 à 100, 1 à 1000). Or, ceci n'est pas notre cas, puisque les surfaces varient de 1 à 20. Dans ces conditions, d'autres caractères masquent l'influence des surfaces, comme le montre la figure 49.

A notre échelle d'étude, on peut donc présumer qu'il n'y a pas de relation dominante entre surface et pente moyenne.

Cependant, comme le montrera le paragraphe suivant, on peut diviser la population en deux parties : la première aux pentes supérieures à 0,16 et correspondant aux terrains gréseux et cristallins, et la seconde aux pentes plus faibles et aux terrains plus tendres. Sur ces deux sous-populations, s'esquisse timidement une diminution des pentes lorsque la surface augmente.

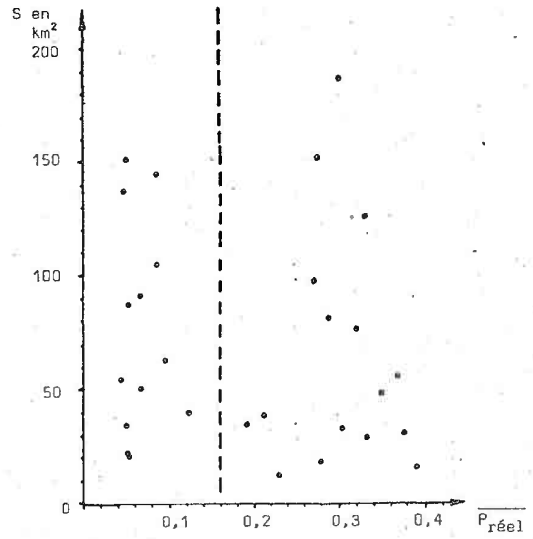


Fig. 49 - Relation entre surface et pente

IV.3.2 - RELATION ENTRE PENTE ET NATURE GEOLOGIQUE

Nous avons trouvé une relation très nette entre la pente moyenne et l'indice géologique de dureté défini au paragraphe IV.1.2.b. La population en effet, peut se diviser en deux : les bassins de dureté supérieure à 0,7, essentiellement constitués de grès vosgiens et de terrains cristallins, ont des pentes comprises entre 0,16 et 0,4. Cependant, à l'intérieur de cette sous-population, il n'existe pas de relation entre indice de dureté et pente moyenne. Il est vraisemblable que l'indice de dureté défini n'est plus assez précis. Pour les terrains plus tendres (indice de dureté inférieur à 0,5), les pentes sont toujours inférieures à 0,12. Là aussi, l'influence de la géologie sur les pentes est donc nette, mais elle joue d'une façon globale, sans qu'il soit possible, à l'heure actuelle, de mettre en évidence un rapport plus étroit. Ceci est dû soit à la mauvaise qualité de l'indice géologique utilisé, soit à une grande variété dans l'évolution du modelé des terrains d'un même niveau.

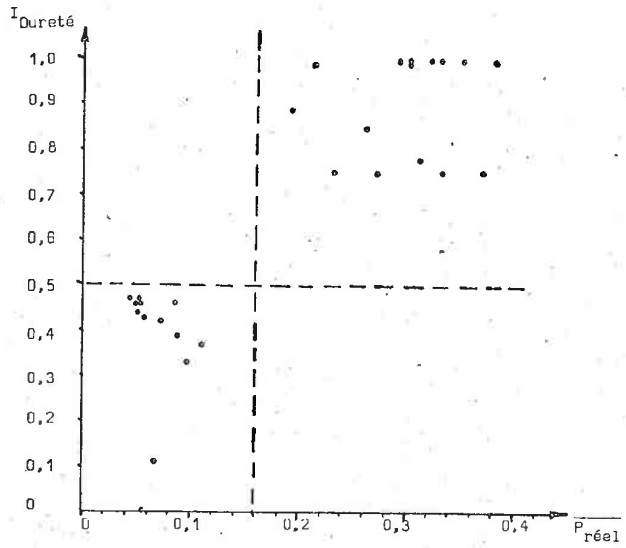


Fig. 50 - Relation entre pente et indice géologique de dureté

Par ailleurs, nous avons constaté au paragraphe IV.2.6.a, une séparation très nette dans la population des dénivelées spécifiques, puisqu'il existe un "trou" entre 120 et 200 m. Cette séparation pouvait paraître liée au contraste de dureté entre grès vosgiens et terrains cristallins d'une part, et les terrains sus-jacents d'autre part. Pour mettre cela en évidence, nous avons, sur la figure 51, porté airthmétiquement la dénivelée spécifique en fonction de l'indice géologique de dureté et, contrairement à notre attente, la cassure entre les deux sous-populations ne correspond pas exactement à la nature géologique des terrains.

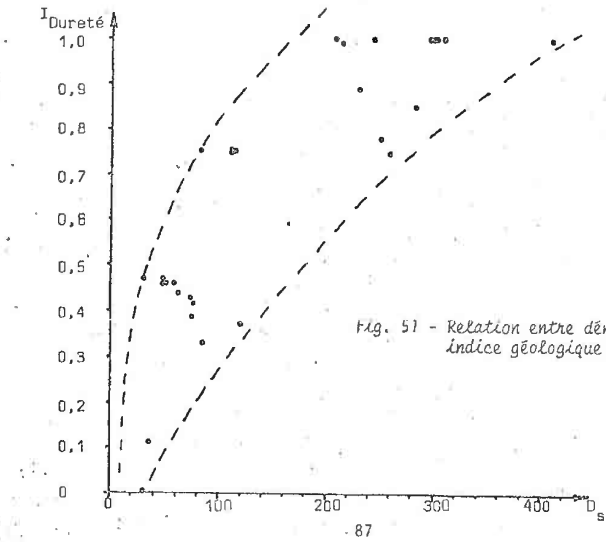


Fig. 51 - Relation entre dénivelée spécifique et indice géologique de dureté

IV.3.3 - RELATION ENTRE PENTE ET INDICES DE PENTE

Nous avons pu mettre en évidence et calculer, un paramètre caractéristique de la distribution des pentes des bassins versants. Nous l'avons défini comme la pente moyenne déterminée à partir de mesures ponctuelles. Il paraissait absolument nécessaire de comparer ce paramètre aux indices de pente utilisés classiquement. Pour ce faire, nous aurions pu, comme nous l'avons fait jusqu'à présent, étudier graphiquement cette relation. Cependant, lorsque l'on veut déterminer d'une façon objective l'étroitesse de ces relations, il est nécessaire de recourir à une appréciation chiffrée.

La méthode la plus commode est de calculer un coefficient de corrélation. Mais celui-ci n'a de sens que si la régression est linéaire ; or, il n'est nullement certain que ce soit le cas. Afin de linéariser les régressions, nous avons décidé de normaliser les distributions. En effet, si un couple de variables suit une loi normale à deux dimensions, et si ces deux variables sont corrélées, la courbe de régression est une droite et la relation est d'autant plus étroite que ρ est voisin de 1 en valeur absolue. Par extension, nous admettrons ce résultat même si les deux variables ne sont que séparément distribuées selon une loi de Gauss.

a - NORMALISATION DES VARIABLES

Pour normaliser les variables, nous avons procédé de la façon suivante : nous avons dans un premier temps, porté les points expérimentaux dans un graphique gradué en fréquence selon une loi de Gauss. La loi de distribution de la variable étudiée a été estimée graphiquement par une courbe moyenne passant dans le nuage de points. Pour passer de cette loi de distribution à une loi normale, il suffit d'associer à chaque valeur expérimentale sa fréquence théorique, puis de passer à la valeur de la variable réduite de Gauss, comme l'indique le schéma suivant :

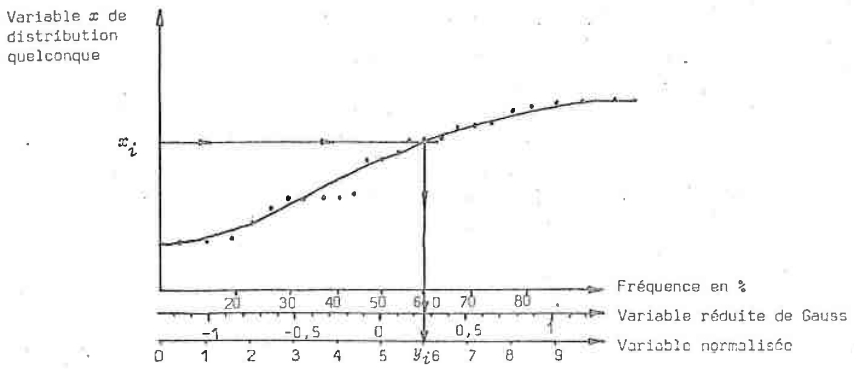


Fig. 52 - Normalisation des variables

Dans le cas illustré, on passes des distribués d'une façon quelconque à une variable normalement distribuée de moyenne 5 et d'écart type 4.

Les ajustements statistiques qui ont permis la normalisation correspondent aux figures 37, 43, et 53. Les résultats obtenus sont les suivants :

n° du bassin	VARIABLES NORMALISEES				
	Pente moyenne réelle	Pente moyenne calculée	Indice de pente de Roche	Indice de pente global	Fréquence des thalwegs d'ordre 1
1	10,8	12,0	9,2	9,1	11,7
2	11,9	13,5	10,5	9,9	12,6
3	12,9	13,0	13,8	13,3	13,9
4	15,0	13,2	13,1	13,4	16,5
5	10,3	13,3	13,5	14,0	10,4
6	11,5	12,4	11,9	11,9	13,0
7	11,0	13,2	16,8	18,0	14,9
8	8,6	9,9	9,8	9,9	5,7
9	9,7	8,9	6,9	6,7	9,9
10	8,9	9,2	7,9	7,8	9,5
11	17,0	9,6	9,6	10,0	7,3
12	8,9	8,7	11,3	11,2	12,3
13	9,7	9,8	9,2	9,3	9,7
14	10,4	10,2	10,0	10,2	10,9
15	14,2	11,5	11,4	12,2	12,1
16	8,4	8,7	12,4	12,3	9,5
17	6,8	5,1	4,3	4,1	5,4
18	3,1	5,5	3,0	1,9	3,0
19	2,8	3,5	0,0	3,0	4,3
20	3,9	4,5	4,9	5,2	0,0
21	0,0	0,0	3,7	3,8	7,4
22	4,1	5,6	7,0	6,7	4,9
23	5,9	5,0	3,0	0,0	6,8
24	5,2	7,0	5,6	5,4	10,2
25	6,9	7,0	5,3	5,2	4,4
26	6,1	6,4	6,6	6,8	1,9
27	7,2	7,5	6,8	6,8	6,6
28	7,6	7,8	8,3	8,6	7,4
29	4,8	6,9	7,7	8,0	5,8
moyenne	8,58	8,4	8,40	8,44	8,55
écart type	3,4	3,9	3,84	4,04	4,03

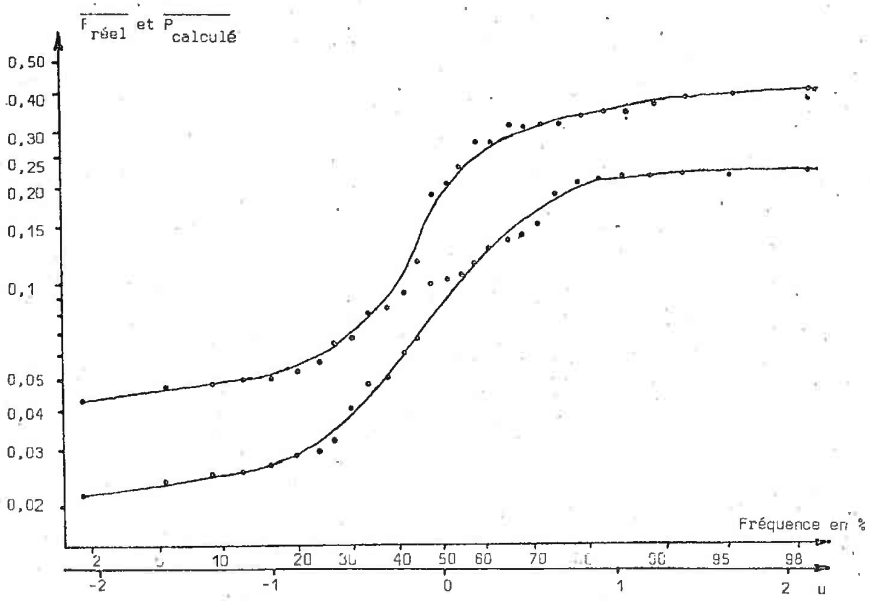


Fig. 53 - Statistique des pentes moyennes calculées et réelles

Nous n'avons pas jugé utile de comparer la dénivelée spécifique. En effet, cette variable est très difficile à normaliser et d'autre part, sa justification est basée sur une dépendance entre pentes et surfaces, ce que nous n'avons pas constaté.

b - COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS INDICES DE PENTE

Nous avons procédé au calcul de la régression linéaire entre la pente moyenne réelle d'une part, et d'autre part, l'indice de pente de Roche, l'indice de pente globale, et la pente moyenne calculée. Les résultats sont les suivants :

Variable expliquée	Variables explicatives		
Pente moyenne réelle normalisée	Indice de pente de Roche normalisé	Indice de pente globale normalisée	Pente moyenne calculée normalisée
Coefficient de corrélation	0,756	0,730	0,867
Droite de régression en variable normalisée	$\overline{P_{réel}} = 0,76\ I_P + 1,95$	$\overline{P_{réel}} = 0,75\ I_G + 2,44$	$\overline{P_{réel}} = 0,995\ P_{calculé} - 0,14$

Au vu de ces résultats, le paramètre qui est le mieux lié à la pente moyenne réelle est la pente moyenne calculée, puis, dans l'ordre, l'indice de pente de Roche et l'indice de pente globale. De la même façon, c'est avec la pente moyenne calculée que l'on s'approche le plus de la

droite théorique idéale, qui aurait pour équation $\overline{P_{réel}} = \overline{P_{calculé}}$ (fig. 54, 55 et 56).

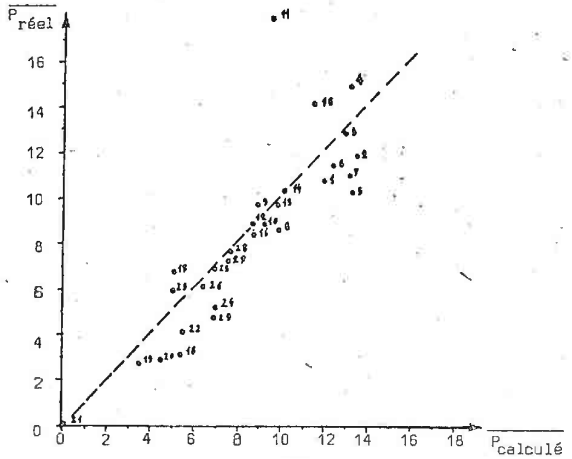


Fig. 54 - Relation entre $\overline{P_{réel}}$ et $\overline{P_{calculé}}$ normalisés

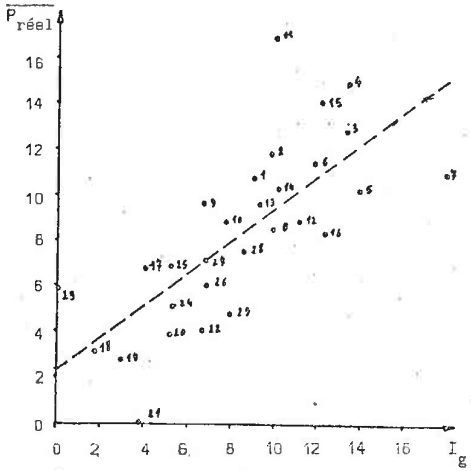


Fig. 55 - Relation entre $\overline{P_{réel}}$ et I_G normalisés

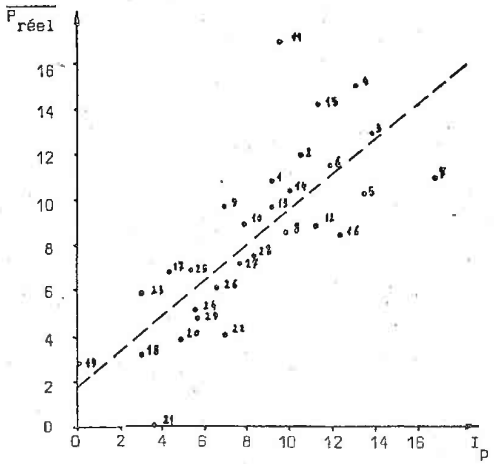


Fig. 56 - Relation entre $\overline{P_{réel}}$ et I_p normalisés

Sur les graphiques précédents, on remarque que quelques points sortent très nettement du nuage, en particulier le Ruisseau d'Onzaine à Domèvre (11). Nous n'avons trouvé aucune explication à ce phénomène. Cependant, même en éliminant les points les plus extrêmes qui peuvent être dus à des erreurs, il n'en demeure pas moins que la dispersion des points autour de la droite de régression pente réelle - pente calculée, est la plus faible. On pourrait objecter que ceci est un artefact, puisque nous nous sommes servis des pentes mesurées pour évaluer les pentes réelles. Ce n'est pas le cas, car la différence entre la pente moyenne mesurée réellement sur un point tous les km^2, et celle obtenue après extension des données, est très faible. Il en résulte que l'utilisation de la pente moyenne calculée n'affecte que très peu la pente moyenne réelle.

c - REMARQUES SUR LA PRECISION DU CALCUL DES PENTES

Pour calculer les pentes, nous avons utilisé un maillage uniforme, correspondant à quatre points par km^2. Or, la précision de l'approximation polynomiale dépend du nombre de point par bassin versant élémentaire. Il est en effet bien compréhensible que l'on ne puisse rendre compte des pentes d'une vallée si l'on ne dispose que d'un point tous les x vallées. Afin d'obtenir des résultats homogènes et voisins de la réalité, il aurait convenu d'adapter le maillage aux surfaces des bassins versants élémentaires dans chaque particulier. Nous avons choisi une autre voie qui consistait à ne pas modifier le maillage, mais à chercher à corriger le calcul des pentes par un facteur correctif dépendant des caractéristiques du bassin. Nous n'avons pas calculé directement la surface moyenne des bassins versants d'ordre 1, mais nous disposions de leur fréquence F1, qui leur est certainement très fortement corrélée, ce qui suffit, puisqu'il ne s'agit que d'évaluer un facteur correctif.

Nous avons donc essayé d'expliquer les écarts entre la pente moyenne mesurée et la pente moyenne calculée par la fréquence des thalwegs d'ordre 1. Par conséquent, si nos remarques étaient exactes, nous devrions trouver une sous-estimation de la pente d'autant plus forte que la fréquence des thalwegs d'ordre 1 est grande. Sur la figure 57, nous avons porté la différence entre $\overline{P_{réel}}$ - $\overline{P_{calculé}}$ en fonction de F_1. Contrairement à notre attente, il n'apparait aucune relation.

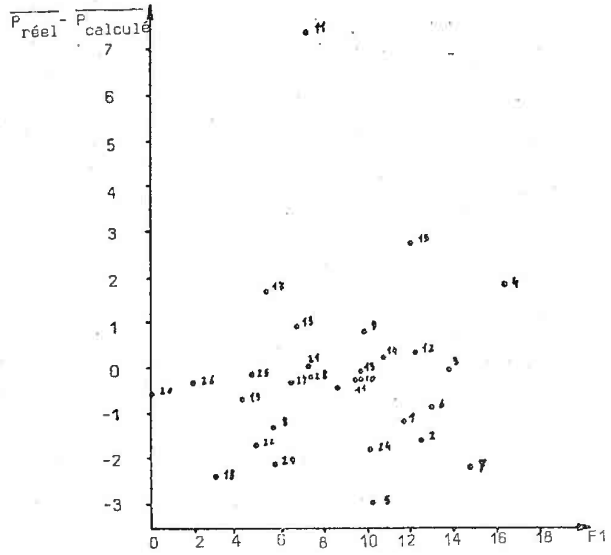


Fig. 57 - Relation entre $\overline{P_{réel}} - \overline{P_{calculé}}$ et F_1 normalisés

Cette constatation peut s'expliquer de plusieurs façons :

- la mesure des pentes réelles, comme nous l'avons indiqué au paragraphe II.3.3., est très imprécise. Il est donc possible que la moyenne des pentes réelles soit entachée d'une erreur d'estimation qui suffirait à masquer l'erreur sur les pentes calculées en fonction de la taille des bassins versants d'ordre 1.

- une autre explication, plus justifiée, consiste à remarquer que la fréquence des thalwegs d'ordre 1 oscille entre 0,8 et 2,1 km^2. L'inverse de F_1 n'est pas la surface moyenne du bassin d'ordre 1, mais c'est un nombre qui lui est légèrement inférieur. Les surfaces correspondant à $1/F_1$ sont comprises entre 1,250 et 0,480 km^2. Le maillage adopté avec quatre points par km^2 paraît donc largement suffisant pour mettre en évidence les thalwegs d'ordre 1 sur la carte au 1/50 000, et ce, même pour les bassins les mieux drainés. Dans ces conditions, il est normal de ne pas pouvoir expliquer les différences entre pentes mesurées et pentes calculées, à partir des valeurs de F_1.

Nous pouvons donc admettre que les pentes calculées par ordinateur et avec le maillage indiqué, représentent correctement une topographie qui schématise le bassin réel, tout en

conservant les bassins versants d'ordre 1. Les petits thalwegs secs sont dans leur majorité "gommés" et la différence entre pentes moyennes mesurée et calculée provient uniquement de l'oubli conscient de détails topographiques.

Ces remarques sont corroborées par des observations que l'on peut faire sur les cartes topographiques schématisées par l'ordinateur d'après le même maillage. En effet, les courbes de niveau obtenues mettent en évidence les thalwegs au moins d'ordre 1 (voir fig. 24).

d - ETUDE DU CAS PARTICULIER DES CONFLUENCES

L'indice de pente de Roche et l'indice de pente globale présentent une discontinuité très forte dans le cas d'une confluence. En effet, à la confluence de deux bassins, d'indice de pente différent, l'ensemble de ces deux bassins devrait avoir un indice de pente globale compris entre les deux élémentaires. Or, l'indice de pente de Roche et l'indice de pente globale donnent une influence très forte à la longueur du rectangle équivalent, donc au périmètre. Lorsque deux bassins confluent, la longueur du rectangle équivalent diminue notablement ce qui perturbe l'estimation de I_p ou I_G. Comme le montre la figure 58, la pente moyenne calculée ne présente pas cet inconvénient.

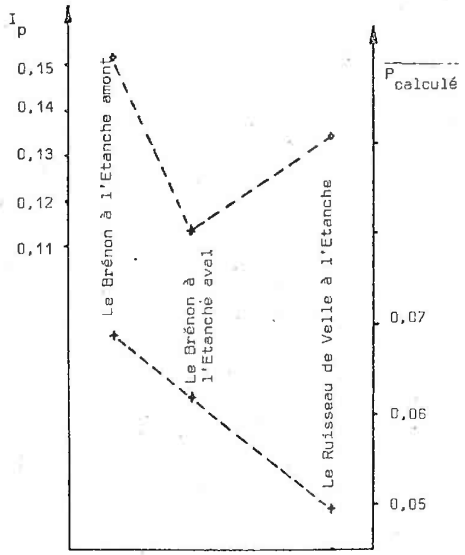


Fig. 58 - Variation des indices de pente à une confluence

Dans le cas du Brénon à l'Etanche, en aval du confluent, on trouve un indice de pente I_p inférieur à ceux du ruisseau de Velle et du Brénon à l'Etanche, en amont, qui pourtant sont les deux seuls à constituer ce bassin. La pente moyenne calculée par contre, constitue une moyenne pondérée par les surfaces des pentes moyennes sur chacun des bassins élémentaires.

Nous avons ici fait des corrélations entre différents paramètres pris deux à deux. Les corrélations entre paramètres de même nature étaient généralement bonnes : nous avons pu mettre en évidence des relations entre indices de pente, entre paramètres de dispersion des altitudes, entre paramètres caractéristiques du réseau, etc...

Par contre, d'un groupe à l'autre, les résultats sont moins nets. Les longueurs des rectangles équivalents sont surtout fonction de la surface ; la pente des bassins est liée à la nature des terrains, mais nous n'avons pas pu améliorer sensiblement un indice de pente par les caractéristiques du réseau hydrographique ou de la géologie. Il est très difficile d'en donner une raison. L'explication pourrait peut-être être obtenue en effectuant des régressions multiples, car ces différents facteurs risques d'avoir des influences comparables. Dans l'état actuel des choses, nous pensons appliquer, à l'avenir, des méthodes d'analyse factorielle à l'échantillon de données que nous avons constitué.

CHAPITRE V

C O N C L U S I O N S

Pages

V.1 - Réflexions sur les méthodes de calcul 99

V.2 - Réflexions sur la caractérisation des pentes 100

V.3 - Rapport entre les différents éléments caractéristiques du milieu hydrologique 101

V.4 - Intérêt général de l'étude 101

CHAPITRE V

CONCLUSIONS

Nous avons justifié la recherche de paramètres caractéristiques du milieu, tout en mettant en évidence leur caractère parfois arbitraire. Nous nous proposons d'étudier de façon critique, les paramètres classiques décrits au chapitre II et éventuellement, leurs rapports entre eux, dans un cadre régional. Pour atteindre ce but, nous avons été amenés à proposer un nouvel outil qu'est le calcul automatique. Il nous a fallu alors mettre au point des algorithmes et vérifier leur précision. Après cette phase, la méthode de calcul a été appliquée à différents bassins versants de Lorraine, où nous avons pu comparer les indices caractéristiques du milieu.

V.1 - REFLEXIONS SUR LES METHODES DE CALCUL

On peut tirer plusieurs renseignements de l'étude de la morphométrie des bassins versants par calcul automatique. Les indices classiques sont parfaitement calculables avec une précision acceptable, sous réserve d'adapter la méthode de calcul (estimation statistique du paramètre). Cela ne saurait justifier à lui seul le passage par voie informatique, car si le coût en est relativement réduit, il nécessite, avec les moyens dont nous disposons, d'un travail de collecte de données fastidieux. Par contre, cette méthode ouvre la voie à des études beaucoup plus larges et plus fines, notamment au niveau des pentes des versants.

La présentation des résultats à l'imprimante n'est qu'une sortie de travail. Le programme a été maintes fois modifié, et les paramètres qui ont été calculés n'ont pas tous été utilisés dans ce travail, soit que les résultats aient été bien trop évidents (relation entre pente moyenne et pente médiane), soit qu'ils aient été incomplets (distance de l'exutoire au centre de gravité). Nous poursuivons actuellement le perfectionnement de cet outil de travail : suppression des travaux qui ne nous paraissent plus intéressants (ajustement à une loi de Galton pour les altitudes par exemple) et création de nouveau algorithmes :

- le premier servira à évaluer la courbe aire-distance : pour cela, partant d'un point de maillage, on calculera la distance à l'exutoire en traçant la ligne de courant appréciée par des segments de droite orientés selon la ligne de plus grande pente. Nous nous heurtons pour l'instant, à des problèmes de stabilités en fonction de la taille des segments de droite et au problème des dépressions fermées que génère la schématisation des bassins versants.

- compte tenu des critiques que nous faisons sur la notion de courbe aire-distance, nous pensons tenter de fournir un paramètre de temps caractéristique du bassin. En effet, la vitesse d'une particule d'eau peut se calculer par des formules du style Mauning-Strickler :

$$V = k\, R_H^{2/3}\, I^{1/2}$$

En admettant une valeur moyenne pour

$$k\, R_H^{2/3} = C^{te}$$

le temps mis par une particule pour gagner l'exutoire s'écrit :

$$T = \int_0^{\ell_e} \frac{1}{C^{te}\sqrt{I}}\, d\ell$$

ℓ étant l'abscisse curviligne du point de départ par rapport à l'exutoire du bassin.

On se rend compte alors que l'on peut obtenir un temps caractéristique du bassin en calculant la moyenne de T pondérées par les surfaces. Nous disposons en chaque point de la valeur de I, et il nous paraît alors possible de calculer cet indice d'après quelques points d'échantillonage. Nous ne savons encore si nous différencierons les trajets sur le sol et dans les cours d'eau.

Ce travail n'est qu'ébauché et nos idées ne sont pas encore très claires sur les difficultés à venir. Nous ne pouvons encore préciser quand ces méthodes seront opérationnelles si tant est, qu'elles le deviennent.

Nous n'avons pas attendu une version définitive pour présenter le travail. En effet, l'utilisation de cet outil commençant à passer dans la pratique, il était nécessaire d'en justifier les méthodes de calcul, et de préciser la fiabilité des résultats.

V.2 - REFLEXIONS SUR LA CARACTERISATION DES PENTES

La statistique des pentes des versants d'un bassin nécessite au moins la connaissance du type de loi statistique (Gauss ou Galton) et d'un paramètre de tendance centrale auquel est liée la dispersion.

Vouloir caractériser les pentes par un seul indice ne permet d'approcher que les valeurs centrales de la distribution des pentes (entre les fréquences 0,2 et 0,8 environ).

Nous avons mis en évidence une étroite relation statistique entre l'indice de pente globale et l'indice de pente de Roche. Ce résultat avait déjà été signalé par P. DUBREUIL dans (6). Cependant, dans le cadre du versant lorrain des Vosges, nous avons pu donner une explication déterministe, basée sur les résultats de l'étude statistique des altitudes. Nous avons proposé enfin, de caractériser les pentes par la moyenne des pentes calculées par l'ordinateur. Cette valeur semble mieux corrélée aux pentes réelles que tous les autres indices. Cependant, son utilisation ne peut être que complémentaire par rapport à ces "grands classiques". En effet, leur obtention est infiniment plus aisée, et se justifie parfaitement pour une évaluation rapide. Cela ne serait pas

raisonnable de mesurer toutes les altitudes sur un bassin pour obtenir uniquement cette pente moyenne calculée. Celle-ci n'est qu'un des nombreux résultats que peut fournir, à partir de ces données, le calcul automatique dans le cadre d'une étude approfondie de la morphométrie d'un bassin.

V.3 - RAPPORT ENTRE LES DIFFERENTS ELEMENTS CARACTERISTIQUES DU MILIEU HYDROLOGIQUE

Cette étude n'a été qu'effleurée, compte tenu de notre compétence en analyse factorielle. Les quelques résultats partiels que nous avons obtenus nous ont montré en effet, que les paramètres mineurs, tels que R_c, R_ℓ, K_c, D_d, F_1..... ont des influences apparamment du même ordre, et il n'est guère possible d'isoler parmi eux, des paramètres dominants.

Nous avons constaté néanmoins que la taille des bassins versants d'ordre 1 n'influe pas sur la différence entre pente calculée et pente réelle. Ceci ne veut pas dire que F_1 n'ait pas d'influence sur la pente.

Dans ce domaine, la masse de données acquises peut, je le pense, révéler encore de nombreux résultats d'intérêt régional. Et de plus, les analogies constatées avec certains résultats obtenus par P. DUBREUIL, permettent de penser qu'une partie au moins de ces résultats peut se vérifier à une échelle beaucoup plus grande.

V.4 - INTERET GENERAL DE L'ETUDE

Le sujet traité ici pourra, avec justes raisons, paraître marginal. En effet, il est situé aux confins de la géologie appliquée, de l'hydrologie de surface, ou même de la géographie.

Cependant, le stade des aménagements des pays développés conduit à rencontrer très souvent des problèmes concernant de petits ouvrages à buts multiples, qui ne nécessitent qu'une étude hydrologique rapide et peu coûteuse. La politique des Services Gestionnaires des Eaux comme par exemple le S.R.A.E.Lorraine, avec lequel nous collaborons, est donc d'établir des lois empiriques régionales reliant les différents paramètres hydrologiques aux caractéristiques du milieu. Nous pensons donc que ce travail sera utile dans le cadre d'une recherche plus vaste sur les écoulements en Lorraine.

TABLE DES FIGURES DANS LE TEXTE

pages

Figure 1 - Organisation schématique d'un service hydrologique 10

Figure 2 - Courbe clinographique 14

Figure 3 - Périmètre d'un bassin versant 20

Figure 4 - Courbe hypsométrique et dénivelée 21

Figure 5 - Rectangle équivalent 23

Figure 6 - Bassins versants schématisés 24

Figure 7 - Classification de Strahler 26

Figure 8 - Effet de l'oubli d'un thalweg d'ordre 1 27

Figure 9 - Effet d'un raccordement imprécis 27

Figure 10 - Détermination de R_c et R_ℓ 29

Figure 11 - Courbe distance-surface 29

Figure 12 - Difficulté de la mesure des pentes ponctuelles 30

Figure 13 - Différents éléments du maillage 34

Figure 14 - Numérotation des points-frontière 35

Figure 15 - Altitudes dont la connaissance est nécessaire 36

Figure 16 - Schéma-type d'un paquet de cartes de données 37

Figure 17 - Calcul de la surface du bassin versant 38

Figure 18 - Fréquence au dépassement des altitudes 40

Figure 19 - Différents éléments de la ligne de plus grande pente 43

Figure 20 - Bloc-diagramme du bassin de la Meurthe à Fraize 48

Figure 21 - Carte topographique calculée du bassin de la Meurthe à Fraize 49

Figure 22 - Exemple de détection d'une erreur sur les points-frontière 50

Figure 23 - Exemple de détection d'une erreur sur les altitudes 51

Figure 24 - Comparaison entre ligne de niveau mesurée et calculée 52

Figure 25 - Localisation générale de la zone étudiée 59

Figure 26 - Position des bassins versants équipés 59

Figure 27 - Distribution du nombre de bassin en fonction de leurs surfaces 60

pages

Figure 28 - Coupe géologique schématique Est-Ouest 61
Figure 29 - Cadre géologique 65
Figure 30 - Corrélation entre nombre de point et surface du bassin versant 68
Figure 31 - Statistique des coefficients de compacité 69
Figure 32 - Corrélation entre périmètre réel et schématisé 69
Figure 33 - Corrélation entre l'intervalle de variation et l'écart-type des altitudes.. 71
Figure 34 - Corrélation entre dénivelée D et écart-type des altitudes σ_H 72
Figure 35 - Statistique des indices géologiques 73
Figure 36 - Rapport entre perméabilité et dureté 73
Figure 37 - Statistique entre F_1 et D_d 74
Figure 38 - Corrélation entre F_1 et D_d 75
Figure 39 - Statistique des R_c et R_ℓ 75
Figure 40 - Relation entre R_c et R_ℓ 76
Figure 41 - Relation entre F_1 et R_ℓ 76
Figure 42 - Relation entre F_1 et R_c 76
Figure 43 - Statistique des indices I_p, I_G et D_s 77
Figure 44 - Relation entre I_p et I_G 78
Figure 45 - Relation entre D_d et σ_H 81
Figure 46 - Corrélation entre $\overline{P_{réel}}$ et $\sigma_{P_{réel}}$ 83
Figure 47 - Corrélation entre $\overline{\log P_{réel}}$ et $\sigma_{\log P_{réel}}$ 83
Figure 48 - Corrélation entre $\overline{P_{réel}}$ et $\overline{\log P_{réel}}$ 84
Figure 49 - Relation entre surface et pente 86
Figure 50 - Relation entre pente et indice géologique de dureté S_1, S_2, S_3 87
Figure 51 - Relation entre dénivelée spécifique et indice géologique de dureté P_1,P_2,P_3 87
Figure 52 - Normalisation des variables 88
Figure 53 - Statistiques des pentes moyennes calculées et réelles 90
Figure 54 - Relation entre $\overline{P_{réel}}$ et $\overline{P_{calculé}}$ normalisés 91
Figure 55 - Relation entre $\overline{P_{réel}}$ et I_G normalisés..... 91
Figure 56 - Relation entre $\overline{P_{réel}}$ et I_p normalisés..... 92
Figure 57 - Relation entre $\overline{P_{réel}} - \overline{P_{calculé}}$ et F_1 normalisés..... 93
Figure 58 - Variation des indices de pente à une confluence..... 94

BIBLIOGRAPHIE

1 ABRAMOWITZ M., STEGUN I.A. (1966) - *Handbook of mathematical functions*. Dover Publication, New York.

2 ARLERY R., GRISOLLET A., GUILMET B. (1973) - *Climatologie. Méthodes et pratiques*. Gauthiers-Villars, Paris.

3 BRUNET-MORET Y. (1969) - Etude de quelques lois statistiques utilisées en Hydrologie. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, n° 3*, Paris.

4 BRUNET-MORET Y. (1973) - Statistique de rang. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, n° 2*, Paris.

5 BRUNET-MORET Y. (1974) - Distribution exponentielle généralisée. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, n° 4*, Paris.

6 BRUNET-MORET Y. (1975) - Distribution gausso-logarithmique. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, n° 2*, Paris.

7 DERRUAU M. (1962) - *Précis de géomorphologie*. Masson, Paris.

8 DOORNKAMP J.C., KING A.M. (1971) - *Numerical analysis in geomorphology*. Edwards Arnold, London.

9 DUBREUIL P. (1965) - Contribution à l'étude d'implantation des bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, n° 2*, Paris.

10 DUBREUIL P. (1966) - Bassins représentatifs et expérimentaux. Réflexions sur le Symposium A.I.H.S. de Budapest. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, n° 4*, Paris.

11 DUBREUIL P. (1966) - Les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants. Leur détermination avec une précision acceptable. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, n° 5*, Paris.

12 DUBREUIL P., GUISCAFRE J. (1970) - *Planification du réseau hydrométrique minimal*. O.R.S.T.O.M.-Ministère de l'Agriculture, Paris.

13 DUBREUIL P. (1974) - *Initiation à l'analyse hydrologique*. Masson, Paris.

14 DUBREUIL P., MORELL M., SECHET P. (1975) - Comportement et interaction des paramètres physiques de petits bassins semi-arides et intertropicaux. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Hydrologie, n° 1*, Paris.

15 HERBAUD J. (1968) - *Etude des affluents alsaciens du Rhin*. O.R.S.T.O.M.-Ministère de l'Agriculture, Paris.

16 HIRSCH F. (1962) - Méthode de prévision des débits des cours d'eau par l'analyse morphométrique des réseaux fluviatiles. *Revue de géomorphologie dynamique, n° 7, 8, 9*, Strasbourg.

17 HIRSCH F. (1962) - Application de la morphométrie à l'hydrologie. *Revue de géomorphologie dynamique, n° 7, 8, 9*, Strasbourg.

18 MALLET J.L. (1974) - *Etude d'une méthode d'estimation et d'une méthode de filtrage. Application à la cartographie automatique*. Thèse, Faculté des Sciences, Nancy.

19 MALLET J.L. (1974) - Présentation d'un ensemble de méthodes et de techniques de la cartographie automatique numérique. *Mémoires des Sciences de la Terre*. Nancy.

20 MALLET J.L. (1976) - Programmes de cartographie automatique : présentation de la bibliothèque CARTØLAB. *Mémoires des Sciences de la Terre*. Nancy.

21 MARGAT J. (1975) - *Projet de nouvelle légende de carte hydrogéologique*. Etude B.R.G.M., 75 SGN 259 AME, Orléans.

22 MELTON M.A. (1957) - *An analysis of the relations among elements of climate, surface properties and geomorphology*. Projet N.R. 389.042, Columbia University, New-York.

23 REMENIERAS G. (1970) - *L'Hydrologie de l'ingénieur*. Eyrolles, Paris.

24 ROCHE M. (1963) - *Hydrologie de surface*. Gauthiers-Villars, Paris.

25 SCHEIDEGGER A.E., LANGBEIN W.B. (1966) - Probability concepts in Geomorphology. *Geological Survey, professional paper 500 C*, Washington.

26 SCHUMM S.A. (1956) - Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Pertle Amboy. *Bull. Geol. Soc. Americ., Vol. 37*, New-Jersey.

27 VEN TE CHOW P.M. (1964) - *Handbook of applied hydrology*. Mc Graw-Hill Book Company, New-York.

28 Anonyme (1967) - *Données de base des bassins représentatifs et expérimentaux*. O.R.S.T.O.M., Service Hydrologique, Paris.

29 Anonyme (1972) - *Le réseau de l'information hydrométrique dans le Bassin Rhin-Meuse*. Mission déléguée de Bassin Rhin-Meuse, Metz.

30 Anonyme (1974) - *Catalogue des surfaces des bassins versants du Bassin Rhin-Meuse*. Mission déléguée de Bassin Rhin-Meuse, Metz.

31 Anonyme (1975) - *Etude des crues de projet. Analyse morphométrique des bassins sélectionnés*. Ministère de l'Agriculture, Paris.

LISTE DES ANNEXES

	Pages
A - Sortie type du programme I.D.P.	108
B - Sortie type du programme de corrélation entre pente mesurée et pente calculée	118
C - Légende des cartes hydrologiques	121
D - La Moselotte à Zainvillers et ses bassins versants amonts	122
E - La Meurthe à Fraize et son bassin versant amont	148
F - La Cleurie à Cleurie	159
G - La Mortagne à Autrey et ses bassins versants amonts	165
H - Le Rabodeau à Moyenmoutier et ses bassins versants amonts	186
I - L'Avière à Frizon	207
J - Le Durbion à Vaxoncourt et ses bassins versants	213
K - Le Vacon à Barbas	234
L - L'Euron à Froville	240
M - Le Ruisseau de Leintrey à Blémerey	246
N - Le Brénon à Autrey et ses bassins versants amont	252

A - SORTIE TYPE DU PROGRAMME I.D.P.

XO = 1.0000
KX = [illegible]
PX = 1.0000
YO = 1.0000
KY = [illegible]
PY = 1.0000
ECH = [illegible]
ZMAX = 1310.00
ZMIN = 400.00
NBRE = 22

TABLEAU DES COTES DONNEES EN ENTREE ET APPARTENANCE AU BASSIN VERSANT

LIGNE 33	0.	0.	-610.	-660.	-650.	-710.	-730.	-700.	-650.	-640.	-700.	-830.	0.	0.	0.
LIGNE 32	0.	0.	-640.	-553.	-560.	-440.	730.	760.	-750.	-750.	-720.	-790.	-950.	-960.	0.
LIGNE 31	0.	-490.	-494.	-510.	-570.	635.	620.	690.	760.	870.	-900.	-750.	-825.	-860.	-950.
LIGNE 30	0.	-470.	-494.	-505.	525.	545.	575.	610.	640.	730.	850.	920.	-920.	-950.	-1050.
LIGNE 29	0.	-510.	-540.	510.	510.	540.	650.	710.	780.	710.	730.	800.	980.	1000.	-1040.
LIGNE 28	0.	-470.	[illegible]	670.	520.	530.	630.	760.	800.	860.	930.	830.	870.	990.	1060.
LIGNE 27	0.	-465.	-465.	710.	540.	535.	560.	650.	690.	850.	950.	880.	960.	1000.	1060.
LIGNE 26	0.	-600.	-640.	695.	550.	610.	590.	590.	610.	690.	790.	780.	900.	930.	990.
LIGNE 25	0.	-570.	-700.	710.	560.	640.	670.	700.	750.	720.	670.	720.	790.	870.	965.
LIGNE 24	0.	-600.	-730.	700.	560.	760.	760.	690.	870.	830.	700.	740.	810.	960.	-930.
LIGNE 23	0.	-550.	-450.	690.	590.	720.	830.	830.	840.	780.	800.	910.	850.	980.	-920.
LIGNE 22	-585.	-650.	-405.	720.	610.	730.	875.	930.	930.	780.	890.	1020.	930.	-950.	-870.
LIGNE 21	-560.	-700.	-650.	820.	610.	650.	750.	930.	920.	800.	900.	1050.	-1050.	-950.	-880.
LIGNE 20	-740.	-760.	870.	740.	780.	720.	610.	780.	920.	920.	930.	1025.	-1000.	-940.	-990.
LIGNE 19	-870.	-940.	[illegible]	840.	960.	840.	760.	700.	910.	1010.	1040.	1050.	-1000.	-990.	-1090.
LIGNE 18	-570.	-950.	940.	970.	1080.	940.	720.	670.	650.	1010.	1010.	-890.	-1060.	-1110.	-1160.
LIGNE 17	[illegible]	-1000.	-930.	-1010.	1080.	950.	750.	645.	690.	1000.	940.	900.	1040.	1125.	1185.
LIGNE 16	-1180.	-1040.	-950.	-1040.	1190.	960.	690.	670.	730.	790.	770.	950.	1120.	1180.	1230.
LIGNE 15	0.	-1075.	-950.	-1020.	990.	760.	750.	800.	750.	710.	900.	1060.	1200.	1230.	1270.
LIGNE 14	0.	-1190.	-1040.	1120.	970.	820.	1000.	850.	730.	740.	960.	1160.	1220.	1260.	1295.
LIGNE 13	0.	-1100.	-1110.	1150.	980.	930.	1050.	830.	720.	800.	990.	1130.	1220.	1270.	-1300.
LIGNE 12	0.	[illegible]	[illegible]	-1240.	1150.	1110.	660.	730.	930.	1100.	1140.	1190.	1250.	-1200.	-1130.
LIGNE 11	0.	-1025.	[illegible]	-950.	980.	970.	740.	840.	950.	1040.	1150.	1230.	1245.	-1150.	-1100.
LIGNE 10	0.	-1040.	-1045.	870.	440.	510.	520.	590.	1070.	1140.	1140.	1210.	-1250.	-1150.	-1070.
LIGNE 9	0.	-1070.	[illegible]	-940.	960.	920.	410.	360.	1100.	1210.	1215.	1220.	-1110.	-1130.	-990.
LIGNE 8	0.	-575.	-984.	-980.	1050.	960.	860.	1060.	1160.	1170.	1240.	-1200.	-1040.	-970.	0.
LIGNE 7	0.	-920.	-1150.	-1045.	1100.	850.	1080.	1180.	1200.	-1230.	-1265.	-1110.	-1030.	-940.	0.
LIGNE 6	0.	-890.	-920.	-990.	990.	900.	1110.	1200.	1270.	-1180.	-1170.	-1080.	-1110.	0.	0.
LIGNE 5	0.	-930.	-940.	-1040.	940.	935.	1130.	1235.	-1120.	-1020.	-1050.	-1010.	0.	0.	0.
LIGNE 4	0.	[illegible]	[illegible]	[illegible]	930.	930.	1150.	1250.	-1100.	-940.	-865.	0.	0.	0.	0.
LIGNE 3	0.	[illegible]	[illegible]	1370.	930.	1140.	1130.	-1100.	-1100.	-1050.	0.	0.	0.	0.	0.
LIGNE 2	0.	-940.	-1150.	1150.	1275.	1310.	-1200.	-900.	-850.	-940.	0.	0.	0.	0.	0.
LIGNE 1	0.	-940.	-1100.	-1110.	-1140.	-1250.	-1230.	-1050.	-750.	-750.	0.	0.	0.	0.	0.

LIGNE 33	0.	0.	0.
LIGNE 32	0.	0.	0.
LIGNE 31	-950.	-1020.	0.
LIGNE 30	-1100.	-1040.	0.
LIGNE 29	-1120.	-1090.	0.
LIGNE 28	-1110.	-980.	0.
LIGNE 27	-1160.	-980.	0.
LIGNE 26	-700.	-840.	0.
LIGNE 25	-970.	-890.	0.
LIGNE 24	-910.	-870.	0.
LIGNE 23	-920.	-870.	0.
LIGNE 22	-950.	-770.	0.
LIGNE 21	-870.	-1040.	0.
LIGNE 20	[illegible]	-1030.	-1180.
LIGNE 19	-1160.	-1140.	-1190.
LIGNE 18	-1215.	-1060.	-1260.
LIGNE 17	-1245.	-1254.	-1100.
LIGNE 16	-1250.	-1270.	-1150.
LIGNE 15	-1250.	-1260.	-1090.
LIGNE 14	-1230.	-1060.	-950.
LIGNE 13	-1200.	-1140.	0.
LIGNE 12	-1190.	-1170.	0.
LIGNE 11	0.	0.	0.
LIGNE 10	0.	0.	0.
LIGNE 9	0.	0.	0.
LIGNE 8	0.	0.	0.
LIGNE 7	0.	0.	0.
LIGNE 6	0.	0.	0.
LIGNE 5	0.	0.	0.
LIGNE 4	0.	0.	0.
LIGNE 3	0.	0.	0.
LIGNE 2	0.	0.	0.
LIGNE 1	0.	0.	0.

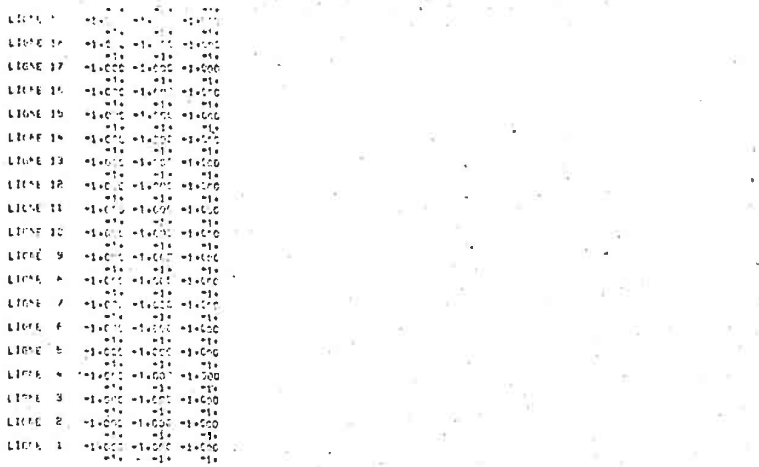
ABSCISSE ET ORDONNEE DES POINTS FRONTIERES

4.6 29.8	3.6 27.6	4.1 26.5	3.6 25.0	3.1 21.2	3.7 20.4	1.8 18.5	5.0 17.0	3.7 13.1	4.7 12.7
7.7 9.6	6.7 7.2	3.4 1.1	6.4 1.1	7.0 3.0	8.0 3.4	8.0 4.8	11.3 7.4	14.2 12.8	14.9 12.9
16.0 17.5	11.3 17.6	12.2 19.7	15.4 26.4	15.8 28.4	7.5 32.5	6.0 31.1	4.0 29.8		

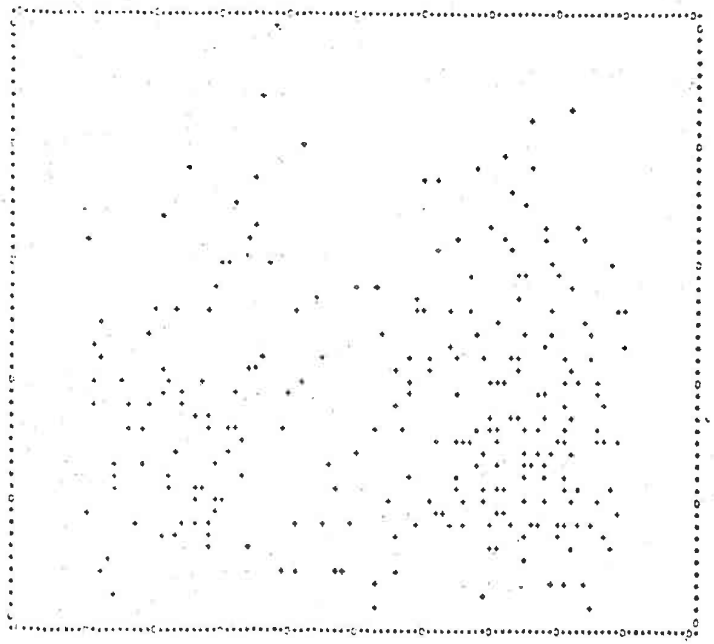
PENTES CALCULEES A L'INTERIEUR DU BASSIN VERSANT

LIGNE 33	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 32	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.228	.039	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	214.	192.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 31	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.041	.178	.250	.256	.181	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	207.	132.	216.	229.	258.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 30	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.099	.119	.070	.065	.116	.325	.333	.033	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	222.	204.	324.	234.	277.	225.	214.	317.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 29	-1.000	-1.000	-1.000	.142	.022	.156	.230	.252	.225	.195	.131	.318	.233	.040	-1.000
	-1.	-1.	-1.	18.	266.	259.	295.	325.	4.	25.	319.	244.	247.	318.	-1.
LIGNE 28	-1.000	-1.000	-1.000	.294	.130	.126	.257	.188	.142	.252	.308	.165	.193	.207	.155
	-1.	-1.	-1.	-1.	74.	264.	245.	246.	214.	320.	10.	38.	263.	271.	299.
LIGNE 27	-1.000	-1.000	-1.000	.121	.211	.097	.140	.255	.320	.384	.177	.055	.156	.142	.121
	-1.	-1.	-1.	74.	81.	330.	245.	206.	219.	233.	178.	168.	297.	246.	228.
LIGNE 26	-1.000	-1.000	-1.000	.122	.087	.122	.130	.073	.121	.268	.343	.225	.273	.194	.136
	-1.	-1.	-1.	49.	79.	326.	16.	350.	304.	231.	192.	208.	219.	211.	166.
LIGNE 25	-1.000	-1.000	-1.000	.257	.094	.225	.188	.139	.323	.227	.095	.147	.182	.213	.054
	-1.	-1.	-1.	82.	70.	319.	345.	318.	355.	29.	176.	247.	235.	282.	173.
LIGNE 24	-1.000	-1.000	-1.000	.229	.051	.257	.219	.174	.208	.244	.191	.247	.266	.195	-1.000
	-1.	-1.	-1.	94.	292.	290.	40.	311.	287.	75.	35.	330.	286.	317.	-1.
LIGNE 23	-1.000	-1.000	-1.000	.152	.036	.209	.170	.262	.040	.104	.275	.320	.138	.095	-1.000
	-1.	-1.	-1.	87.	332.	262.	322.	359.	50.	140.	321.	354.	328.	254.	-1.
LIGNE 22	-1.000	-1.000	-1.000	.314	.007	.323	.226	.133	.226	.069	.334	.141	.232	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	52.	194.	255.	249.	329.	64.	80.	267.	350.	21.	-1.	-1.
LIGNE 21	-1.000	-1.000	-1.000	.345	.262	.179	.457	.269	.230	.156	.312	.176	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	90.	51.	250.	225.	279.	97.	17.	272.	265.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 20	-1.000	-1.000	.051	.111	.384	.320	.093	.460	.134	.243	.209	.093	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	13.	34.	1.	47.	245.	235.	274.	6.	323.	284.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 19	-1.000	-1.000	.149	.301	.322	.419	.231	.273	.339	.144	.123	.163	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	4.	336.	359.	91.	51.	248.	247.	307.	342.	162.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 18	-1.000	-1.000	.044	.237	.106	.46	.318	.111	.105	.243	.315	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	9.	358.	2.	68.	85.	238.	271.	272.	140.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 17	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.030	.395	.443	.185	.446	.267	.336	.253	.247	.146	.170
	-1.	-1.	-1.	-1.	336.	106.	95.	273.	265.	156.	152.	288.	281.	291.	292.
LIGNE 16	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.256	.539	.176	.182	.127	.342	.173	.436	.256	.147	.161
	-1.	-1.	-1.	-1.	113.	119.	61.	340.	251.	182.	301.	293.	309.	321.	354.
LIGNE 15	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.403	.145	.367	.183	.131	.255	.468	.396	.135	.039	.397
	-1.	-1.	-1.	-1.	110.	135.	352.	356.	74.	205.	293.	305.	302.	326.	314.
LIGNE 14	-1.000	-1.000	-1.000	.098	.366	.230	.251	.348	.253	.325	.442	.265	.078	.102	.063
	-1.	-1.	-1.	31.	95.	342.	341.	85.	145.	308.	277.	282.	274.	300.	12.
LIGNE 13	-1.000	-1.000	-1.000	.155	.230	.309	.233	.458	.271	.526	.299	.245	.137	.116	-1.000
	-1.	-1.	-1.	153.	62.	334.	137.	111.	334.	324.	312.	273.	281.	235.	-1.
LIGNE 12	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.117	.214	.615	.195	.512	.236	.195	.180	.084	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	294.	93.	128.	270.	299.	331.	342.	314.	346.	-1.	-1.
LIGNE 11	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.293	.491	.169	.358	.274	.232	.231	.162	.100	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	197.	143.	95.	313.	325.	275.	259.	274.	79.	-1.	-1.
LIGNE 10	-1.000	-1.000	-1.000	.124	.080	.246	.151	.297	.246	.220	.094	.141	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	14.	110.	171.	325.	291.	339.	344.	318.	264.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 9	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.277	.242	.441	.356	.258	.112	.115	.127	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	3.	55.	313.	271.	264.	274.	35.	87.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 8	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.099	.763	.349	.274	.132	.191	.077	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	64.	114.	323.	307.	319.	276.	323.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 7	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.366	.474	.408	.187	.274	.099	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	121.	269.	307.	319.	336.	297.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 6	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.196	.260	.390	.206	.100	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	129.	249.	295.	306.	159.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 5	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.256	.395	.352	.135	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	127.	281.	252.	54.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 4	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	.123	.437	.353	.267	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	72.	283.	256.	119.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 3	-1.000	-1.000	-1.000	.212	.274	.372	.295	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	73.	10.	313.	281.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 2	-1.000	-1.000	-1.000	.289	.309	.481	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	67.	335.	330.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.
LIGNE 1	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.	-1.

LIGNE 33	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 32	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 31	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 30	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 29	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 28	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 27	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 26	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 25	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 24	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 23	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 22	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 21	-1.000	-1.000	-1.000
	-1.	-1.	-1.
LIGNE 20	[illegible]	[illegible]	[illegible]



LISTRIBUTION DES PENTES EN FONCTION DE L'AZIMUT



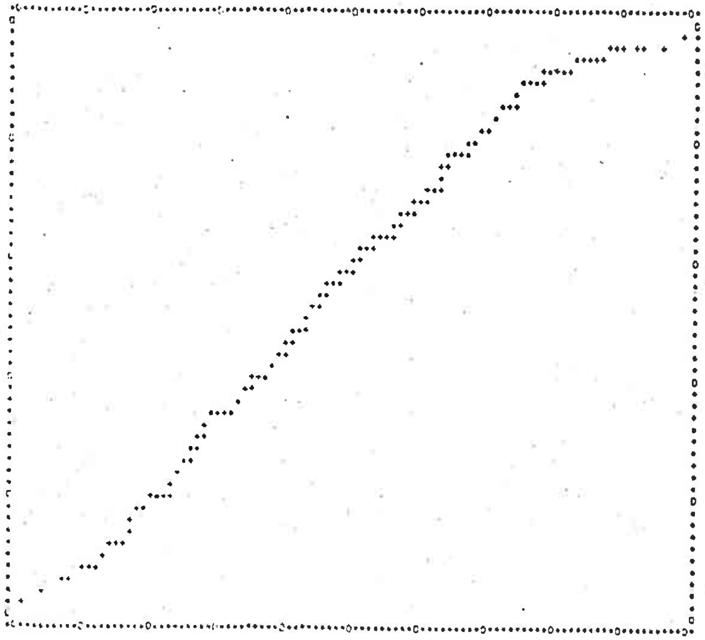
XMIN= +0.0000E 00 XMAX= +0.0000E 00
YMIN= +0.0000E 00 YMAX= +0.0000E 00

* UN POINT
% PLUSIEURS POINTS

REPARTITION DES AZIMUTS

359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	359+	358+
358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+	358+
357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+	357+
356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+	356+
355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+	355+
354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+	354+
353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+	353+
352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+	352+
351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+	351+
350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+	350+
349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+	349+
348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+	348+
347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+	347+
346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+	346+
345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+	345+
344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+	344+
343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+	343+
342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+	342+
341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+	341+
340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+	340+
339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+	339+
338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+	338+
337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+	337+
336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+	336+
335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+	335+
334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+	334+
333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+	333+
332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+	332+
331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+	331+
330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+	330+
329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+	329+
328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+	328+
327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+	327+
326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+	326+
325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+	325+
324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+	324+
323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+	323+
322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+	322+
321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+	321+
320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+	320+
319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+	319+
318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+	318+
317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+	317+
316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+	316+
315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+	315+
314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+	314+
313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+	313+
312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+	312+
311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+	311+
310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+	310+
309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+	309+
308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+	308+
307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+	307+
306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+	306+
305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+	305+
304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+	304+
303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+	303+
302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+	302+
301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+	301+
300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+	300+
299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+	299+
298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+	298+
297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+	297+
296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+	296+
295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+	295+
294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+	294+
293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+	293+
292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+	292+
291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+	291+
290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+	290+
289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+	289+
288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+	288+
287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+	287+
286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+	286+
285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+	285+
284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+	284+
283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+	283+
282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+	282+
281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+	281+
280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+	280+
279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+	279+
278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+	278+
277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+	277+
276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+	276+
275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+	275+
274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+	274+
273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+	273+
272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+	272+
271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+	271+
270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+	270+
269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+	269+
268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+	268+
267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+	267+
266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+	266+
265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+	265+
264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+	264+
263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+	263+
262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+	262+
261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+	261+
260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+	260+
259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+	259+
258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+	258+
257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+	257+
256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+	256+
255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+	255+
254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+	254+
253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+	253+
252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+	252+
251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+	251+
250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+	250+
249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+	249+
248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+	248+
247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+	247+
246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+	246+
245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+	245+
244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+	244+
243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+	243+
242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+	242+
241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+	241+
240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+	240+
239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+	239+
238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+	238+
237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+	237+
236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+	236+
235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+	235+
234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+	234+
233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+	233+
232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+	232+
231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+	231+
230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+	230+
229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+	229+
228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+	228+
227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+	227+
226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+	226+
225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+	225+
224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+	224+
223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+	223+
222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+	222+
221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+	221+
220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+	220+
219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+	219+
218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+	218+
217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+	217+
216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+	216+
215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+	215+
214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+	214+
213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+	213+
212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+	212+
211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+	211+
210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+	210+
209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+	209+
208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+	208+
207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+	207+
206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+	206+
205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+	205+
204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+	204+
203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+	203+
202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+	202+
201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+	201+
200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+	200+
199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+	199+
198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+	198+
197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+	197+
196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+	196+
195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+	195+
194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+	194+
193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+	193+
192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+	192+
191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+	191+
190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+	190+
189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+	189+

AJUSTEMENT A LA LOI DE GALTON AVEC X0= .000E 00



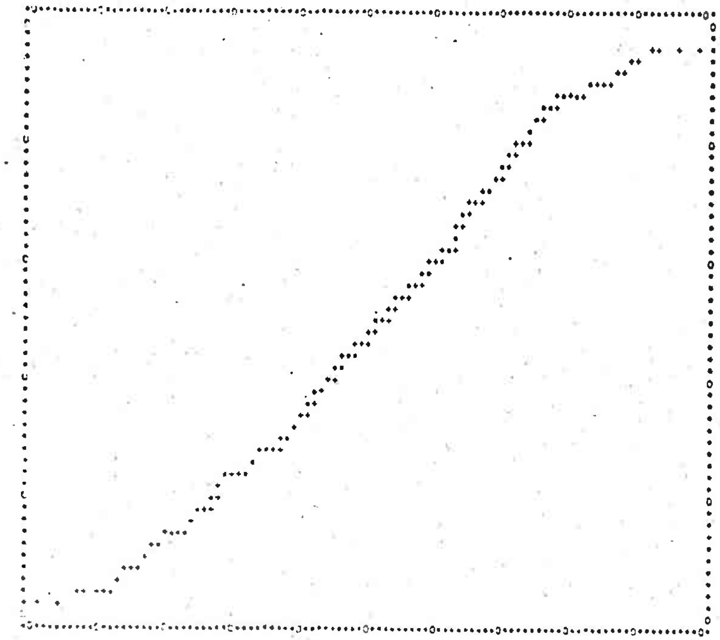
XMIN= -.25000E 01 XMAX= .25000E 01
YMIN= .26[illegible]E 01 YMAX= .31173E 01

+ 1UN POINT
* PLUSIEURS POINTS

UNE COLONNE CORRESPOND A .50000E-01 UNITES
UNE LIGNE CORRESPOND A .8[illegible]E-02 UNITES

[illegible] LES [illegible] POINTS SORTENT DES LIMITES

AJUSTEMENT A UNE LOI DE GAUSS



XMIN= -.25000E 01 XMAX= .25000E 01
YMIN= .[illegible]E 03 YMAX= .13100E 04

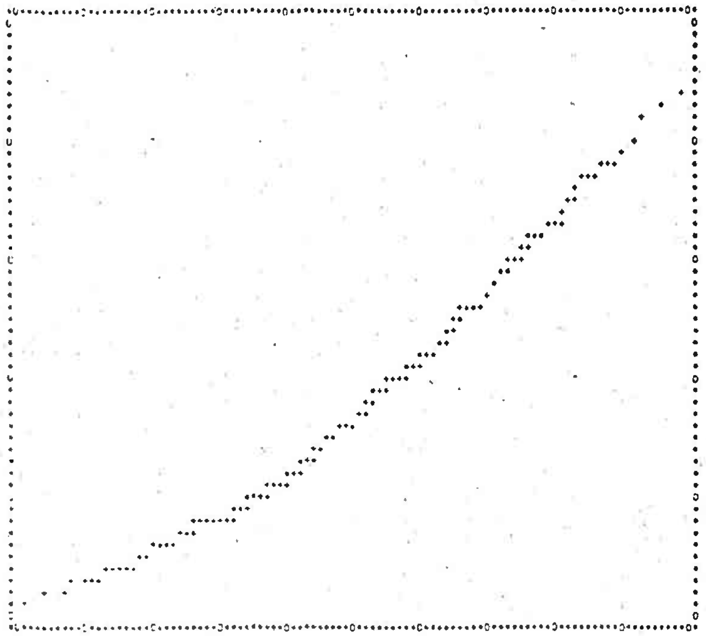
+ 1UN POINT
* PLUSIEURS POINTS

UNE COLONNE CORRESPOND A .50000E-01 UNITES
UNE LIGNE CORRESPOND A .142[illegible]E 02 UNITES

[illegible] LES [illegible] POINTS SORTENT DES LIMITES

STATISTIQUE DES PENTES

AJUSTEMENT A UNE LOI DE GAUSS

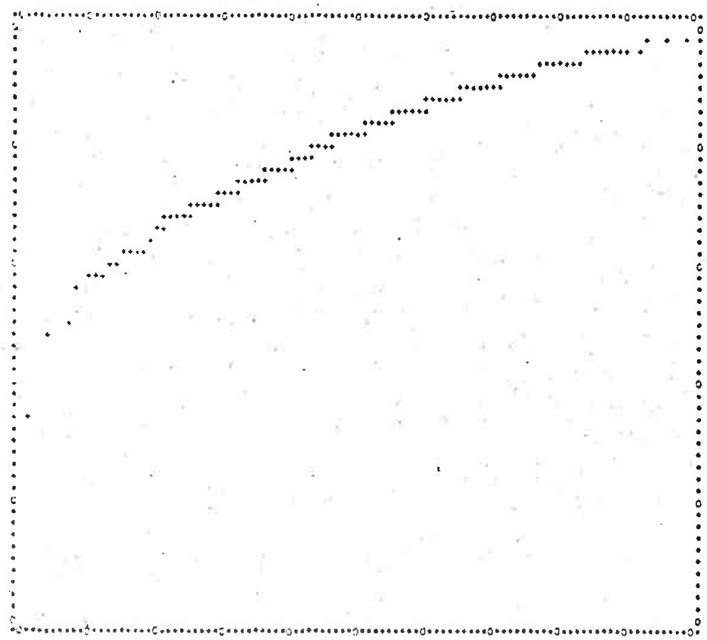


XMIN= -.25000E 01   XMAX= .25000E 01   + :UN POINT
YMIN= [illegible]   YMAX= .41540E 00   * :PLUSIEURS POINTS

UNE COLONNE CORRESPOND A .50000E-01 UNITES
UNE LIGNE CORRESPOND A [illegible]E-01 UNITES

[illegible] DES [illegible] POINTS SORTENT DES LIMITES

AJUSTEMENT A UNE LOI DE GALTON AVEC X0= .000E 00

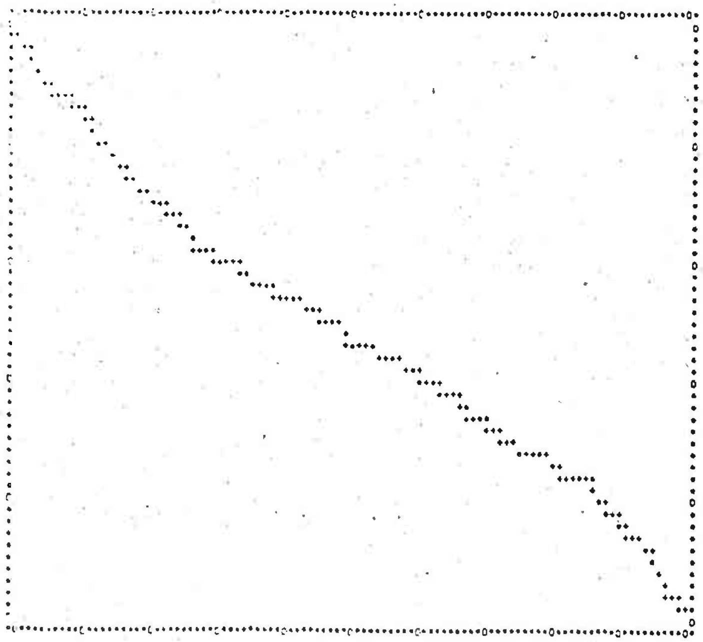


XMIN= -.25000E 01   XMAX= .25000E 01   + :UN POINT
YMIN= -.30000E 01   YMAX= -.21089E 00   * :PLUSIEURS POINTS

UNE COLONNE CORRESPOND A .50000E-01 UNITES
UNE LIGNE CORRESPOND A .55780E-01 UNITES

2 DES 208 POINTS SORTENT DES LIMITES

COURBE HYPSOMETRIQUE



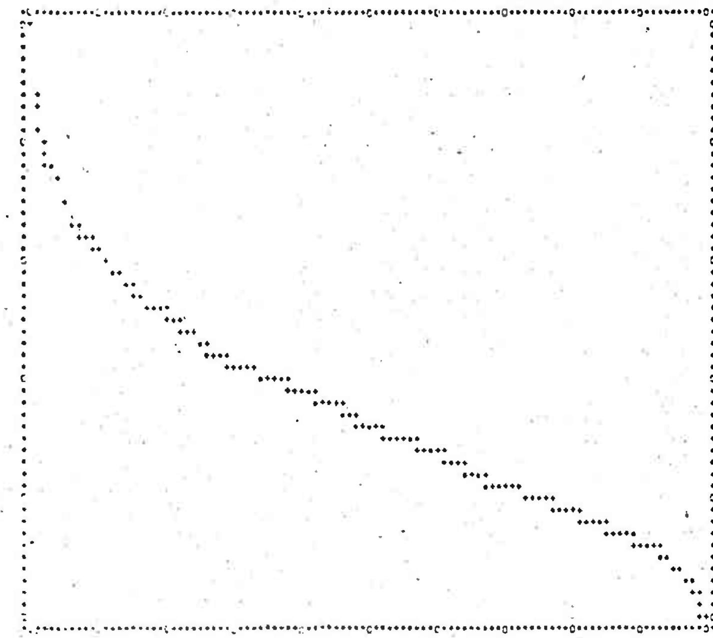
XMIN= .00000E 00   XMAX= .10000E 01
YMIN= [illegible]   YMAX= .1310CE 04

* 1UN POINT
* 1PLUSIEURS POINTS

UNE COLONNE CORRESPOND A [illegible] UNITES
UNE LIGNE CORRESPOND A [illegible] UNITES

LES [illegible] POINTS SONT FIGURES SUR LE GRAPHE

REPARTITION DES PENTES



XMIN= [illegible]   XMAX= .10000E 01
YMIN= [illegible]   YMAX= .41540E 00

* 1UN POINT
* 1PLUSIEURS POINTS

UNE COLONNE CORRESPOND A .10000E-01 UNITES
UNE LIGNE CORRESPOND A .12171E-01 UNITES

LES [illegible] POINTS SONT FIGURES SUR LE GRAPHE

BASSIN VERSANT DE LA MEURTHE A FRAIZE   D'APRES LA CARTE AU 1/ 50000.

AVEC UN POINT TOUS LES .25 KM2

SURFACE EN KM2:	66.8
PERIMETRE EN KM:	42.8
COEFFICIENT DE COMPACITE:	1.467
LONGUEUR EN KM:	17.6
LARGEUR EN KM:	3.8
INDICE DE PENTE DE ROCHE:	.20978
INDICE DE PENTE GLOBAL:	.0[illegible]691
PENTE MOYENNE:	.21747
PENTE MEDIANE:	.20035
[illegible] EN M:	850.0
NOMBRE DE POINTS INTERIEURS:	268

COORDONNEES DU CENTRE DE GRAVITE: X= [illegible] Y= 18.4
DISTANCE DE L'EXUTOIRE AU CENTRE DE GRAVITE: 6.2 KM

B - SORTIE TYPE DU PROGRAMME ENTRE PENTE MESUREE ET PENTE CALCULEE

X ET Y SONT LES PENTES CALCULEES ET MESUREES EN UN MEME POINT

PENTES CALCULEES:

.212	.372	.335	.136	.379	.187	.393	.242	.356	.113
.127	.471	.354	.202	.162	.155	.394	.458	.526	.245
.116	.145	.143	.095	.326	.347	.375	.135	.267	.258
.146	[illegible]	.414	.270	.144	.153	.353	.179	.269	.156
.176	.142	.303	.242	.104	.320	.395	.200	.225	.139
.227	.147	.213	.191	.397	.255	.354	.033	.142	.142
.156	.252	.335	.318	.040	.041	.250	.151		

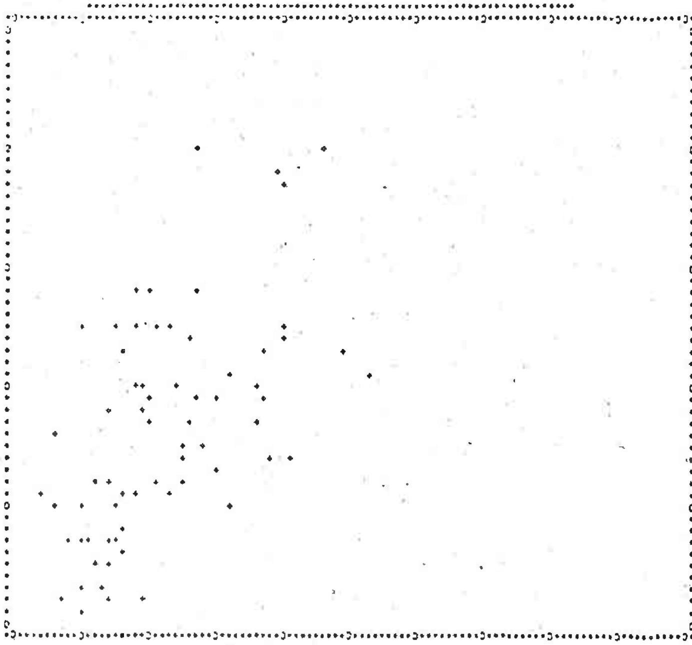
PENTES MESUREES:

.303	.433	.741	.133	.340	.370	.195	.433	.400	.133
.267	.452	.333	.346	.154	.403	.769	.433	.426	.250
[illegible]	[illegible]	[illegible]	.200	.500	.367	.475	.336	.385	.333
[illegible]	[illegible]	.286	.800	.100	.475	.343	.556	.556	.222
.222	[illegible]	.254	.333	.500	.254	.133	.536	.222	.250
.500	.200	.250	.250	.333	.475	.285	.313	.357	.336
.121	.274	.333	.417	.222	.133	.294	.400		

CORRELATION ENTRE X ET Y

MOYENNE DES X	ECART-TYPE DES X	MOYENNE DES Y	ECART-TYPE DES Y
XM= .2220E+00	SM= .1134E+00	YM= .3292E+00	SY= .1553E+00

EFFECTIF COMMUN:N= 68	COEFFICIENT DE CORRELATION .553
REGRESSION DE Y EN X : Y=AX+B	REGRESSION DE X EN Y : X=AY+B
A= .909E+00 B= .129E+00	A= .339E+00 B= .111E+00
ERREUR-TYPE SUR L'ESTIMATION DE Y A PARTIR DE X : SYX= .134E+00	ERREUR-TYPE SUR L'ESTIMATION DE X A PARTIR DE Y : SXY= .945E-01



XMIN= .0000E 00 XMAX= .1000E 01
YMIN= .0000E 00 YMAX= .1000E 01

* :UN POINT
* :PLUSIEURS POINTS

UNE COLONNE CORRESPOND A [illegible] UNITES
UNE LIGNE CORRESPOND A [illegible] UNITES

LES [illegible] POINTS [illegible] LE GRAPHE

[illegible]

PENTES CALCULEES:

.040	.035	.035	.074	.041	.095	.097	.077	.099	.104
.110	.116	.121	.127	.136	.139	.142	.142	.144	.143
.146	.147	.154	.156	.162	.162	.163	.174	.179	.191
.193	.195	.195	.197	.195	.200	.202	.212	.213	.225
.227	.242	.243	.250	.252	.253	.253	.257	.269	.273
.282	.300	.301	.318	.320	.335	.353	.355	.372	.384
.374	.375	.375	.396	.414	.458	.491	.526		

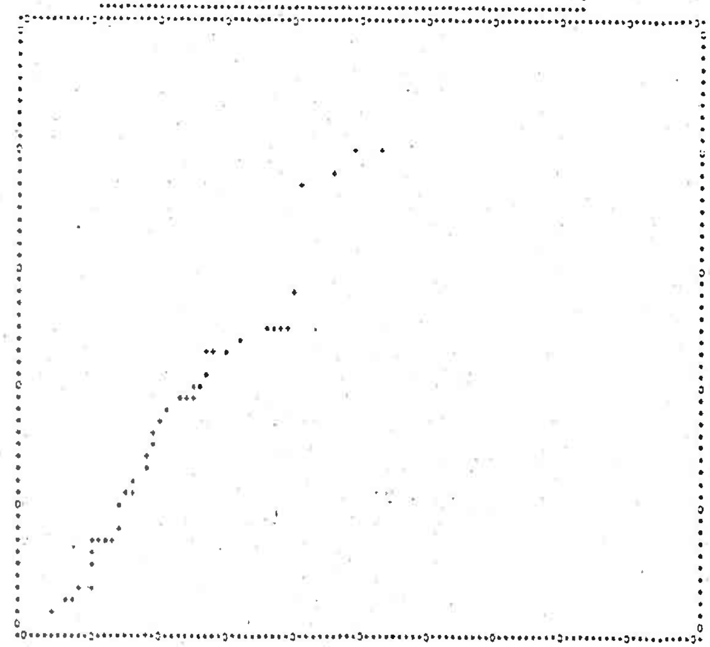
PENTES MESUREES:

.030	.036	.036	.040	.067	.067	.091	.100	.121	.133
.143	.143	.133	.143	.134	.175	.200	.200	.204	.222
.222	.222	.222	.250	.250	.250	.250	.263	.278	.286
.286	.286	.333	.313	.333	.333	.333	.357	.370	.383
.385	.385	.385	.400	.400	.400	.400	.417	.426	.455
.455	.455	.455	.476	.475	.500	.500	.500	.500	.500
.500	.536	.556	.556	.741	.769	.800	.800		

CORRELATION ENTRE X ET Y

MOYENNE DES X	ECART-TYPE DES X	MOYENNE DES Y	ECART-TYPE DES Y
XM= .2220E+00	SM= .1134E+00	YM= .3292E+00	SY= .1853E+00

EFFECTIF COMMUN:N= 68	COEFFICIENT DE CORRELATION .954
REGRESSION DE Y EN X : Y=AX+B	REGRESSION DE X EN Y : X=AY+B
A= .157E+01 B= -.203E-01	A= .599E+00 B= .278E-01
ERREUR-TYPE SUR L'ESTIMATION DE Y A PARTIR DE X : SYX= .495E-01	ERREUR-TYPE SUR L'ESTIMATION DE X A PARTIR DE Y : SXY= .303E-01



XMIN= .0000E 00 XMAX= .1000E 01
YMIN= .0000E 00 YMAX= .1000E 01

* :UN POINT
* :PLUSIEURS POINTS

UNE COLONNE CORRESPOND A .1000E-01 UNITES
UNE LIGNE CORRESPOND A [illegible] UNITES

LES 68 POINTS SONT FIGURES SUR LE GRAPHE

X ET Y SONT LES LOG. DE PENTES CALCULEES ET MESUREES APRES CLASSEMENT

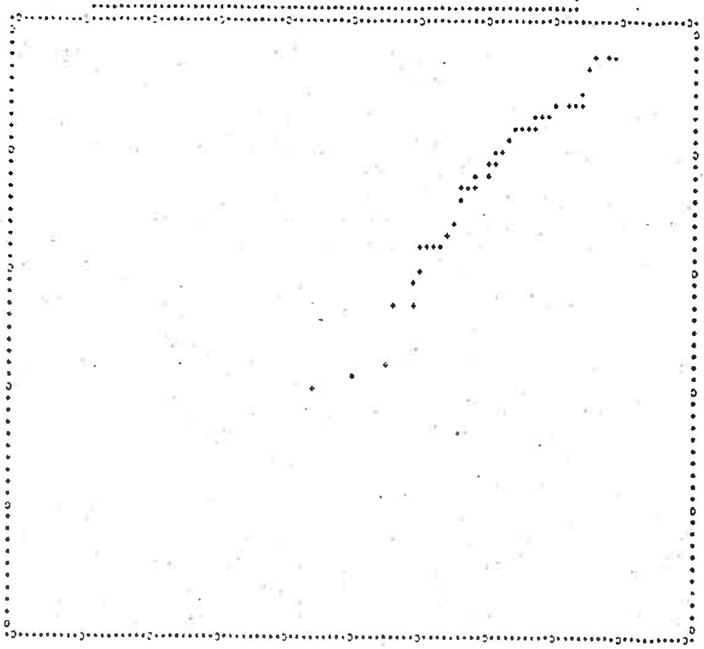
PENTES CALCULEES:

-1.348	-1.263	-1.260	-1.131	-1.079	-1.022	-1.013	-1.004	-1.004	-.983
-.919	-.934	-.917	-.894	-.865	-.857	-.845	-.848	-.842	-.839
-.836	-.833	-.807	-.797	-.795	-.790	-.748	-.754	-.747	-.742
-.738	-.733	-.733	-.728	-.710	-.619	-.695	-.674	-.672	-.648
-.644	-.616	-.611	-.602	-.593	-.593	-.588	-.573	-.570	-.569
-.550	-.523	-.521	-.494	-.475	-.449	-.445	-.438	-.429	-.416
-.415	-.403	-.403	-.402	-.383	-.339	-.309	-.279		

PENTES MESUREES:

-1.523	-1.444	-1.444	-1.335	-1.174	-1.174	-1.041	-1.000	-.917	-.876
-.876	-.876	-.876	-.845	-.812	-.710	-.699	-.699	-.690	-.634
-.654	-.654	-.634	-.602	-.602	-.602	-.602	-.560	-.556	-.544
-.544	-.532	-.519	-.514	-.478	-.478	-.478	-.447	-.432	-.415
-.415	-.415	-.413	-.398	-.398	-.398	-.395	-.380	-.371	-.342
-.342	-.342	-.342	-.322	-.322	-.301	-.301	-.301	-.301	-.301
-.301	-.255	-.255	-.255	-.130	-.114	-.097	-.097		

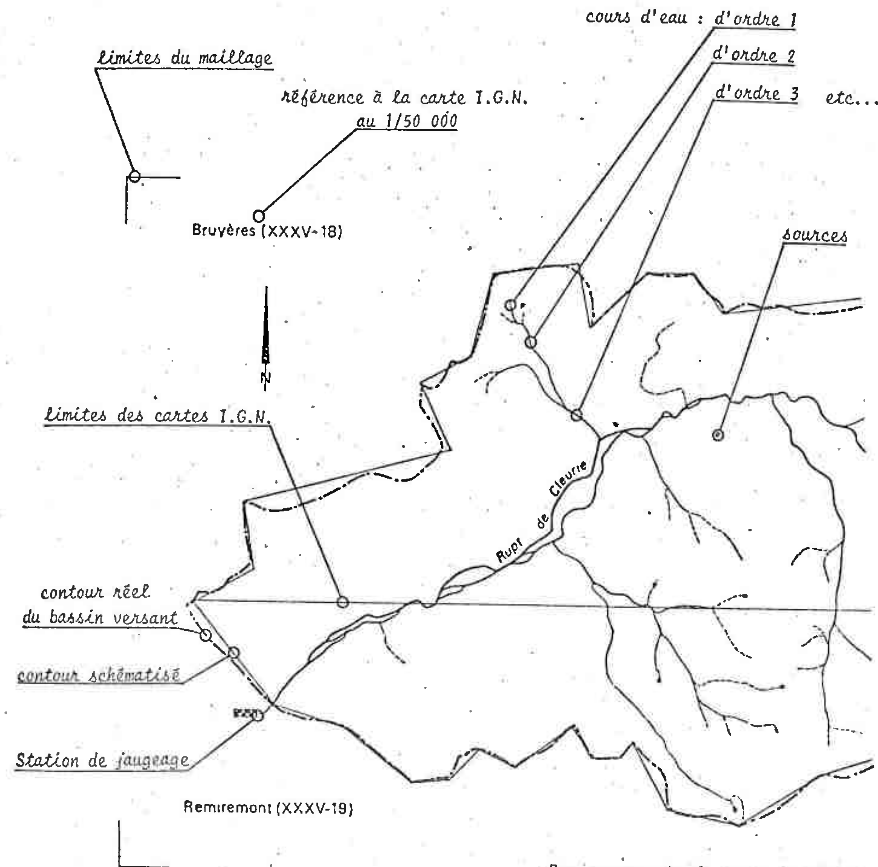
CORRELATION ENTRE X ET Y			
MOYENNE DES X	ECART-TYPE DES X	MOYENNE DES Y	ECART-TYPE DES Y
XM= -.7140E+00	SX= .2410E+00	YM= -.5756E+00	SY= .3231E+00
EFFECTIF COMMUN:N= 68		COEFFICIENT DE CORRELATION .956	
REGRESSION DE Y EN X : Y=AX+B		REGRESSION DE X EN Y : X=AY+B	
A= .1300E+01 B= .355E+00		A= .7000E+00 B= -.310E+00	
ERREUR-TYPE SUR L'ESTIMATION DE Y A PARTIR DE X : SYX= .965E-01		ERREUR-TYPE SUR L'ESTIMATION DE X A PARTIR DE Y : SXY= .709E-01	



XMIN= -.2500E 01 XMAX= .0000E 00
YMIN= -.2500E 01 YMAX= .0000E 00

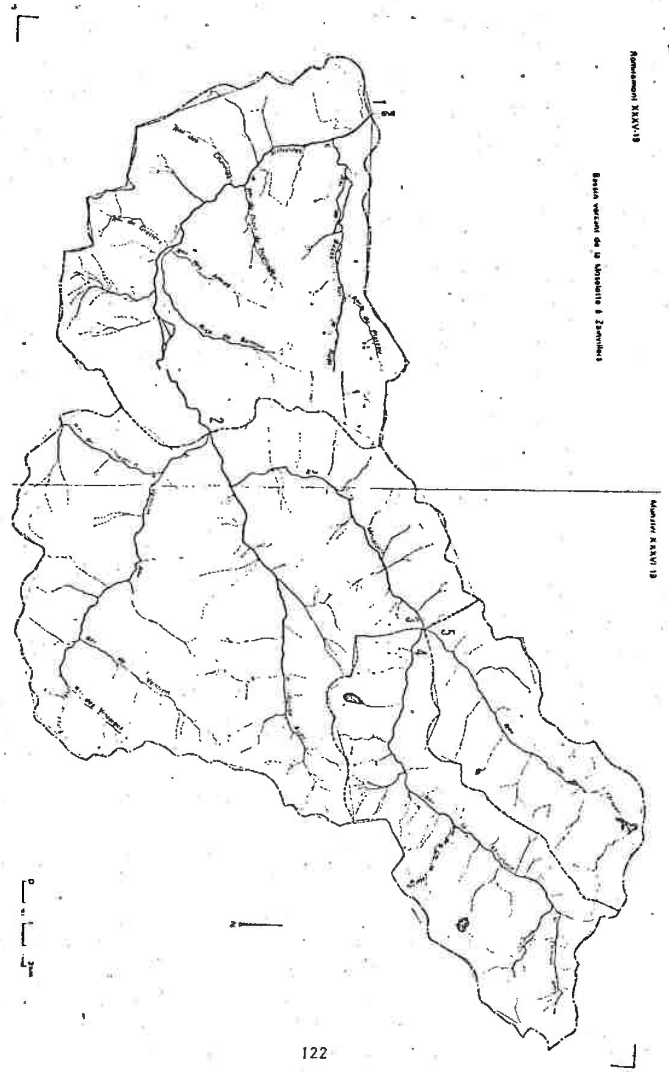
* :UN POINT
* :PLUSIEURS POINTS

C - LEGENDE DES CARTES HYDROLOGIQUES



Bassin versant du R^{au} de Cleurie à Cleurie

D - LA MOSELOTTE À ZAINVILLERS ET SES BASSINS VERSANTS AMONTS



LA MOSELOTTE À ZAINVILLERS

Géométrie plane

- surface en km² 185,7
- périmètre en km 71
- coefficient de compacité 1,458
- longueur en km 29,1
- largeur en km 6,4
- nombre de points intérieurs 746

Altitudes

- altitude maximale en m 1382
- altitude minimale en m 405
- intervalle de variation en m 977
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 632
- écart-type des altitudes en m 199,7

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — bon

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,21372
- écart-type calculé σ_P 0,1011
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,65\ P_{calculée} - 0,0524$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,3002
- écart-type restitué σ_P 0,1762

• Ajustement à une loi de GALTON — médiocre

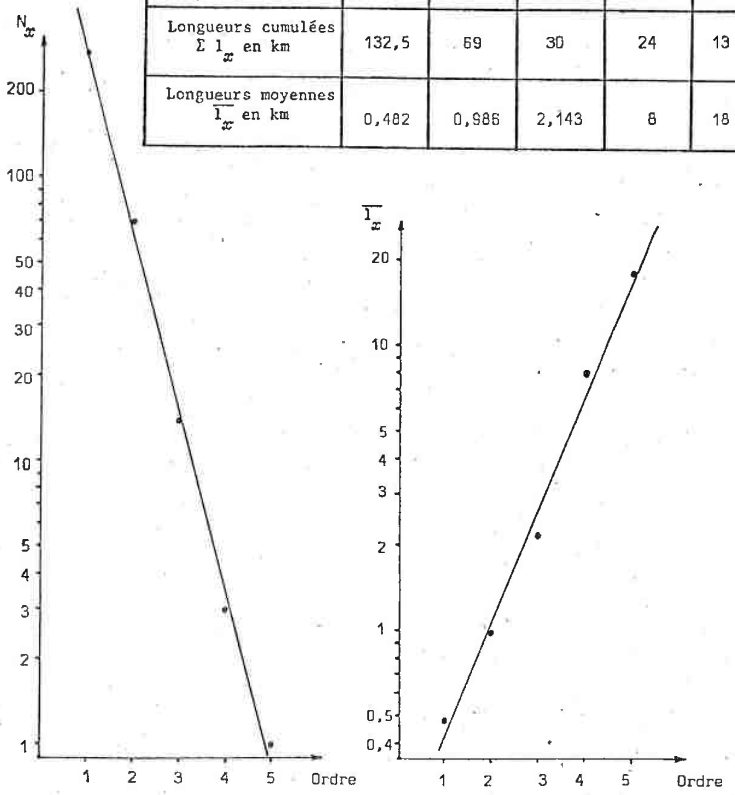
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,7436
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2735
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,42 \log P_{calculée} + 0,404$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,6520
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4498

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,16818
- indice de pente global 0,02172
- dénivelée spécifique en m 296

LA MOSELOTTE À ZAINVILLERS : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	275	70	14	3	1	363
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	132,5	69	30	24	13	268,5
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,482	0,986	2,143	8	18	0,740

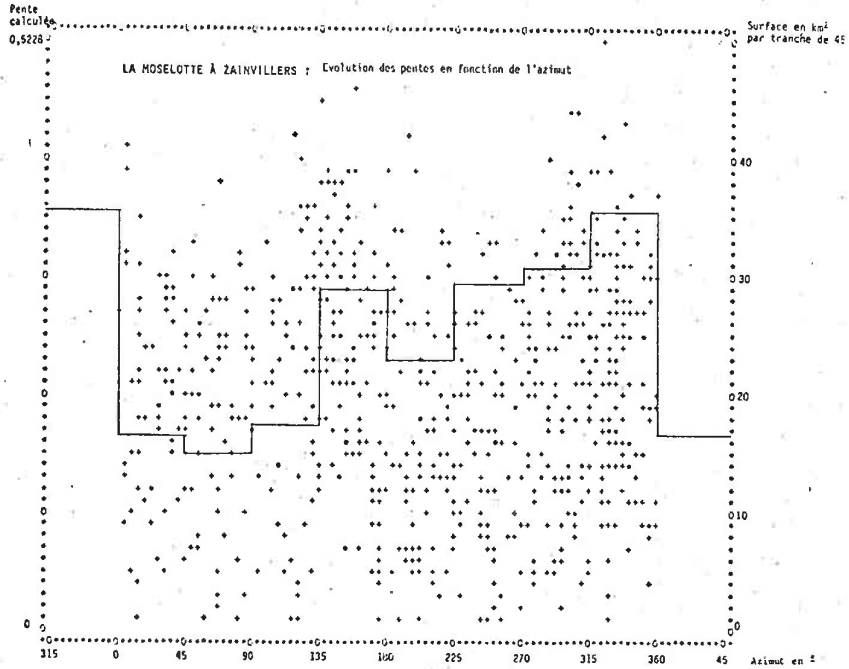


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1{,}481\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1{,}446\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 4{,}3$

Rapport des longueurs : $R_l = 2{,}5$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur .....

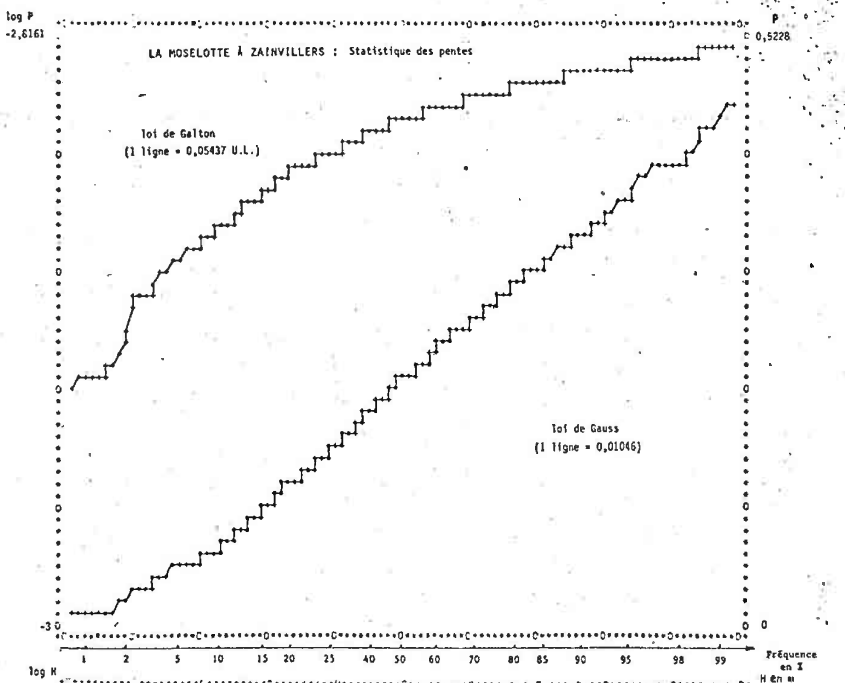
Muschelkalk moyen et inférieur .....

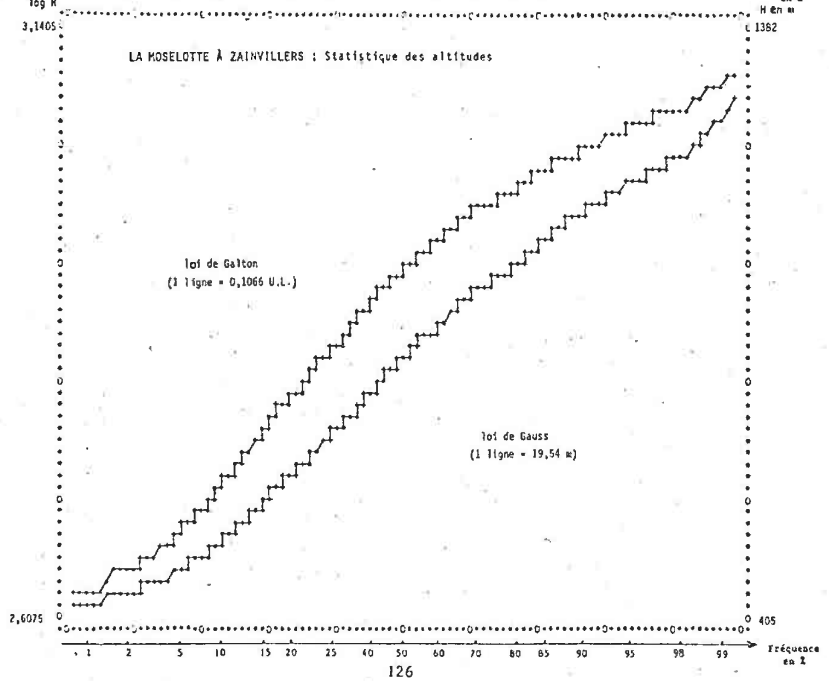
Buntsandstein et Permien .....

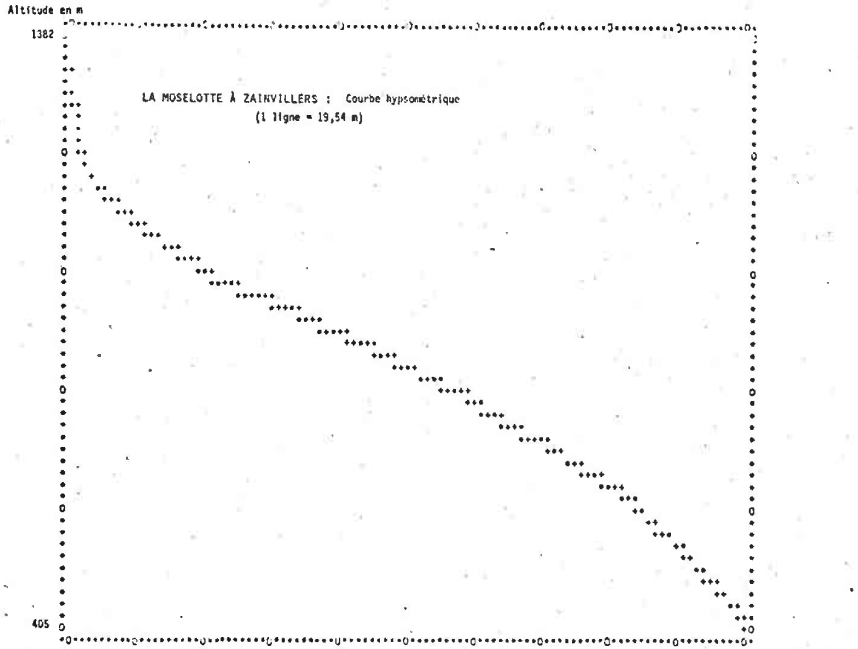
Socle cristallin et cristallophyllien ..... 100 %

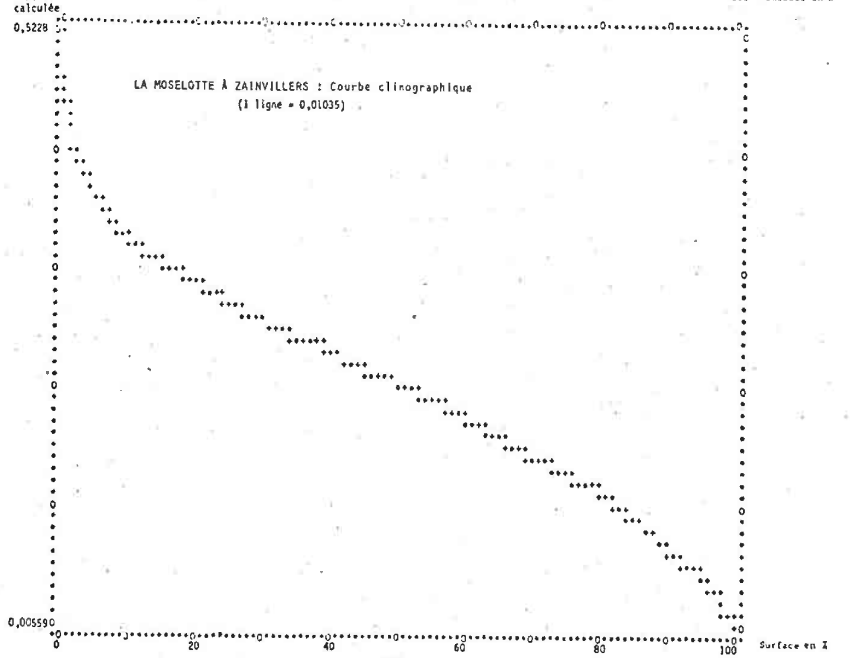
Indice de perméabilité ..... 0 %

Indice de dureté ..... 100 %


log P
-2,6161
P
0,5228
LA MOSELOTTE À ZAINVILLERS : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,05437 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,01046)
-3
0
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
3,1405
H en m
1382
LA MOSELOTTE À ZAINVILLERS : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,1066 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 19,54 m)
2,6075
405
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
1382
LA MOSELOTTE À ZAINVILLERS : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 19,54 m)
405
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,5228
LA MOSELOTTE À ZAINVILLERS : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,01035)
0,0055900
0 20 40 60 80 100
Surface en %

LA MOSELOTTE AU DAVAL (AVAL)

Géométrie plane

- surface en km² 125,7
- périmètre en km 53,0
- coefficient de compacité 1,324
- longueur en km 20,3
- largeur en km 6,2
- nombre de points intérieurs 504

Altitudes

- altitude maximale en m 1382
- altitude minimale en m 490
- intervalle de variation en m 892
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 540
- écart-type des altitudes en m 169,7

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — bon

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,22333
- écart-type calculé σ_P 0,1042
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,67\ P_{calculée} - 0,0425$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,3305
- écart-type restitué σ_P 0,1774

. Ajustement à une loi de GALTON — médiocre

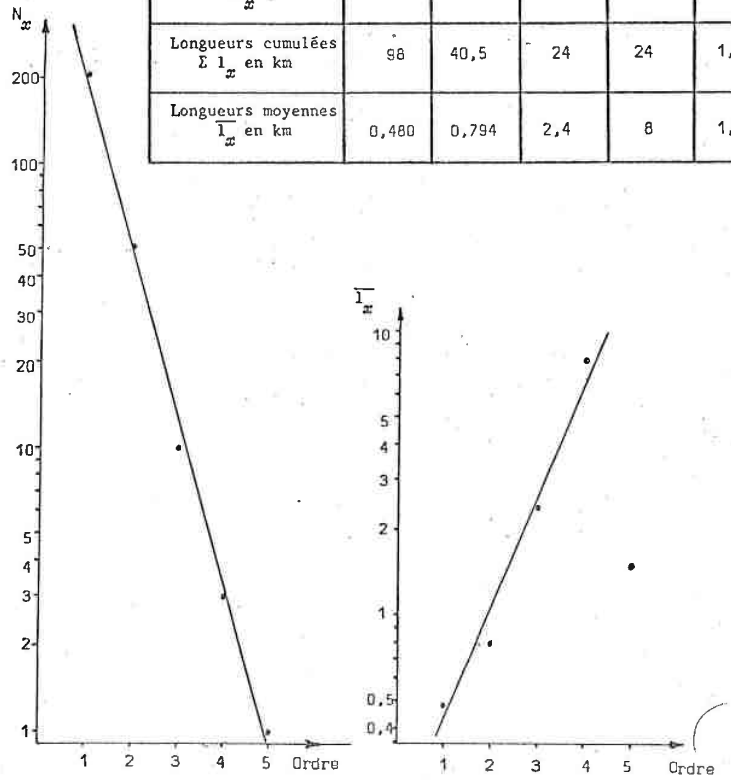
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,6965
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2484
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,21 \log P_{calculée} + 0,291$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,5518
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3612

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,19018
- indice de pente global 0,02656
- dénivelée spécifique en m 297,8

LA MOSELOTTE AU DAVAL (AVAL) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	204	51	10	3	1	269
Longueurs cumulées $\Sigma\ l_x$ en km	98	40,5	24	24	1,5	188
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,480	0,794	2,4	8	1,5	0,699

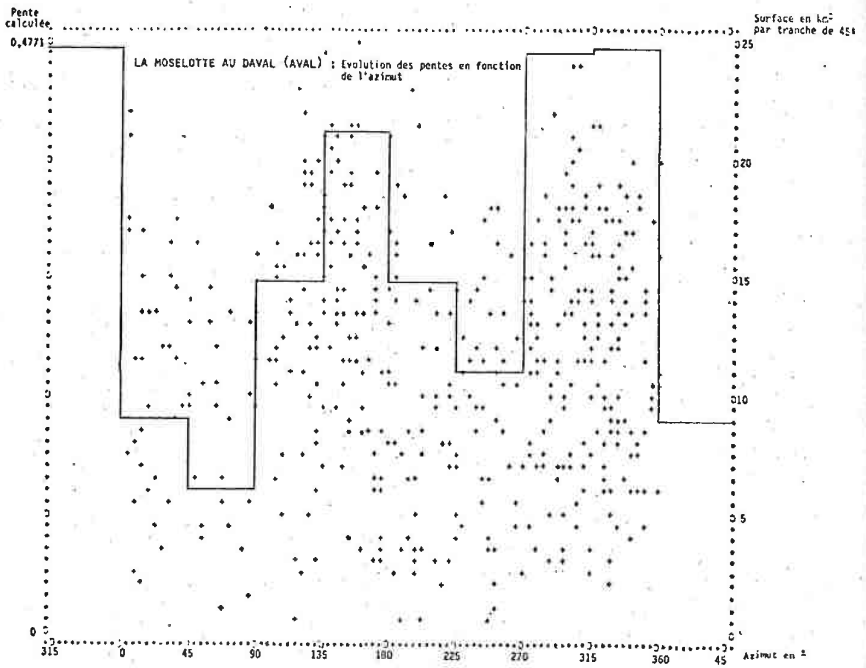


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,623\ km^{-2}$

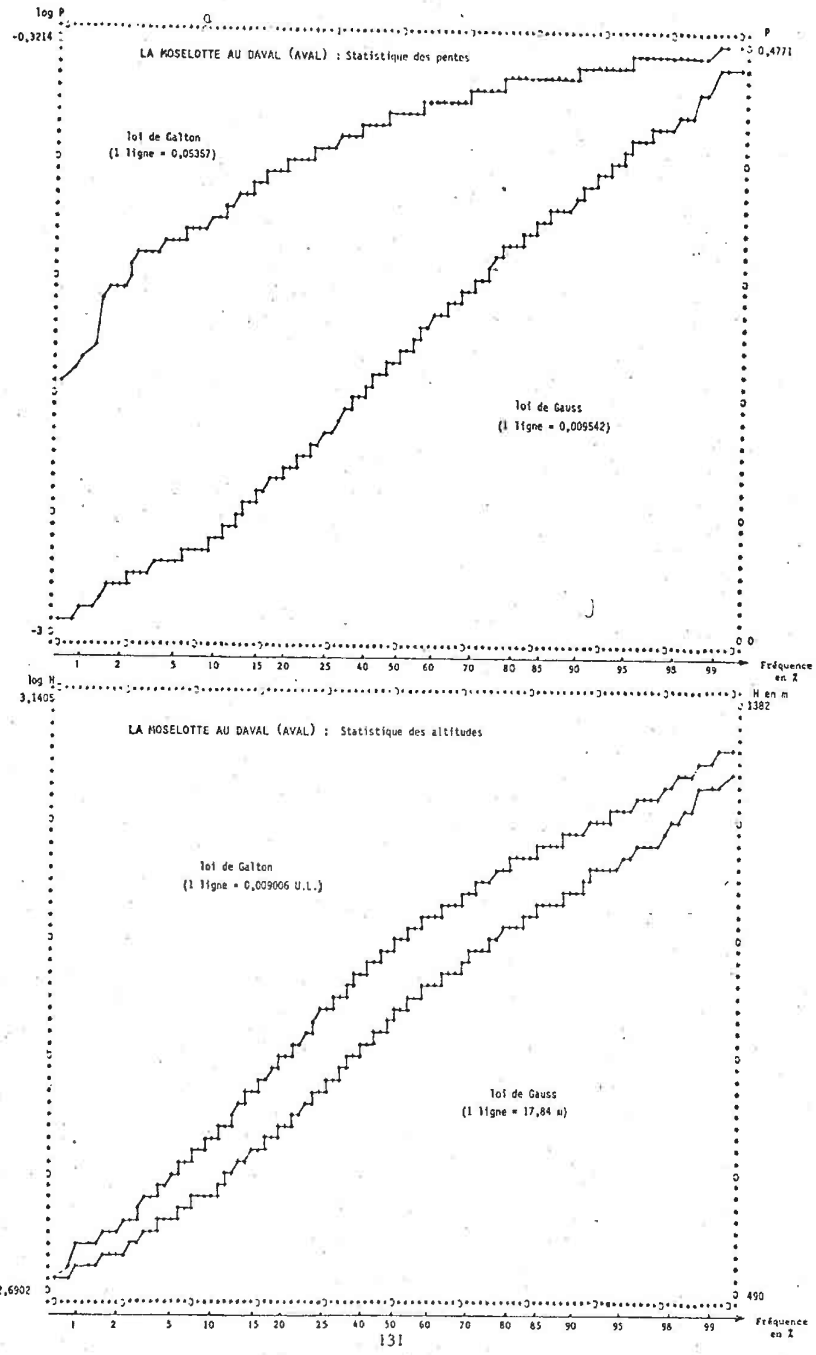
Densité de drainage : $D_d = 1,496\ km^{-1}$

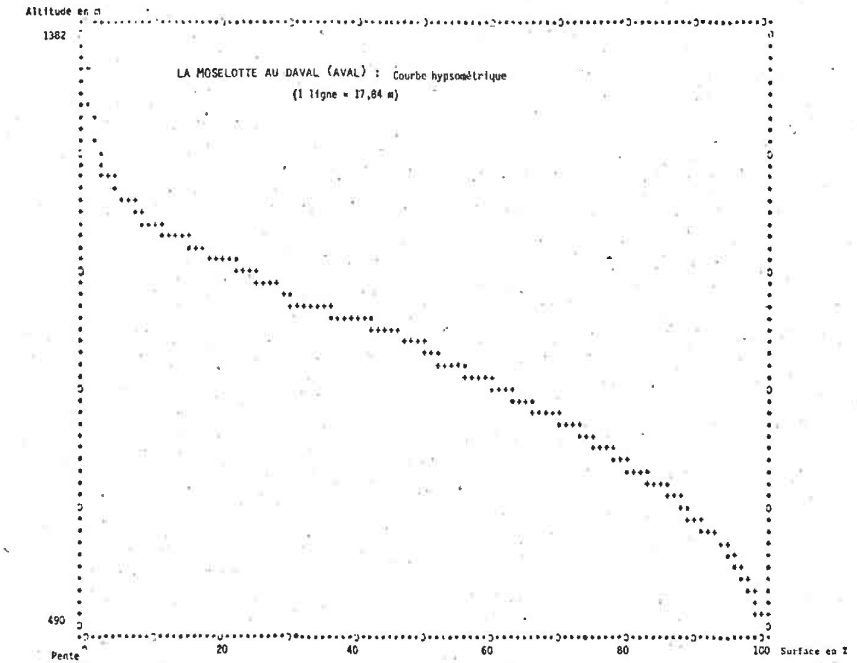
Rapport de confluence : $R_c = 3,9$

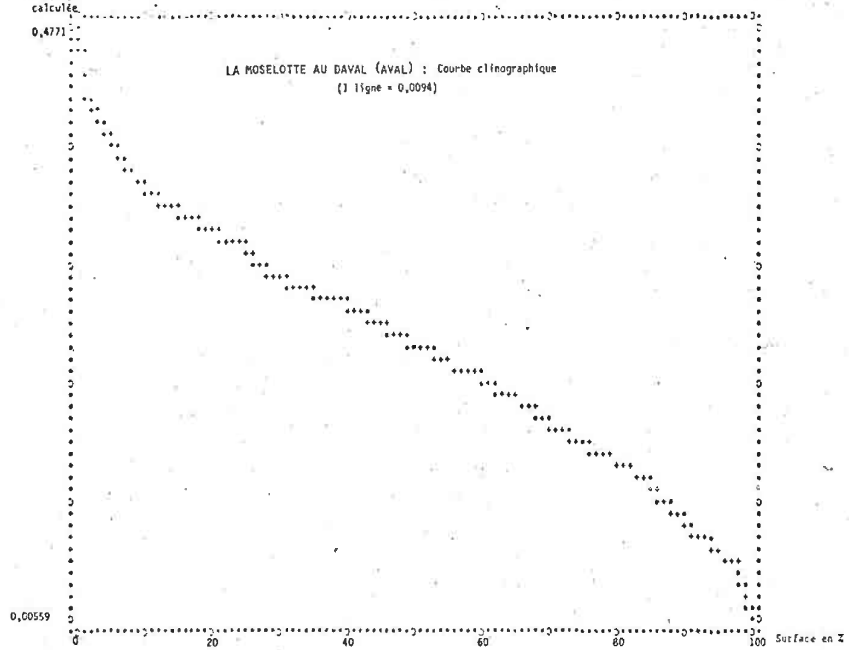
Rapport des longueurs : $R_l = 2,4$



Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	100%
Indice de perméabilité	0 %
Indice de dureté	100 %







LA MOSELOTTE À LA BRESSE (AVAL)

Géométrie plane

- surface en km² 47,9
- périmètre en km 30,3
- coefficient de compacité 1,225
- longueur en km 10,6
- largeur en km 4,5
- nombre de points intérieurs 195

Altitudes

- altitude maximale en m 1382
- altitude minimale en m 645
- intervalle de variation en m 737
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 475
- écart-type des altitudes en m 148,3

Pentes mesurées et pentes calculées

- Ajustement à une loi de GAUSS — bon
  - moyenne calculée $\overline{P}$ 0,22125
  - écart-type calculé σ_P 0,1162
  - droite de régression ..... $P_{réel} = 1,76\ P_{calculée} - 0,041$
  - moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,3484
  - écart-type restitué σ_P 0,1980

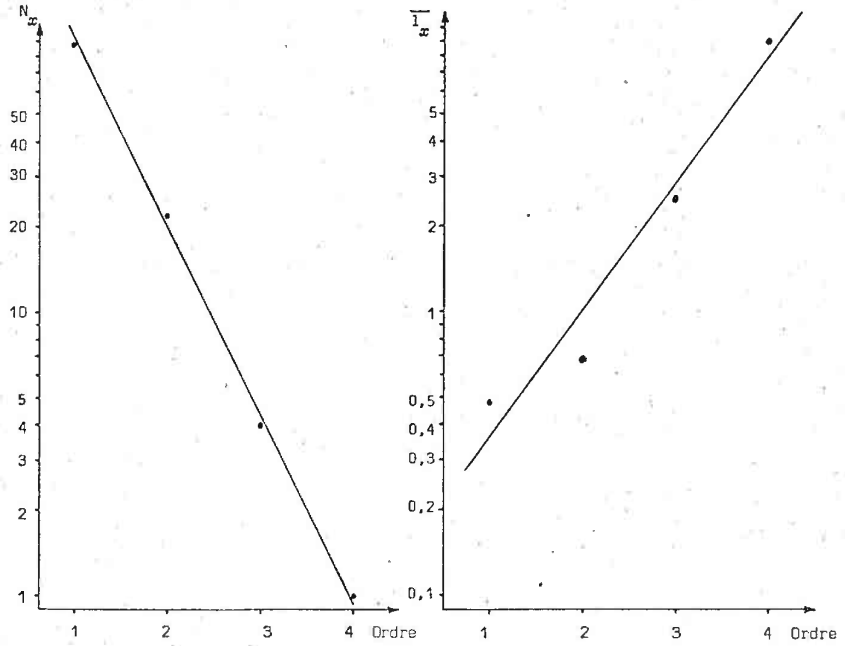
- Ajustement à une loi de GALTON — médiocre
  - moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,6965
  - écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2653
  - droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,34 \log P_{calculée} + 0,4$
  - moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,5333
  - écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3578

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,23845
- indice de pente global 0,04467
- dénivelée spécifique en m 309

LA MOSELOTTE À LA BRESSE (AVAL) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	89	22	4	1	116
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	42,5	15	10	9	76,5
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,478	0,682	2,5	9	0,659

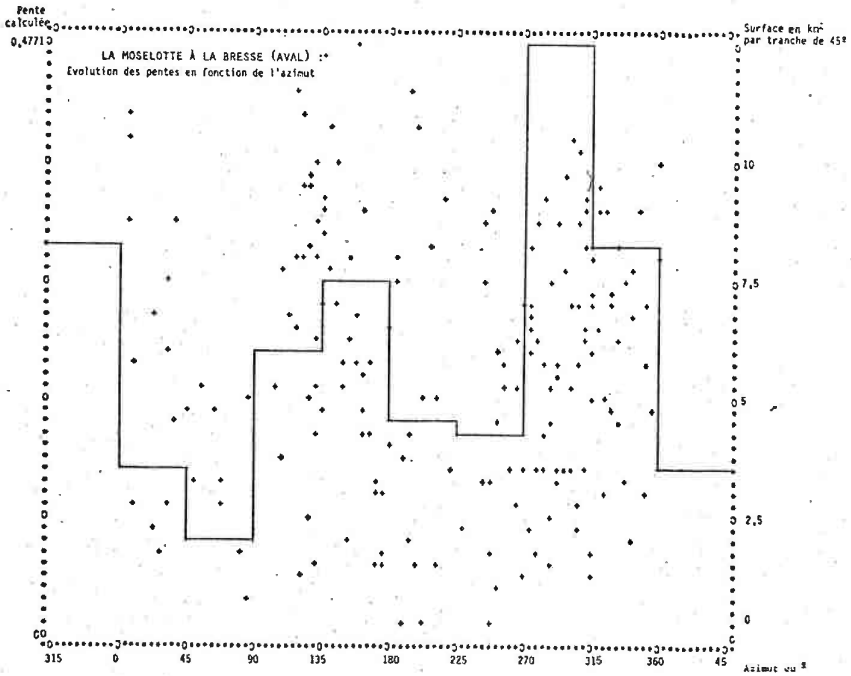


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,858\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1,597\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 4,6$

Rapport des longueurs : $R_l = 2,8$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur .....

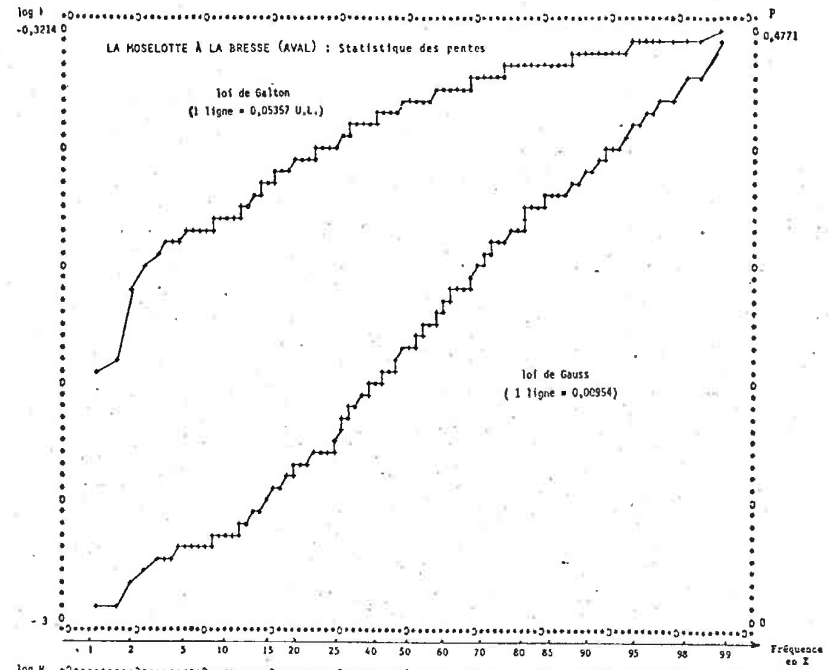
Muschelkalk moyen et inférieur .....

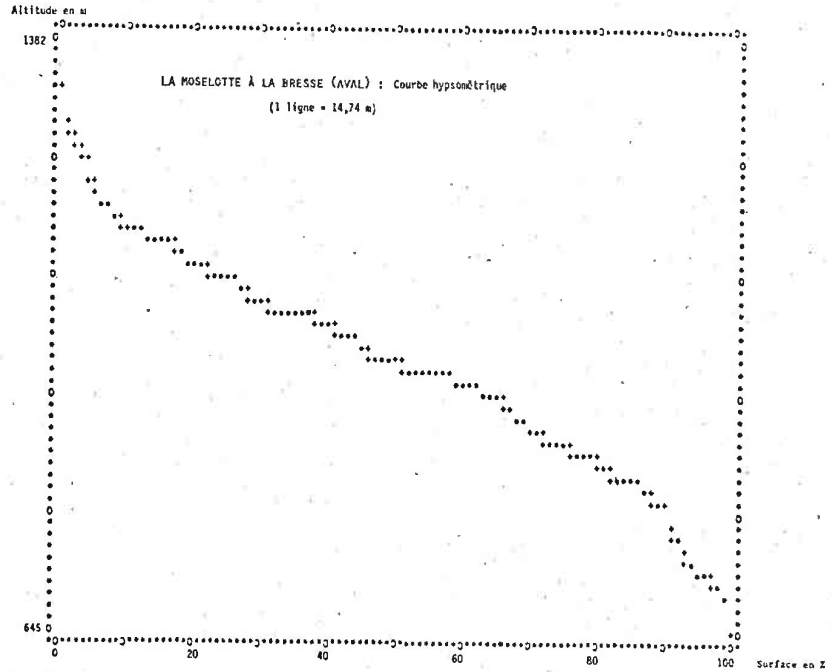
Buntsandstein et Permien .....

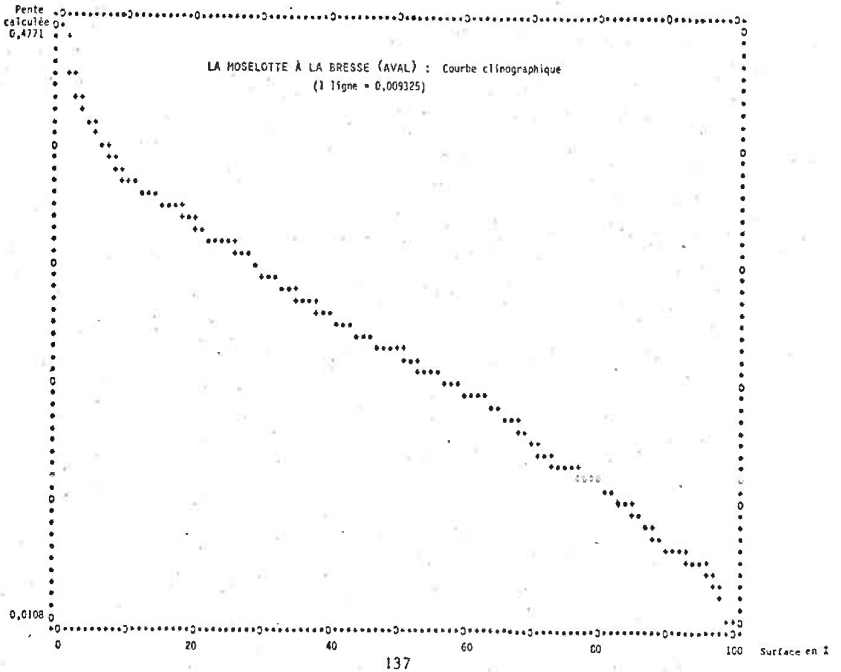
Socle cristallin et cristallophyllien ..... 100 %

Indice de perméabilité ..... 0 %

Indice de dureté ..... 100 %


log P
-0,3214
P
0,4771
LA MOSELOTTE À LA BRESSE (AVAL) : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,05357 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,00954)
- 3
0
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %
log H
3,1405
1362
LA MOSELOTTE À LA BRESSE (AVAL) : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne : 0,006619 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 14,74 m)
2,8095
645
Fréquence en %


Altitude en m
1382
LA MOSELOTTE À LA BRESSE (AVAL) : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 14,74 m)
645
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,4771
LA MOSELOTTE À LA BRESSE (AVAL) : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,009325)
0,0108
0 20 40 60 80 100
Surface en %

LA MOSELOTTE À LA BRESSE (AMONT)

Géométrie plane

- surface en km² 29,4
- périmètre en km 28,6
- coefficient de compacité 1,473
- longueur en km 11,8
- largeur en km 2,5
- nombre de points intérieurs 120

Altitudes

- altitude maximale en m 1382
- altitude minimale en m 645
- intervalle de variation en m 737
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 530
- écart-type des altitudes en m 150,6

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — bon

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,22252
- écart-type calculé σ_P 0,1177
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,8\ P_{calculée} - 0,0162$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,3823
- écart-type restitué σ_P 0,2238

• Ajustement à une loi de GALTON — médiocre

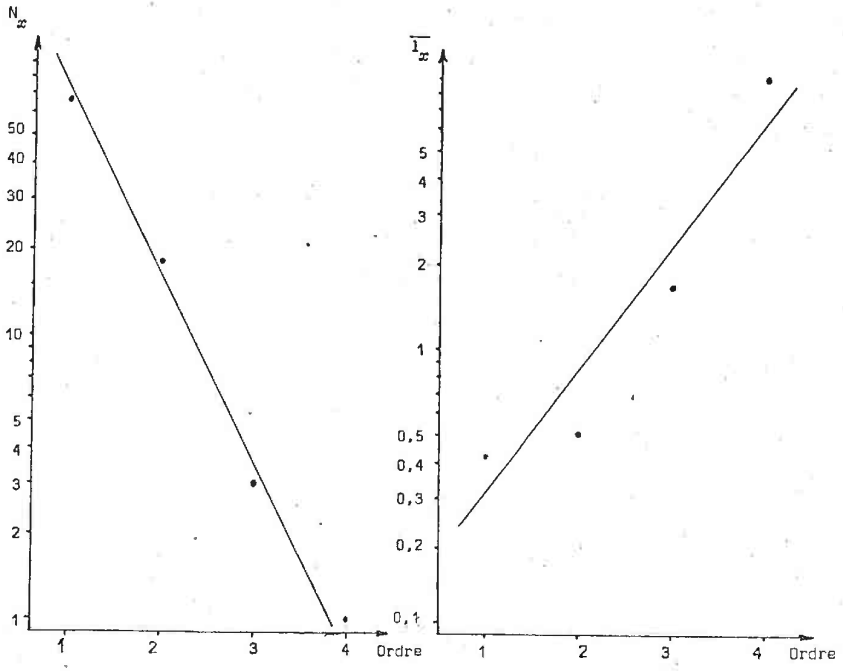
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,6965
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2905
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,44 \log P_{calculée} + 0,497$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,5059
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4167

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,22921
- indice de pente global 0,04501
- dénivelée spécifique en m 244

LA MOSELOTTE À LA BRESSE (AMONT) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	66	18	3	1	88
Longueurs cumulées Σl_x en km	27,5	9	5	9	50,5
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,417	0,5	1,667	9	0,574

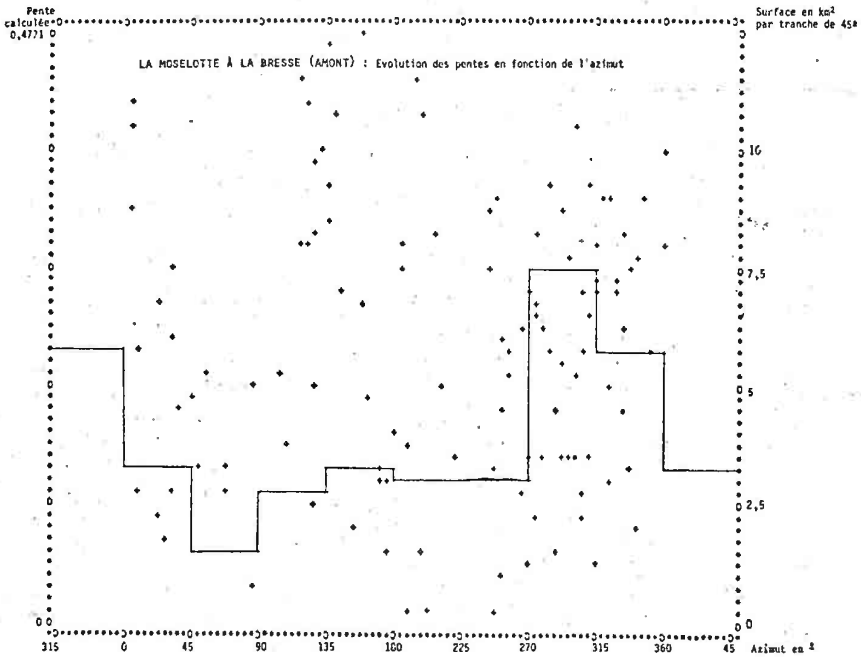


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 2,245\ km^{-2}$

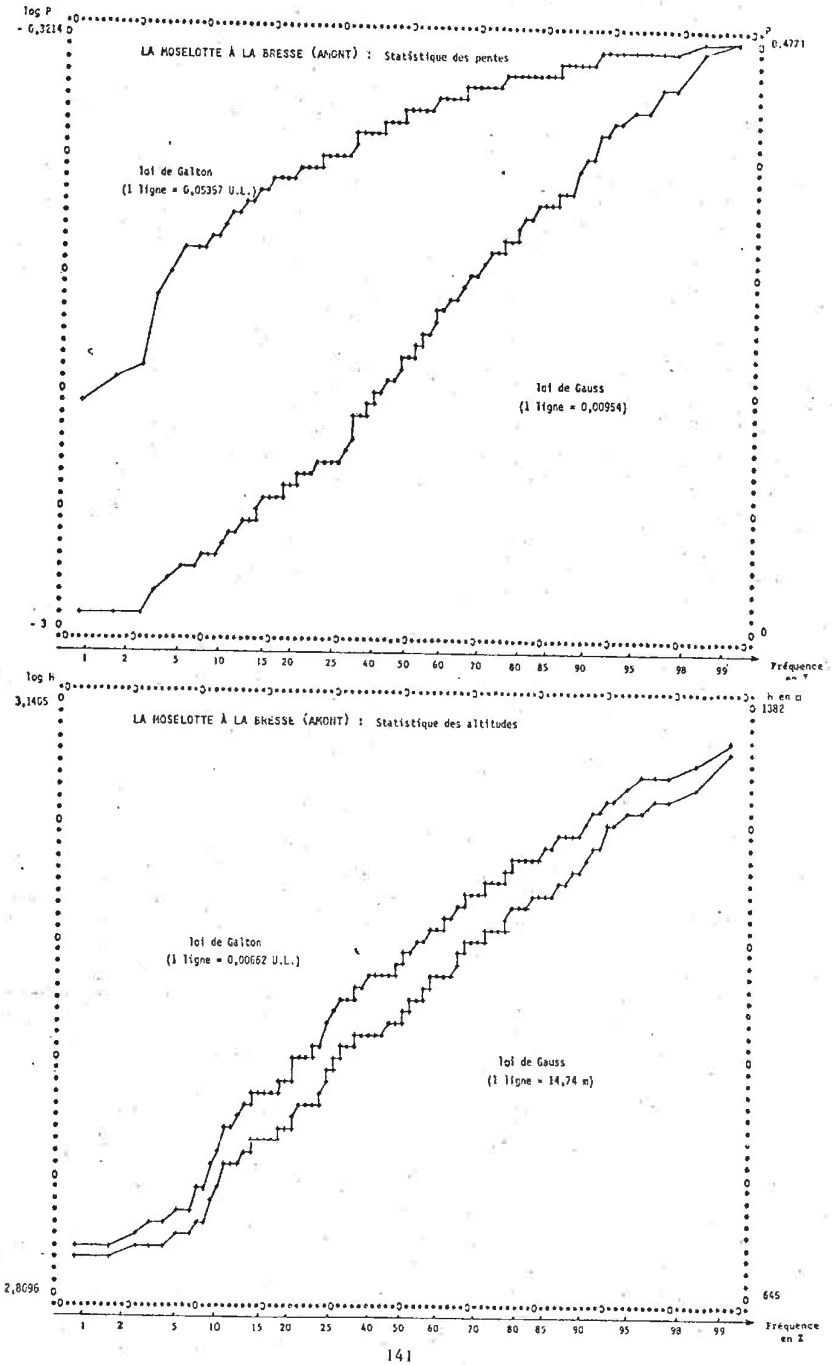
Densité de drainage : $D_d = 1,718\ km^{-1}$

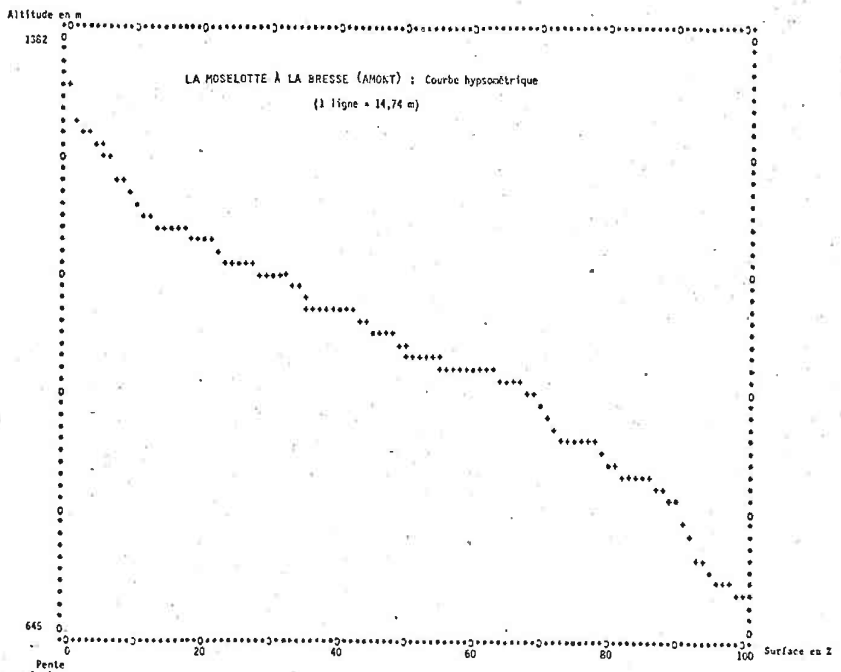
Rapport de confluence : $R_c = 4,5$

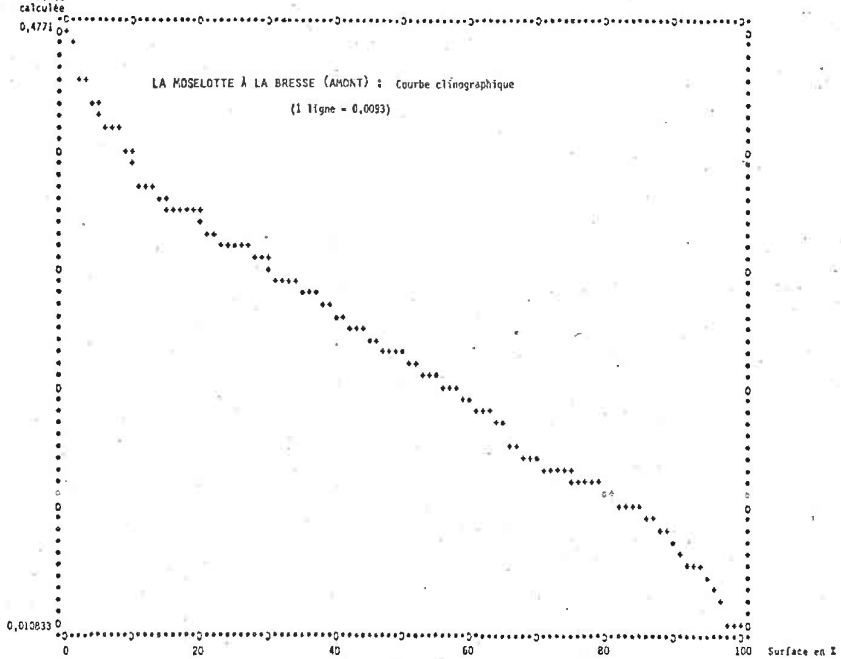
Rapport des longueurs : $R_l = 2,7$



Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	100 %
Indice de perméabilité	0 %
Indice de dureté	100 %







LE RUISSEAU DE CHAJOUX À LA BRESSE

Géométrie plane

- surface en km^2 18,5
- périmètre en km 20,5
- coefficient de compacité 1,336
- longueur en km 7,9
- largeur en km 2,3
- nombre de points intérieurs 74

Altitudes

- altitude maximale en m 1155
- altitude minimale en m 645
- intervalle de variation en m 510
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 385
- écart-type des altitudes en m 118,7

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — bon

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,22127
- écart-type calculé σ_P 0,1063
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,25\ P_{calculée} + 0,0139$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,2905
- écart-type restitué σ_P 0,1276

• Ajustement à une loi de GALTON — médiocre

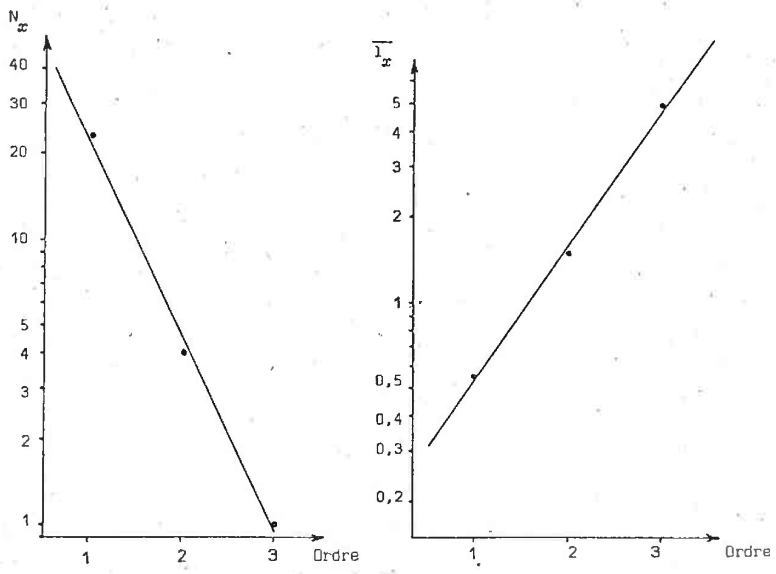
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,6909
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2325
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 0,88 \log P_{calculée} + 0,0398$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,5684
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,2115

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,23455
- indice de pente global 0,04857
- dénivelée spécifique en m 208,9

LE RUISSEAU DE CHAJOUX À LA BRESSE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau			TOTAL
	1	2	3	
Nombre N_x	23	4	1	28
Longueurs cumulées l_x en km	15	6	5	26
Longueurs moyennes $\Sigma \overline{l_x}$ en km	0,652	1,500	5,000	0,929

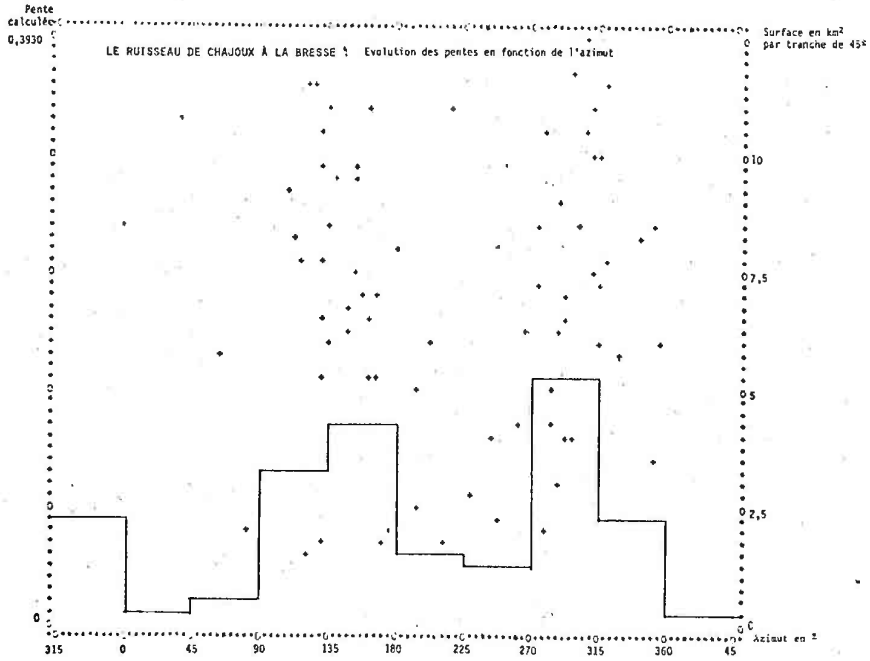


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,243\ km^{-2}$

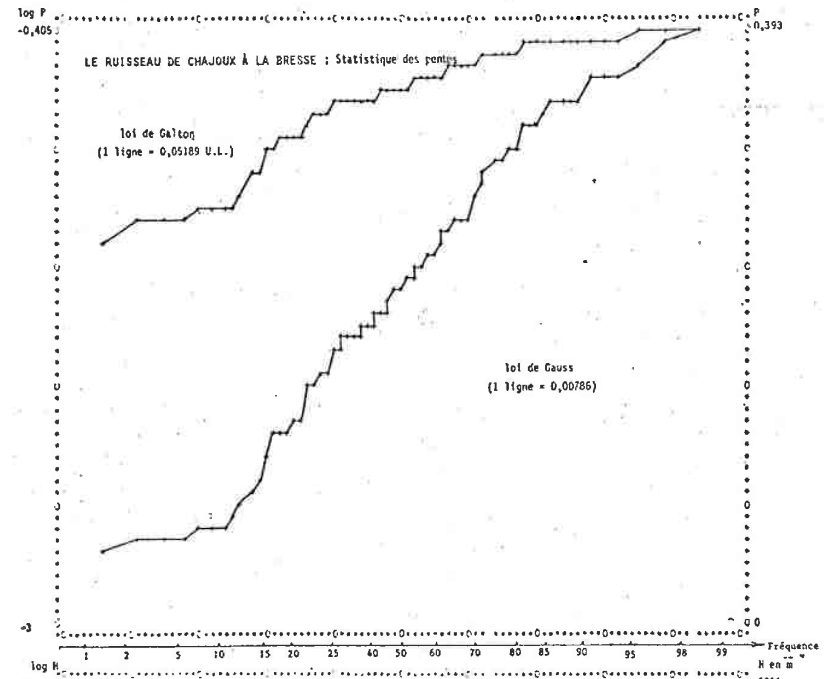
Densité de drainage : $D_d = 1,405\ km^{-1}$

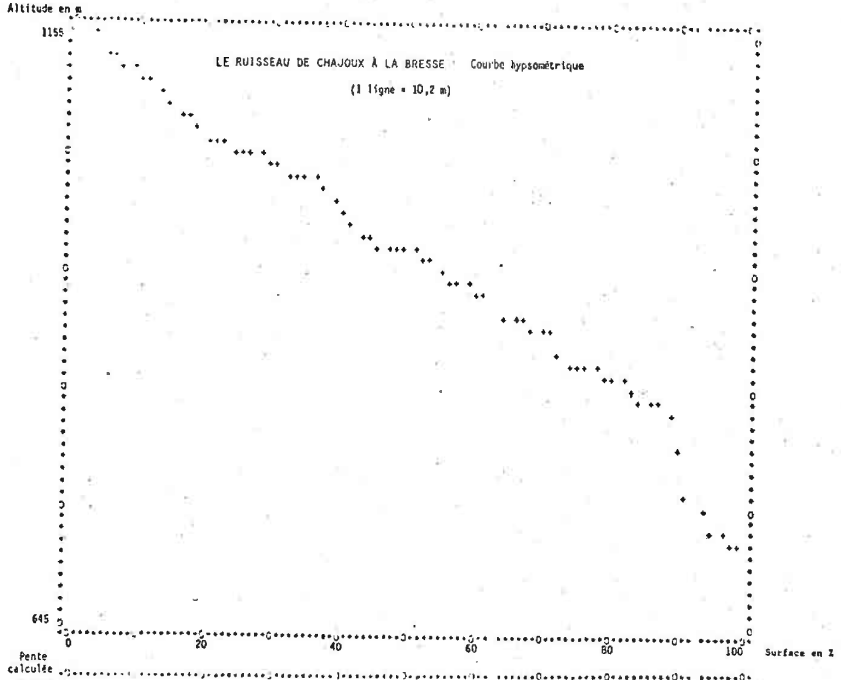
Rapport de confluence : $R_c = 4,9$

Rapport des longueurs : $R_l = 2,9$

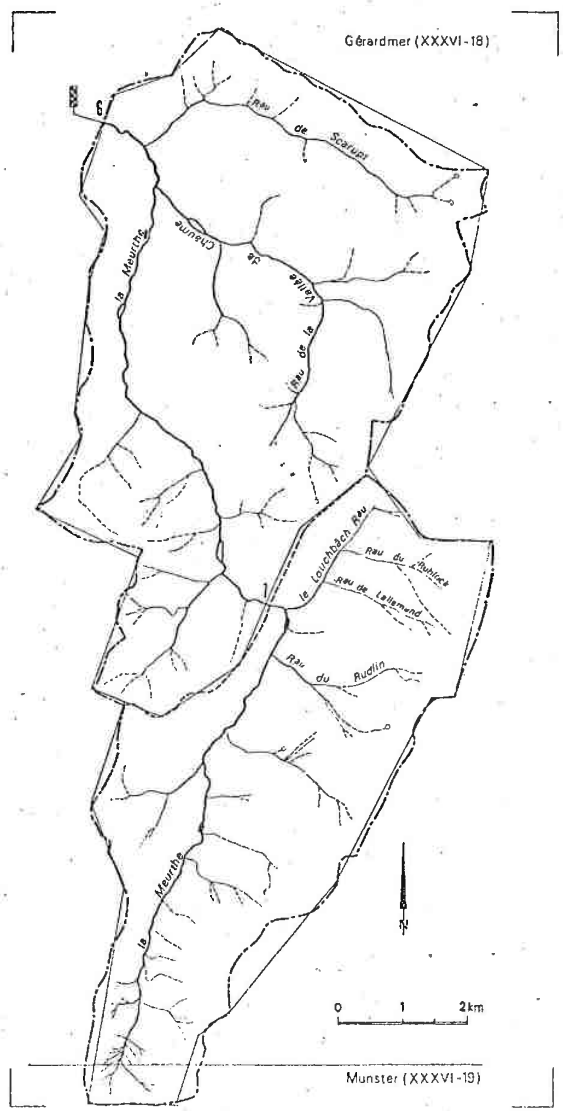


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	100 %
Indice de perméabilité	0 %
Indice de dureté	100 %


log P
-0,405
P
0,393
LE RUISSEAU DE CHAJOUX À LA BRESSE : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,05189 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,00786)
-3
0
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %
log H
3,0626
H en m
1206
LE RUISSEAU DE CHAJOUX À LA BRESSE : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,00506 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 10,2 m)
2,8096
696
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
1155
LE RUISSEAU DE CHAJOUX À LA BRESSE : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 10,2 m)
645
0 20 40 60 80 100
Surface en %
Pente calculée
0,3930
LE RUISSEAU DE CHAJOUX À LA BRESSE : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,00699)
0,04346
0 20 40 60 80 100
Surface en %

E - LA MEURTHE À FRAIZE ET SON BASSIN VERSANT



Bassin versant de la Meurthe à Fraize

LA MEURTHE À FRAIZE

Géométrie plane

- surface en km² 66,6
- périmètre en km 42,6
- coefficient de compacité 1,467
- longueur en km 17,6
- largeur en km 3,8
- nombre de points intérieurs 268

Altitudes

- altitude maximale en m 1310
- altitude minimale en m 500
- intervalle de variation en m 810
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 650
- écart-type des altitudes en m 198

Pentes mesurées et pentes calculées

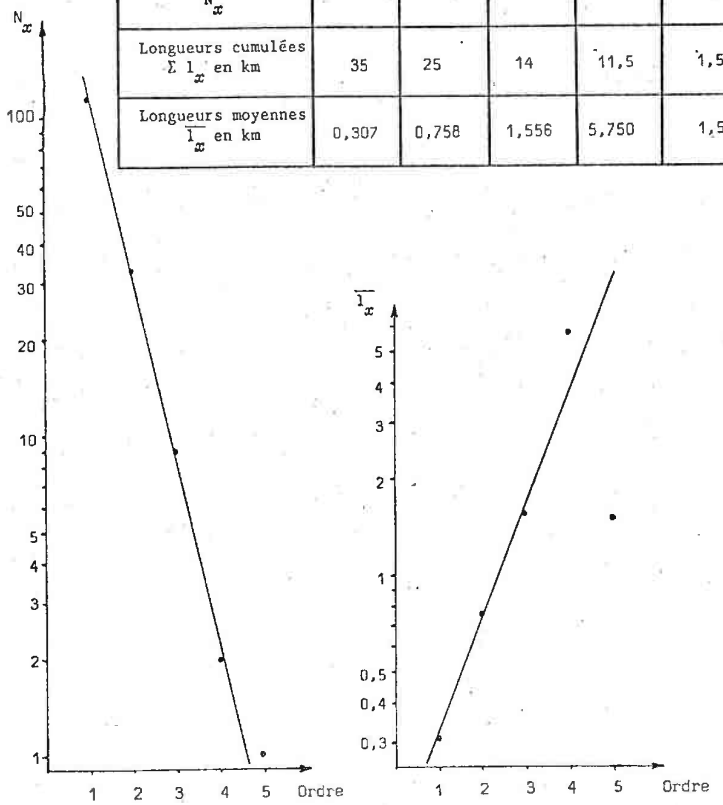
- Ajustement à une loi de GAUSS — Médiocre
  - moyenne calculée $\overline{P}$ 0,217
  - écart-type calculé σ_P 0,1146
  - droite de régression ..... $P_{réel} = 1,57\ P_{calculée} - 0,203$
  - moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,3204
  - écart-type restitué σ_P 0,1853
- Ajustement à une loi de GALTON — Bon
  - moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,741
  - écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,257
  - droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,30 \log P_{calculée} + 0,355$
  - moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,608
  - écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,329

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,210
- indice de pente global 0,0369
- dénivelée spécifique en m 302

LA MEURTHE À FRAIZE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	114	33	9	2	1	159
Longueurs cumulées Σl_x en km	35	25	14	11,5	1,5	87
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,307	0,758	1,556	5,750	1,5	0,547

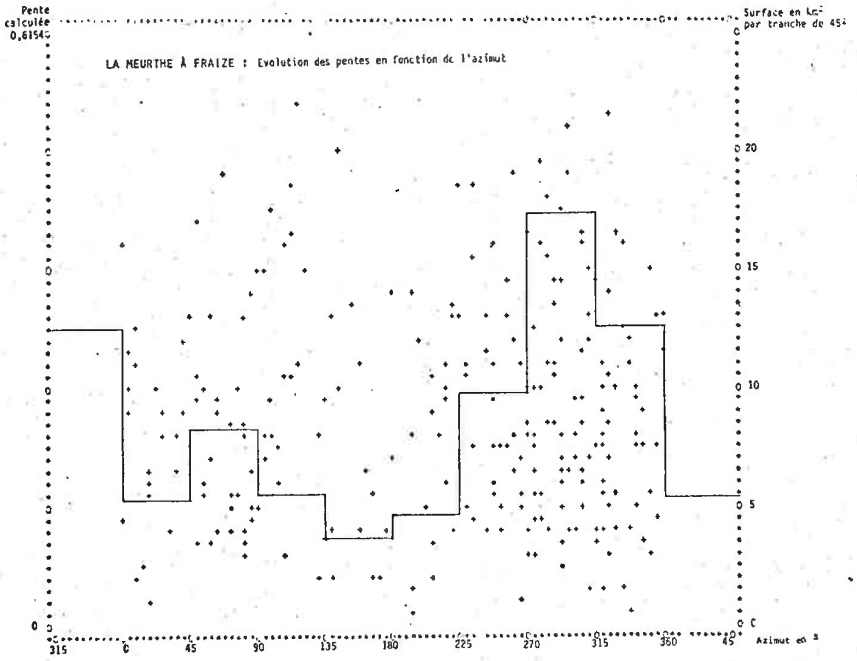


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,7\ km^{-2}$

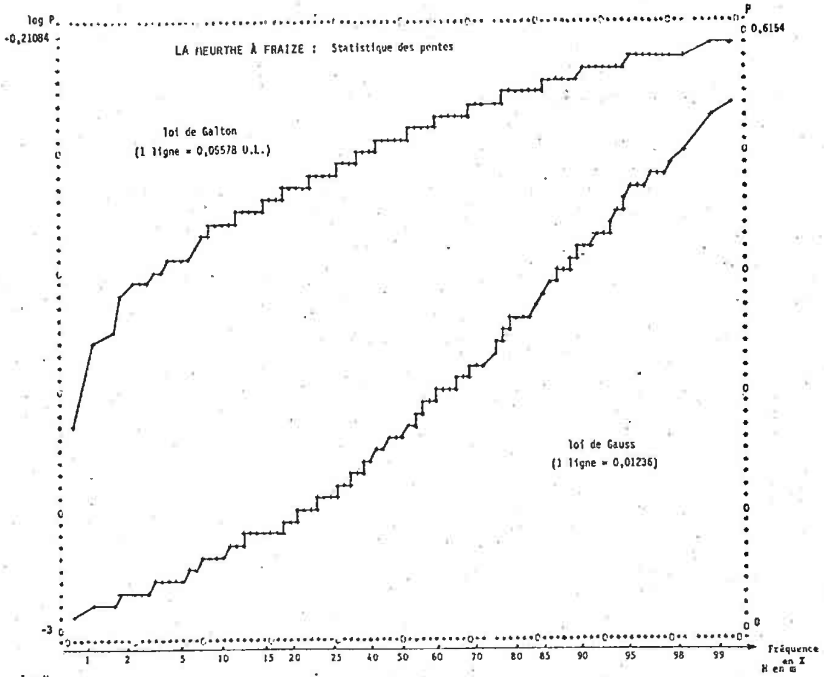
Densité de drainage : $D_d = 1,302\ km^{-1}$

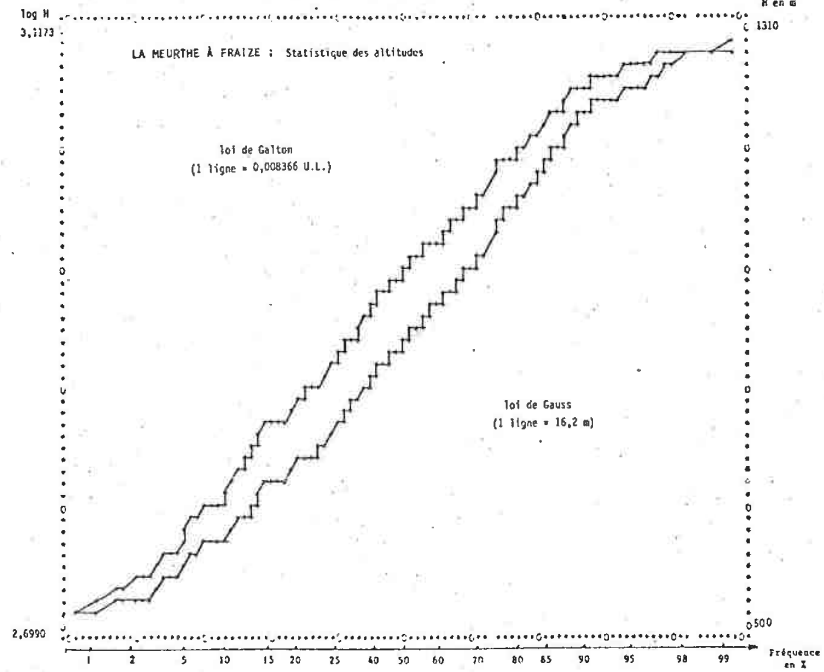
Rapport de confluence : $R_c = 3,8$

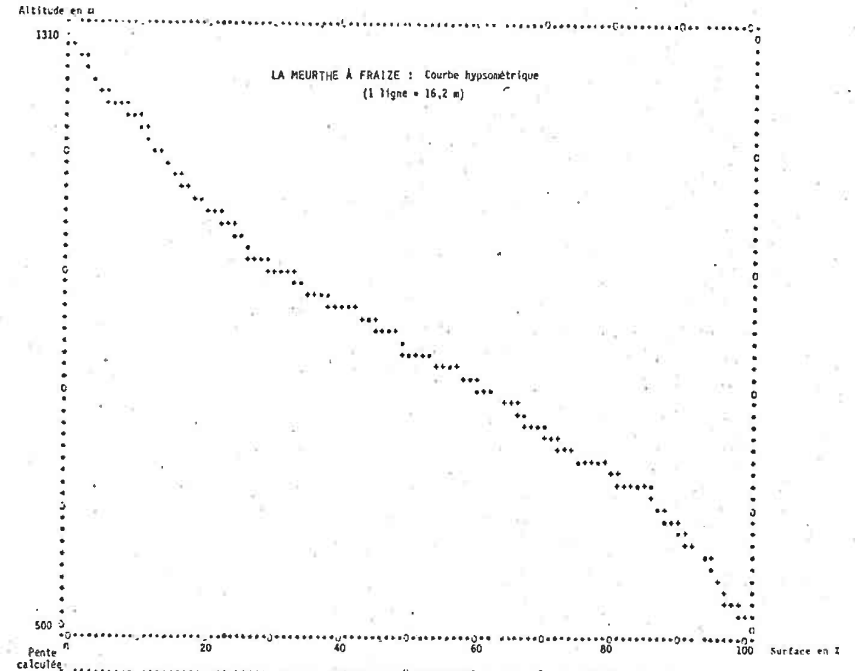
Rapport des longueurs : $R_l = 2,3$

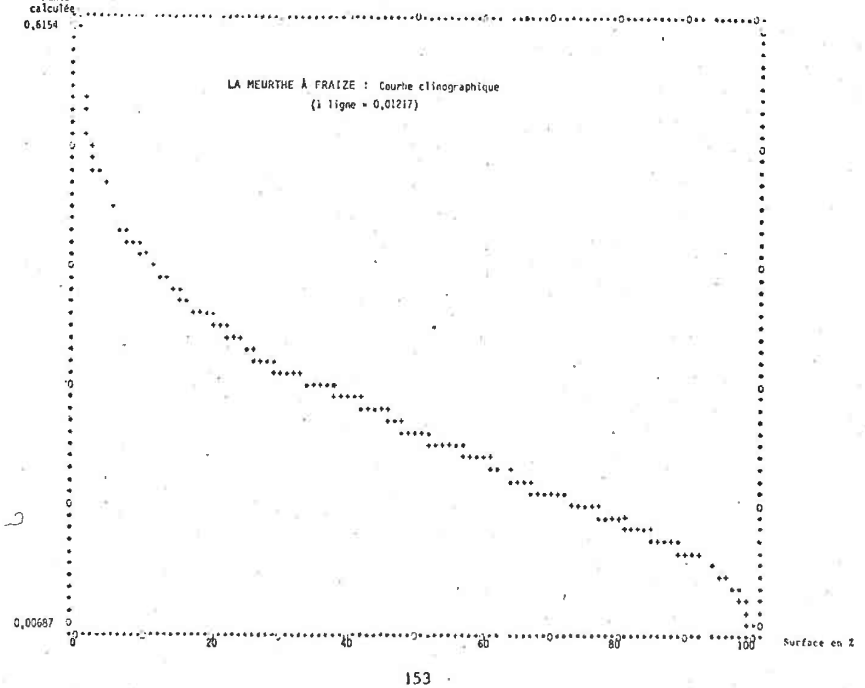


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et Cristallophyllien	100 %
Indice de perméabilité	0 %
Indice de dureté	100 %


log P
P
-0,21084
0,6154
LA MEURTHE À FRAIZE : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,05578 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,01236)
-3
0
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
H en m
3,1173
1310
LA MEURTHE À FRAIZE : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,008366 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 16,2 m)
2,6990
500
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
1310
LA MEURTHE À FRAIZE : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 16,2 m)
500
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,6154
LA MEURTHE À FRAIZE : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,01217)
0,00687
0 20 40 60 80 100
Surface en %

LA MEURTHE AU RUDLIN

Géométrie plane

- surface en km² 31,8
- périmètre en km 23,2
- coefficient de compacité 1,155
- longueur en km 7,2
- largeur en km 4,4
- nombre de points intérieurs 106

Altitudes

- altitude maximale en m 1310
- altitude minimale en m 690
- intervalle de variation en m 620
- D = $(H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 525
- écart-type des altitudes en m 190

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,231
- écart-type calculé σ_P 0,123
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,19\ P_{calculée} + 0,0292$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,304
- écart-type restitué σ_P 0,216

. Ajustement à une loi de GALTON — bon

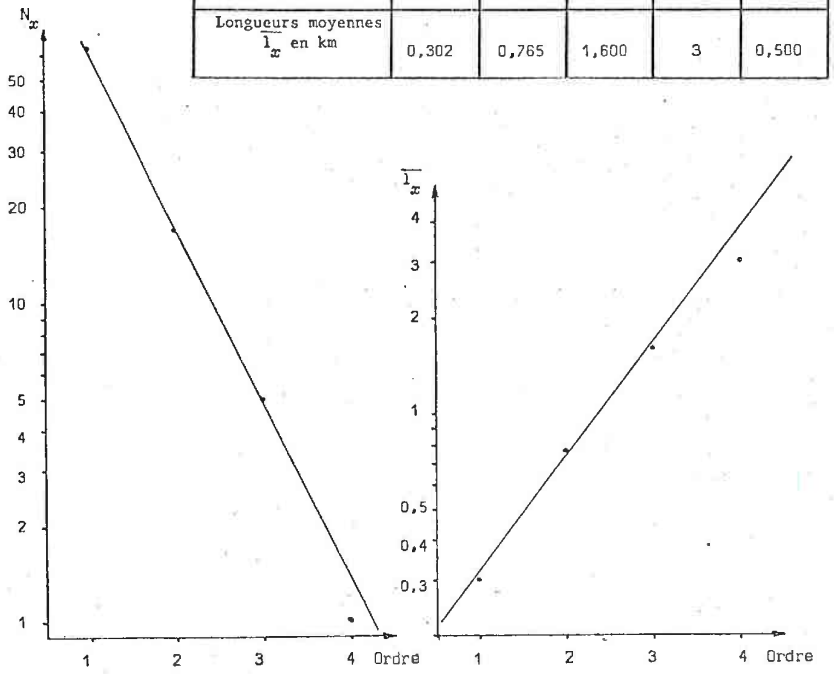
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,713
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,274
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,43 \log P_{calculée} + 0,344$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,676
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,489

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,28245
- indice de pente global 0,07254
- dénivelée spécifique en m 409

LA MEURTHE AU RUDLIN : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	63	17	5	1	86
Longueurs cumulées $\Sigma\ l_x$ en km	19	13	8	3	43
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,302	0,765	1,600	3	0,500

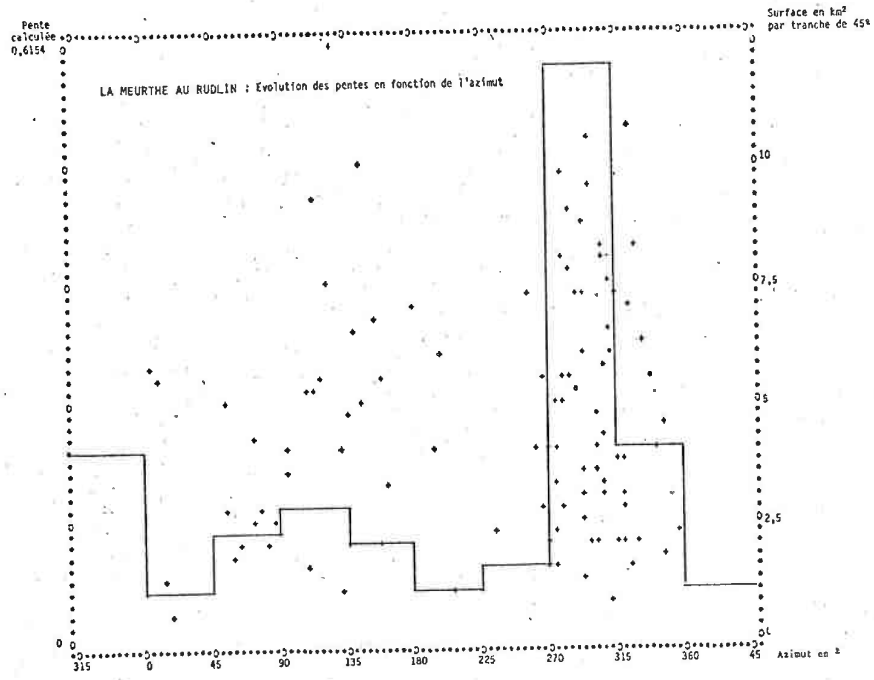


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,981\ km^{-2}$

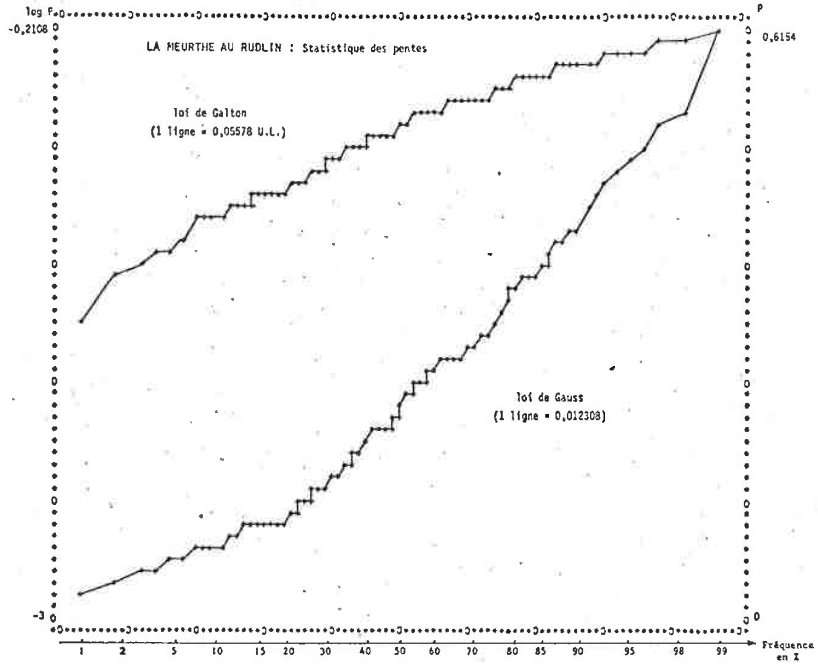
Densité de drainage : $D_d = 1,352\ km^{-1}$

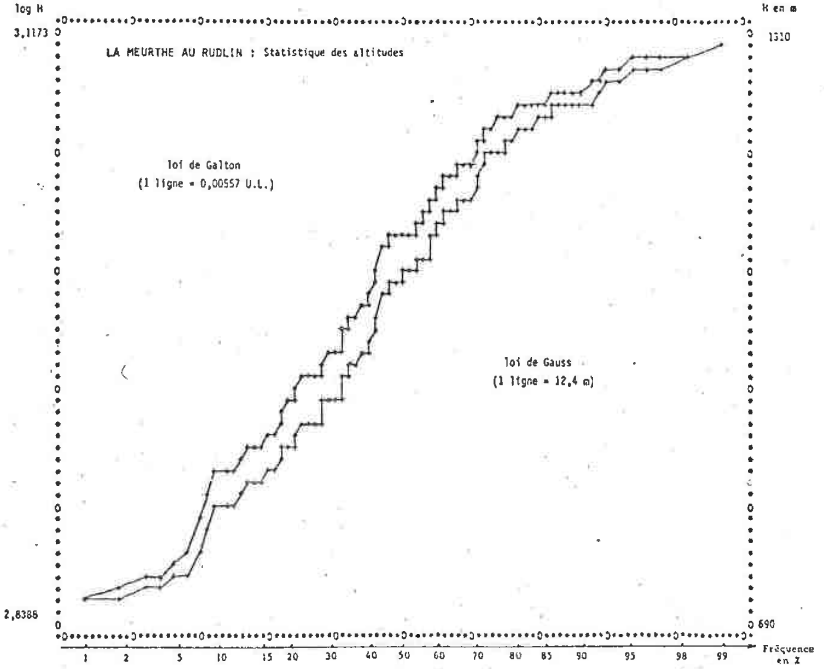
Rapport de confluence : $R_c = 3,5$

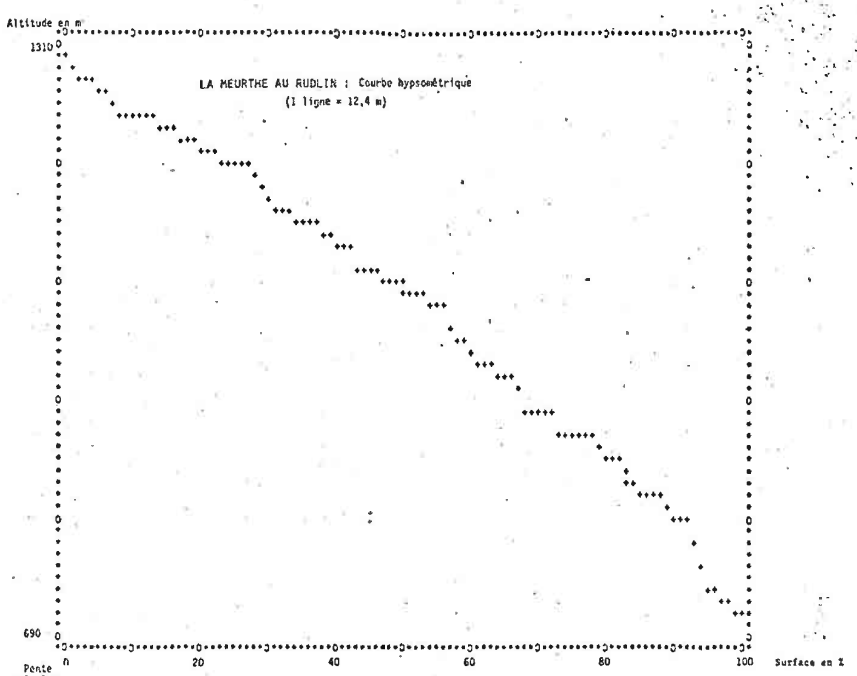
Rapport des longueurs : $R_l = 2,3$

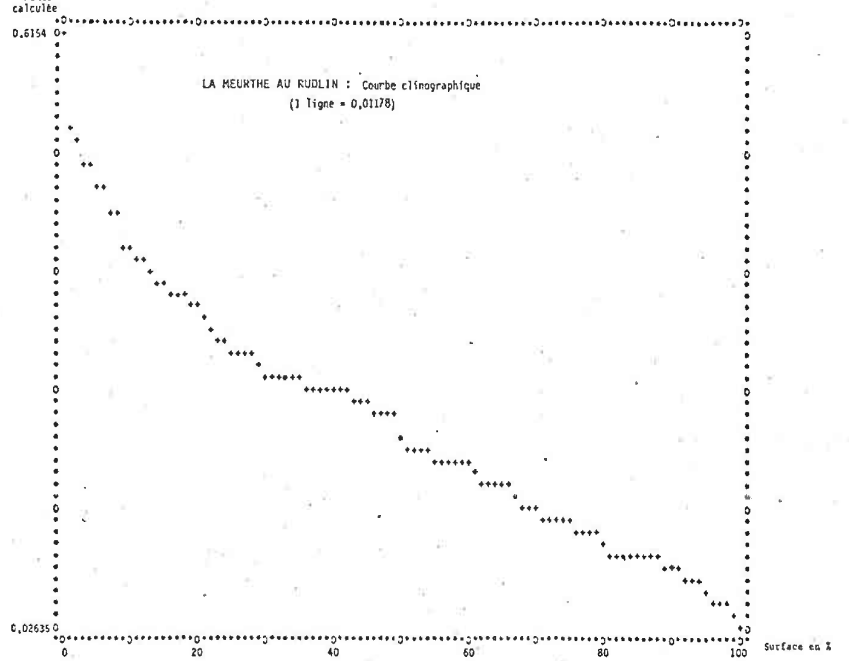


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	100 %
Indice de perméabilité	0 %
Indice de dureté	100 %

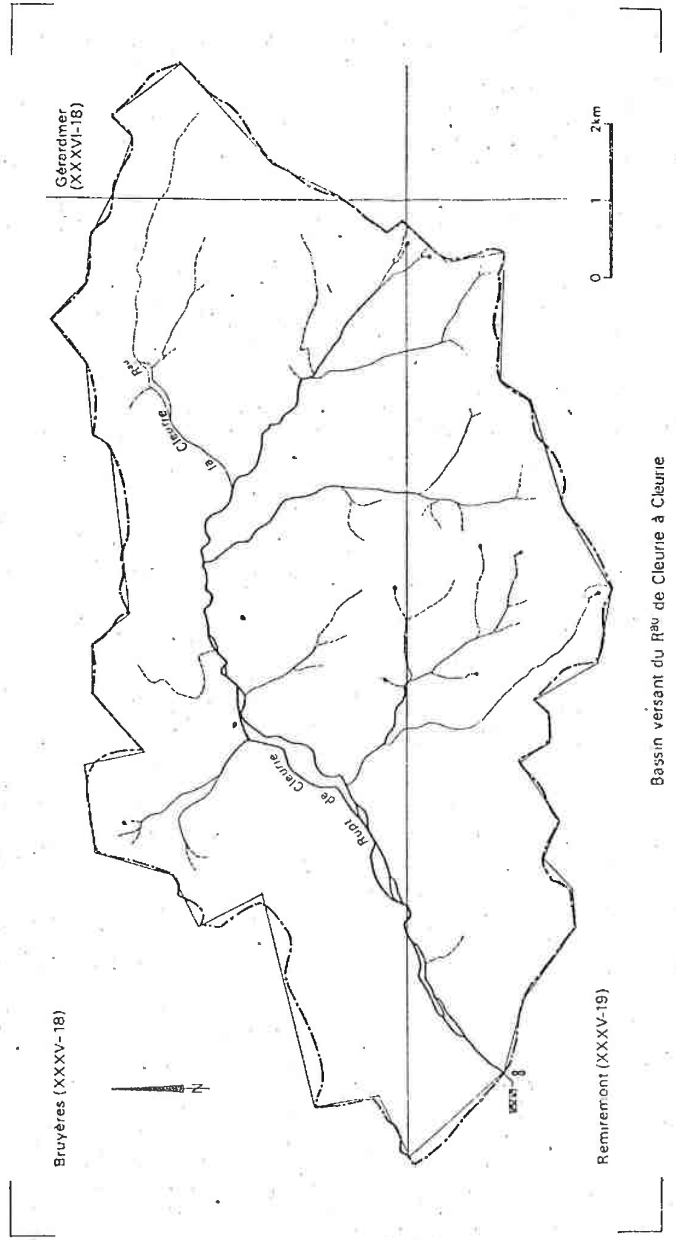








F - LE RUPT DE CLEURIE À CLEURIE



Bassin versant du Rau de Cleurie à Cleurie

LE RUPT DE CLEURIE À CLEURIE

Géométrie plane

- surface en km² 67,2
- périmètre en km 39,8
- coefficient de compacité 1,361
- longueur en km 15,6
- largeur en km 4,3
- nombre de points intérieurs 267

Altitudes

- altitude maximale en m 1005
- altitude minimale en m 440
- intervalle de variation en m 565
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 409,0
- écart-type des altitudes en m 127,0

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — bon

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,14412
- écart-type calculé σ_P 0,08167
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,68\ P_{calculée} - 0,031$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,2111
- écart-type restitué σ_P 0,1479

. Ajustement à une loi de GALTON — médiocre

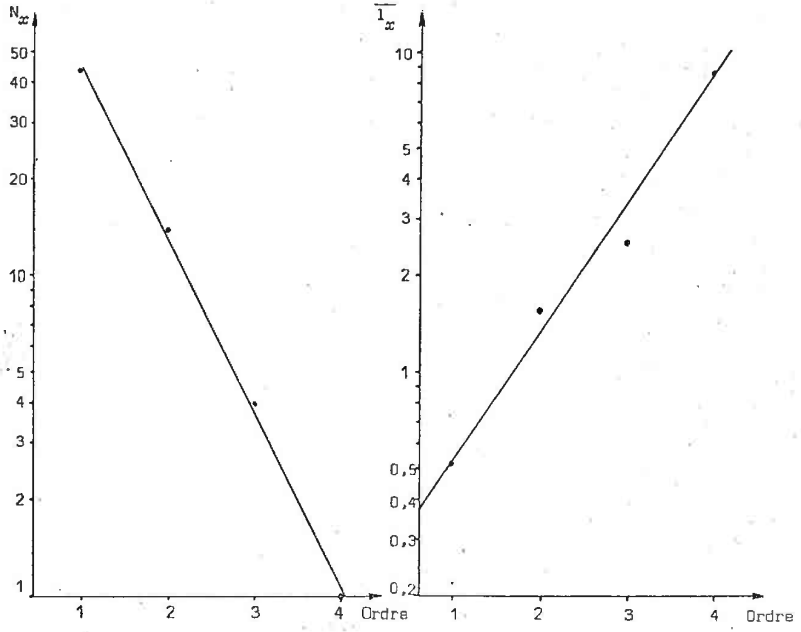
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,9282
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3048
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,3 \log P_{calculée} + 0,383$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,8236
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,5022

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,17848
- indice de pente global 0,02618
- dénivelée spécifique en m 214,6

LE RUPT DE CLEURIE À CLEURIE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	44	14	4	1	63
Longueurs cumulées $\Sigma\ l_x$ en km	22,9	22	10,2	8,7	63,8
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,520	1,571	2,550	8,7	1,013

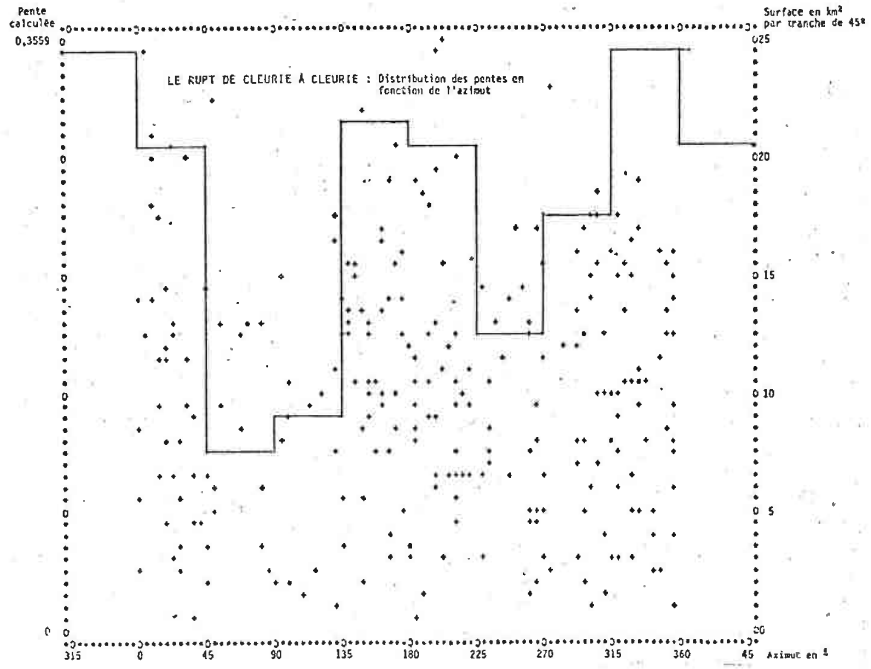


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,655\ km^{-2}$

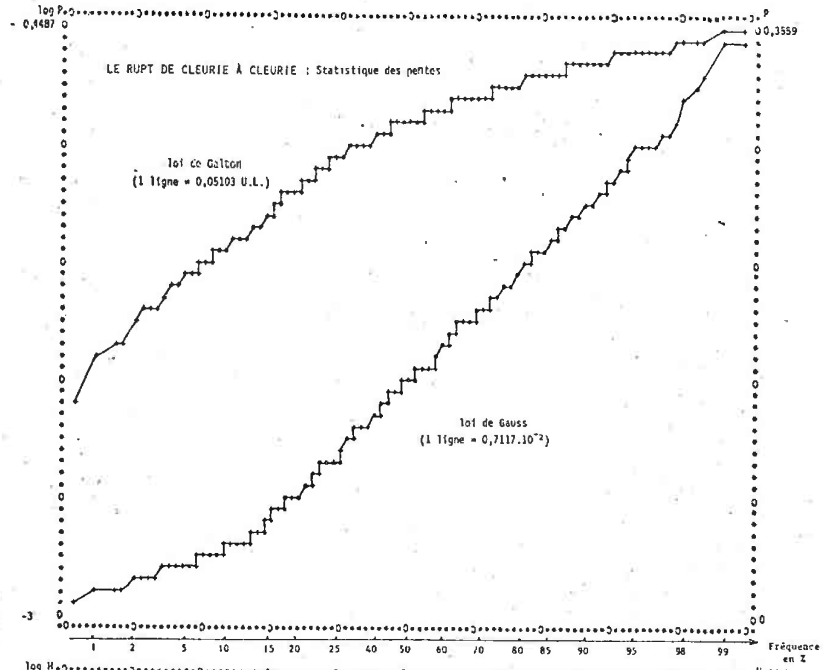
Densité de drainage : $D_d = 0,949\ km^{-1}$

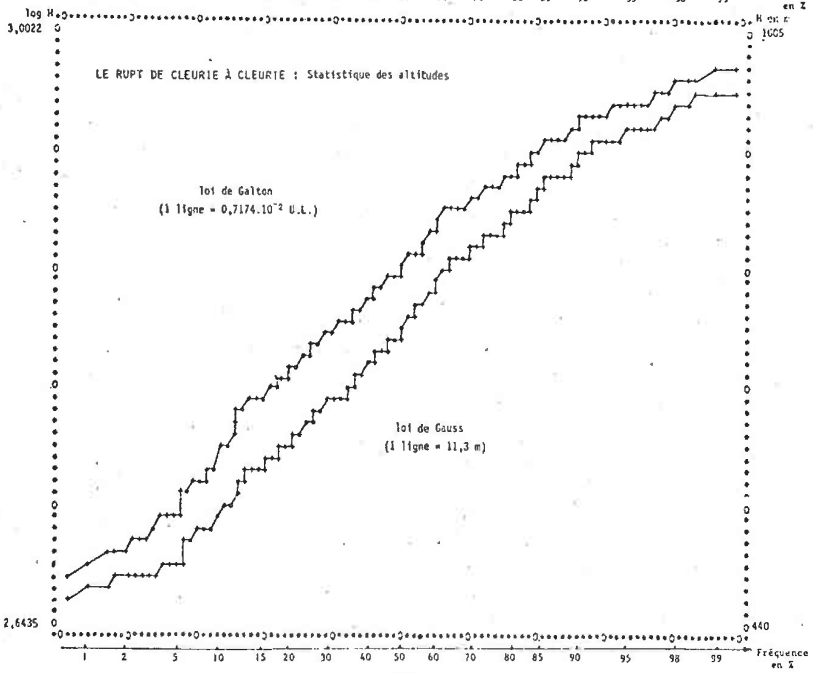
Rapport de confluence : $R_c = 3,6$

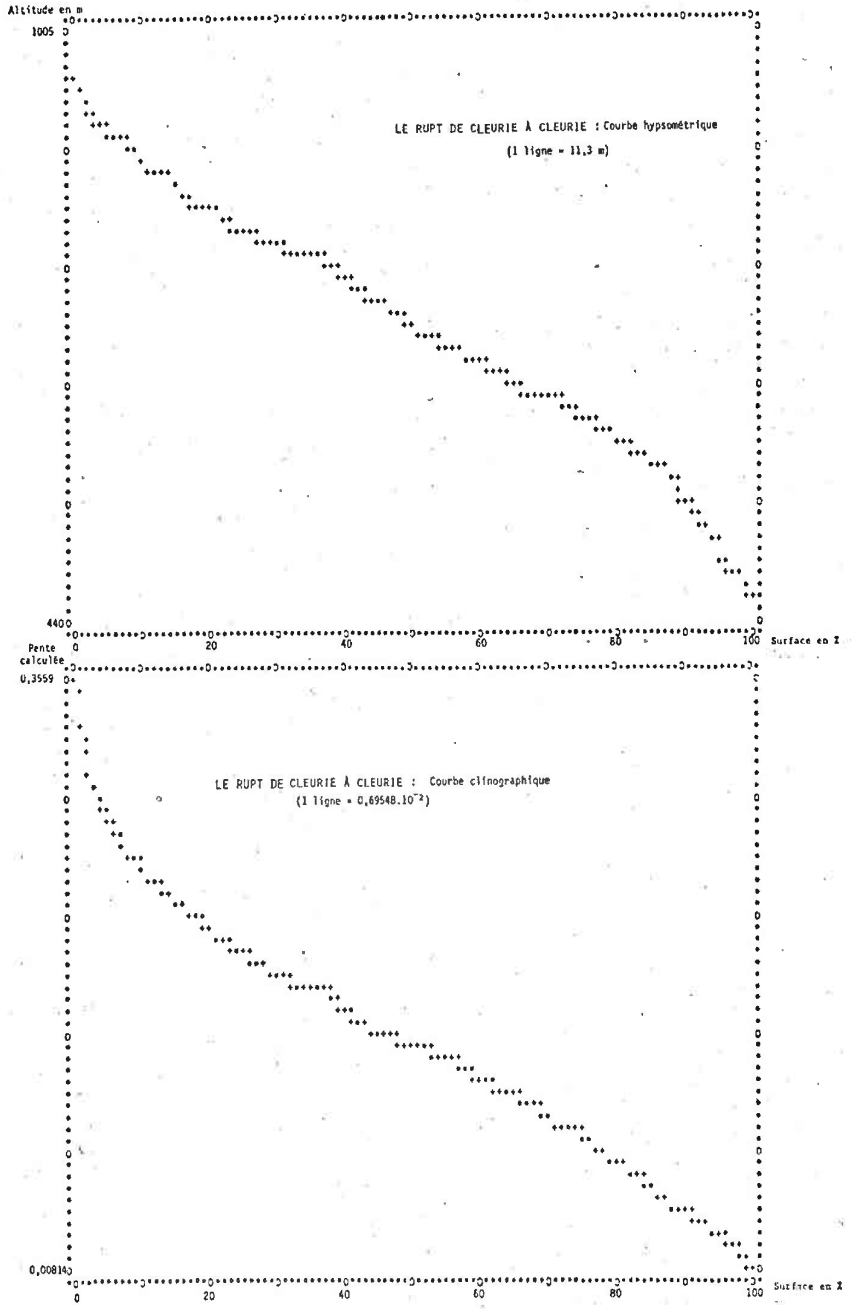
Rapport des longueurs : $R_l = 2,5$



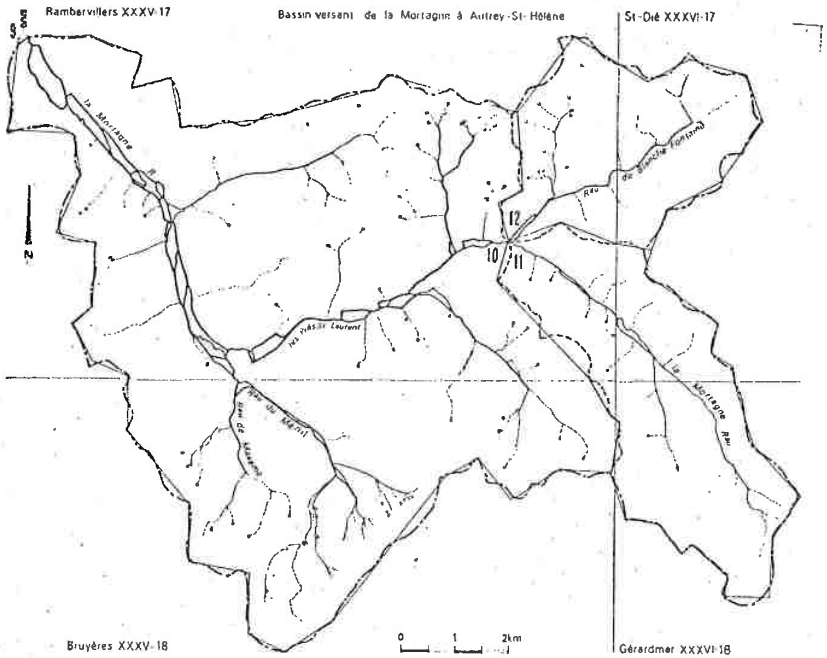
Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	5 %
Socle cristallin et cristallophyllien	95 %
Indice de perméabilité	95 %
Indice de dureté	99 %







G - LA MORTAGNE À AUTREY ET SES BASSINS VERSANTS AMONTS



LA MORTAGNE À AUTREY

Géométrie plane

- surface en km²	98,4
- périmètre en km	56,3
- coefficient de compacité	1,590
- longueur en km	24,1
- largeur en km	4,1
- nombre de points intérieurs	395

Altitudes

- altitude maximale en m	706
- altitude minimale en m	322
- intervalle de variation en m	384
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m	245
- écart-type des altitudes en m	77,9

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$	0,10937
- écart-type calculé σ_P	0,06425
- droite de régression	$P_{réel} = 2,83\ P_{calculée} - 0,0362$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$	0,2733
- écart-type restitué σ_P	0,1777

. Ajustement à une loi de GALTON — bon

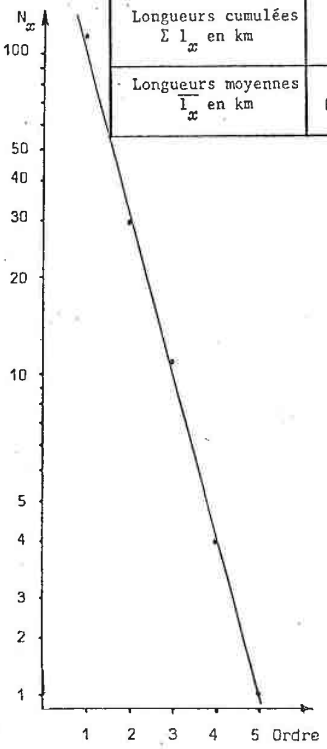
- moyenne calculée $\overline{\log P}$	- 1,0422
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$	0,2942
- droite de régression	$\log P_{réel} = 1,53 \log P_{calculée} + 0,881$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$	0,7136
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$	0,4473

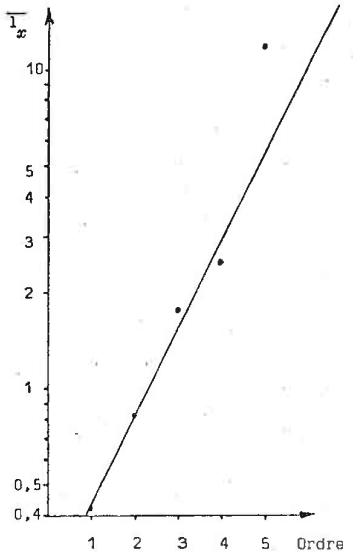
Indices de pente

- indice de pente de Roche	0,11563
- indice de pente global	0,01017
- dénivelée spécifique en m	100,9

LA MORTAGNE À AUTREY : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	114	30	11	3	1	159
Longueurs cumulées Σl_x en km	48	25	19,5	7,5	12	112
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,421	0,833	1,773	2,500	12	0,704



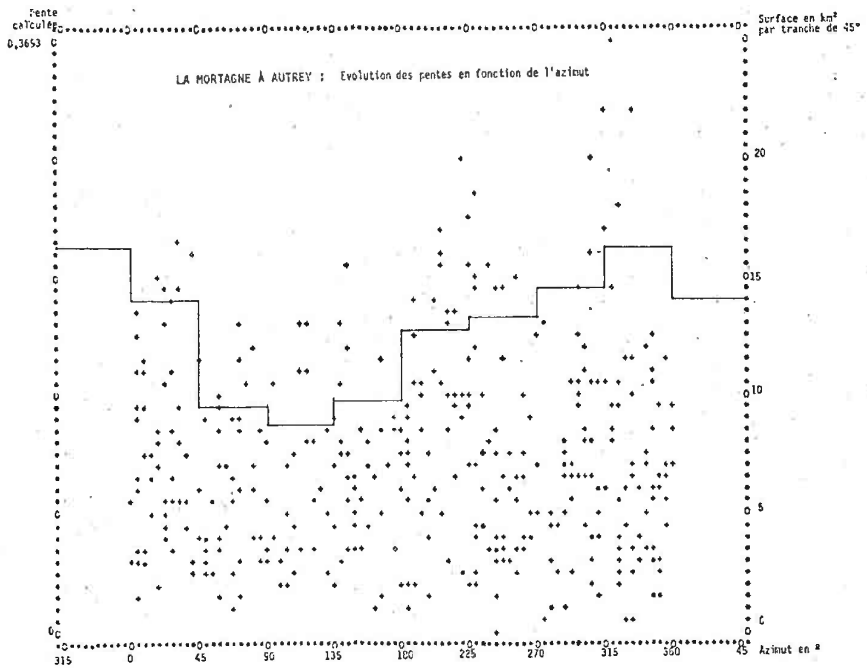


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,159\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1,138\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 3,1$

Rapport des longueurs : $R_l = 1,9$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur .....

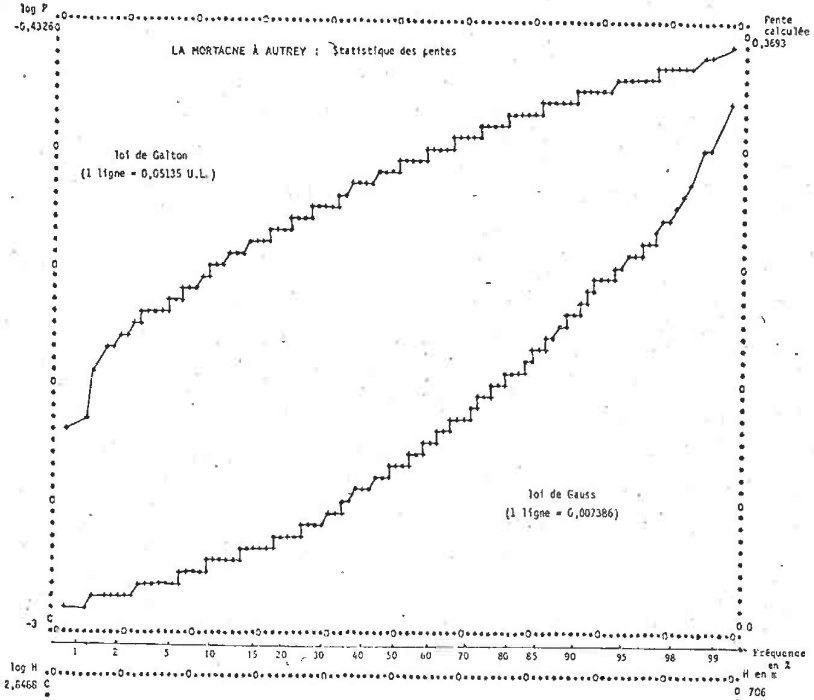
Muschelkalk moyen et inférieur .....

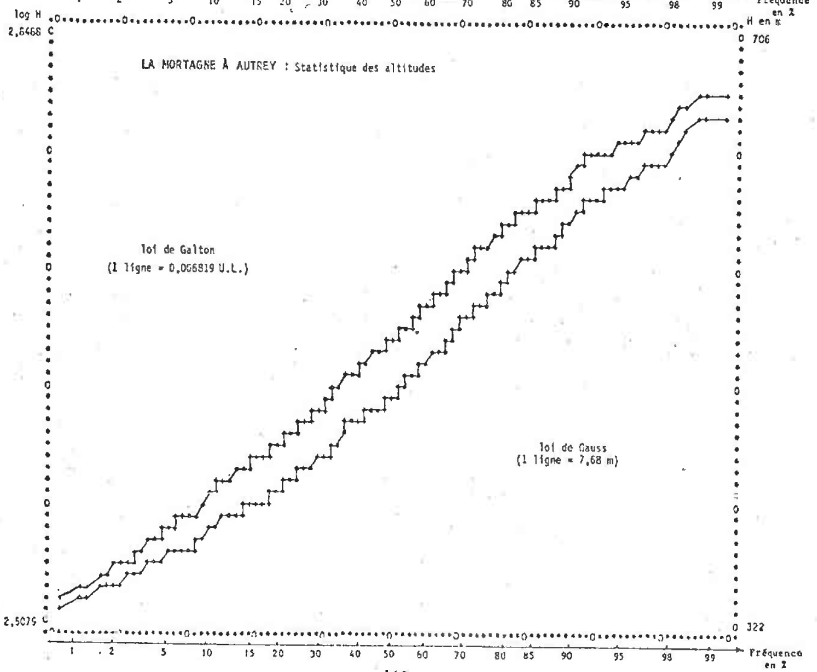
Buntsandstein et Permien ..... 100 %

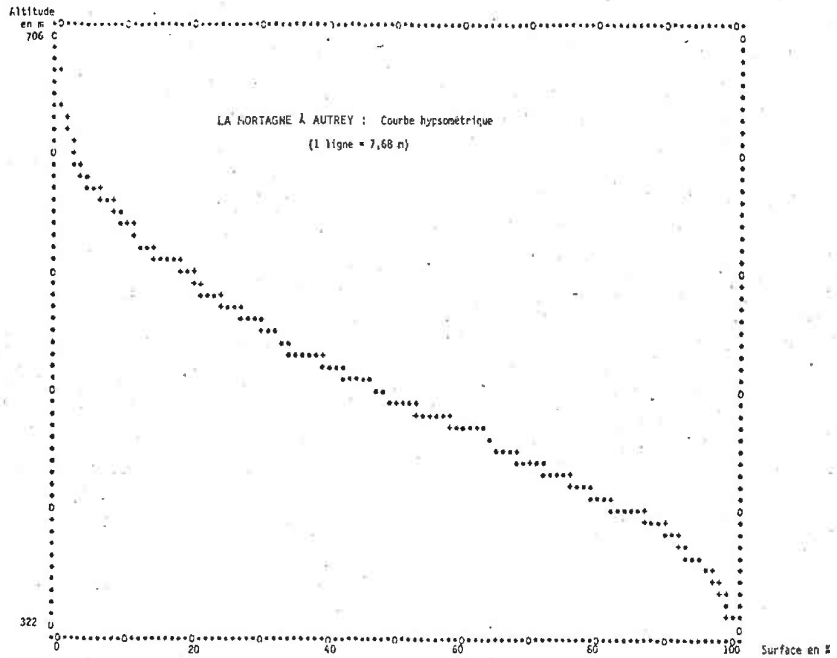
Socle cristallin et cristallophyllien .....

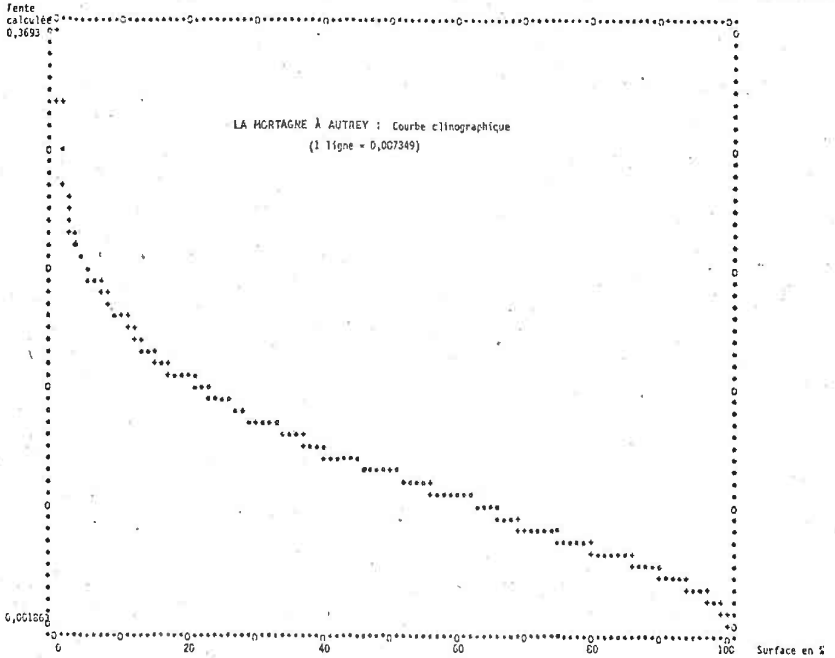
Indice de perméabilité ..... 100 %

Indice de dureté ..... 75 %









LA MORTAGNE EN AVAL DE BLANCHE FONTAINE

Géométrie plane

- surface en km^2 28,6
- périmètre en km 29,6
- coefficient de compacité 1,549
- longueur en km 12,5
- largeur en km 2,3
- nombre de points intérieurs 117

Altitudes

- altitude maximale en m 699
- altitude minimale en m 408
- intervalle de variation en m 291
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 190
- écart-type des altitudes en m 59

Pentes mesurées et pentes calculées

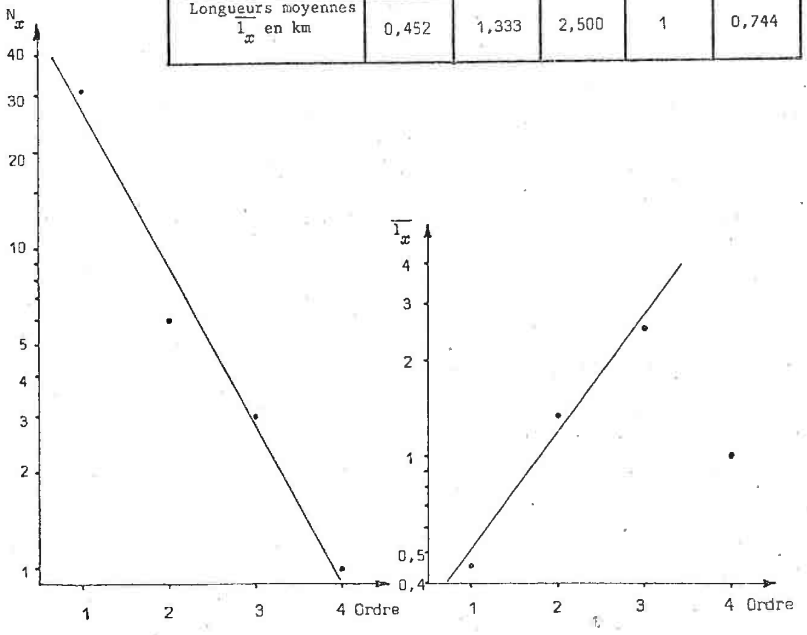
- Ajustement à une loi de GAUSS — bon
  - moyenne calculée $\overline{P}$ 0,11944
  - écart-type calculé σ_P 0,0581
  - droite de régression ..... $P_{réel} = 2,34\ P_{calculée} + 0,0508$
  - moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,3303
  - écart-type restitué σ_P 0,162
- Ajustement à une loi de GALTON — médiocre
  - moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,9766
  - écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2405
  - droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,19 \log P_{calculée} + 0,81$
  - moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,5522
  - écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,377

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,14077
- indice de pente global 0,01521
- dénivelée spécifique en m 81,3

LA MORTAGNE EN AVAL DE BLANCHE FONTAINE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	31	6	3	1	41
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	14	8	7,5	1	30,5
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,452	1,333	2,500	1	0,744

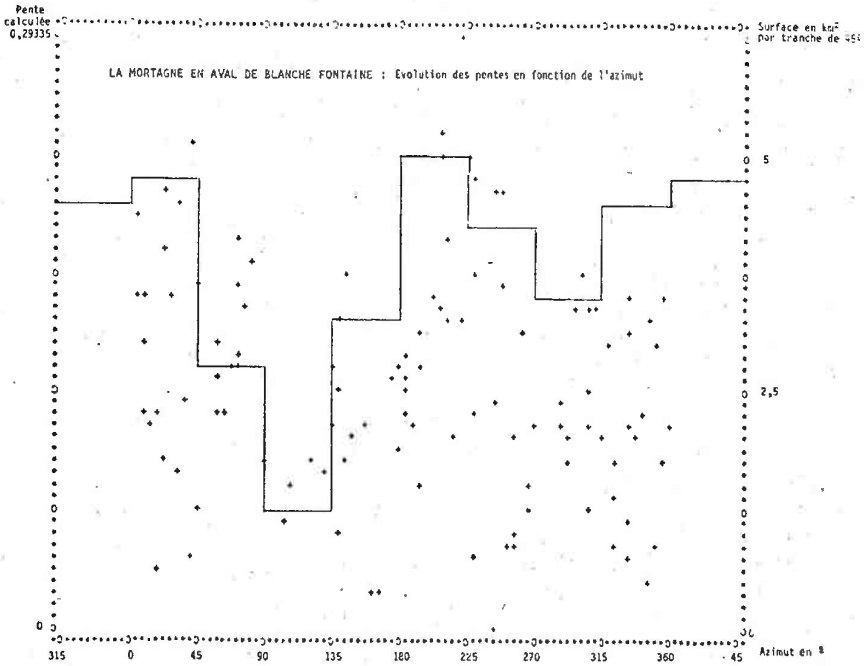


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1{,}084\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1{,}066\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 3{,}1$

Rapport des longueurs : $R_l = 2{,}4$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur .....

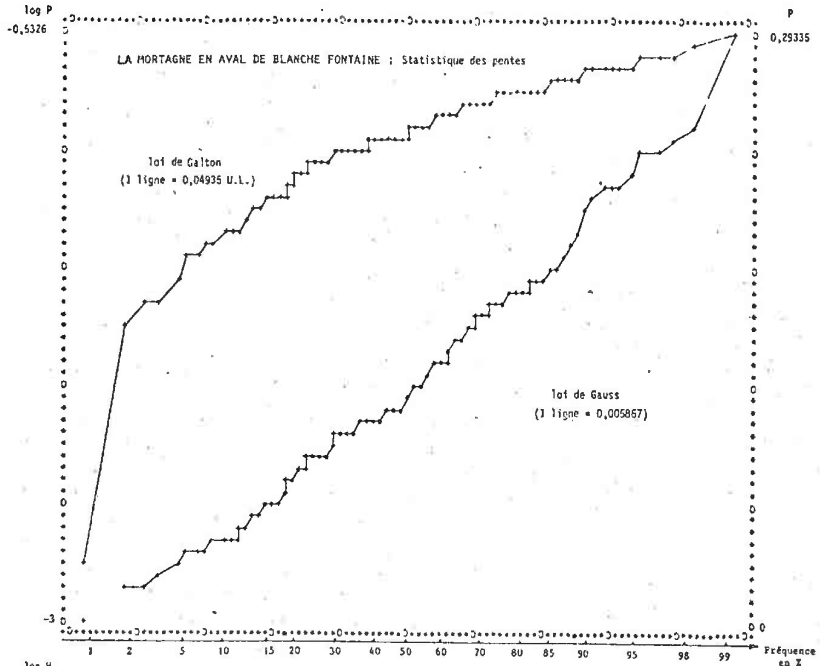
Muschelkalk moyen et inférieur .....

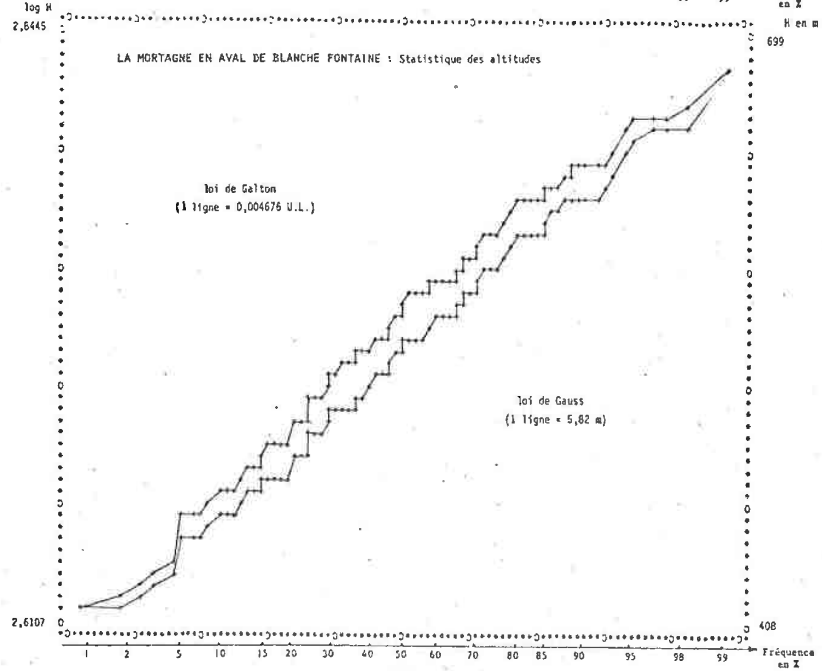
Buntsandstein et Permien ..... 100 %

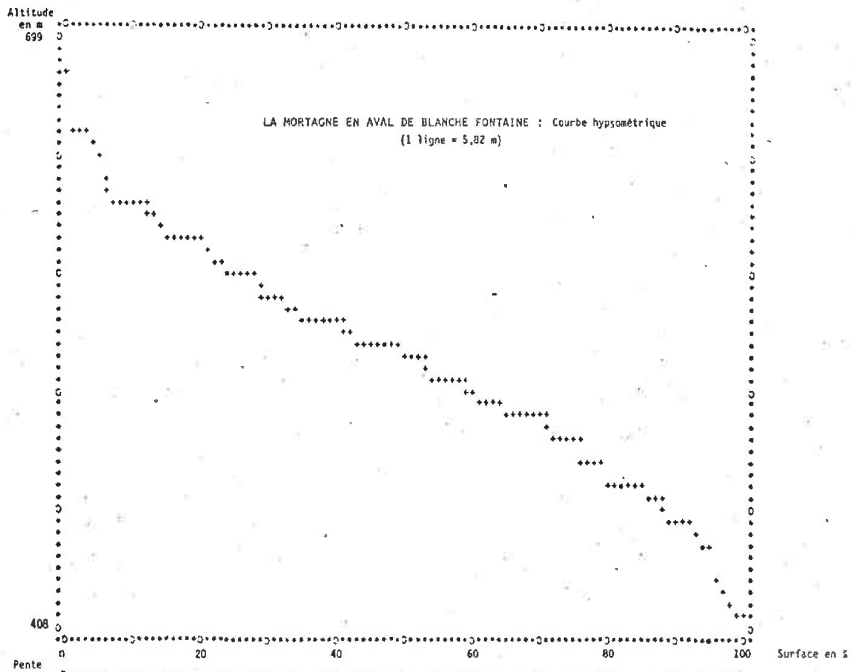
Socle cristallin et cristallophyllien .....

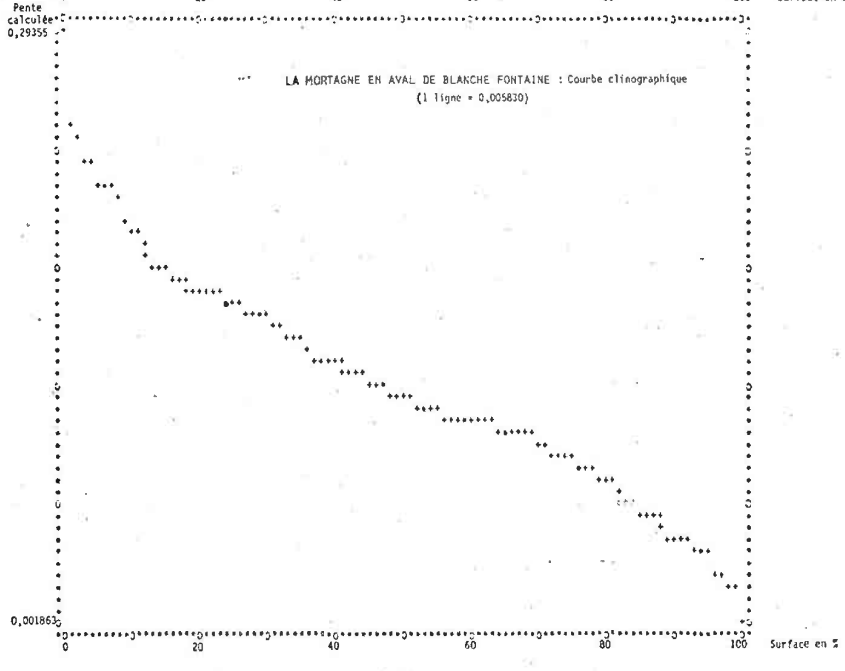
Indice de perméabilité ..... 100 %

Indice de dureté ..... 75 %


log P
-0,5326
P
0,29335
LA MORTAGNE EN AVAL DE BLANCHE FONTAINE : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,04935 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,005867)
-3
0
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,8445
H en m
699
LA MORTAGNE EN AVAL DE BLANCHE FONTAINE : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,004676 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 5,82 m)
2,6107
408
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
699
LA MORTAGNE EN AVAL DE BLANCHE FONTAINE : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 5,82 m)
408
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,29355
LA MORTAGNE EN AVAL DE BLANCHE FONTAINE : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,005830)
0,001863
0 20 40 60 80 100
Surface en %

LA MORTAGNE EN AMONT DE BLANCHE FONTAINE

Géométrie plane

- surface en km² 16,6
- périmètre en km 20,4
- coefficient de compacité 1,403
- longueur en km 8,2
- largeur en km 2,0
- nombre de points intérieurs 69

Altitudes

- altitude maximale en m 699
- altitude minimale en m 408
- intervalle de variation en m 291
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 220
- écart-type des altitudes en m 65,9

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — Moyen

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,13204
- écart-type calculé σ_P 0,06548
- droite de régression ..... $P_{réel} = 2,16\ P_{calculée} + 0,102$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,3872
- écart-type restitué σ_P 0,1871

. Ajustement à une loi de GALTON — Moyen

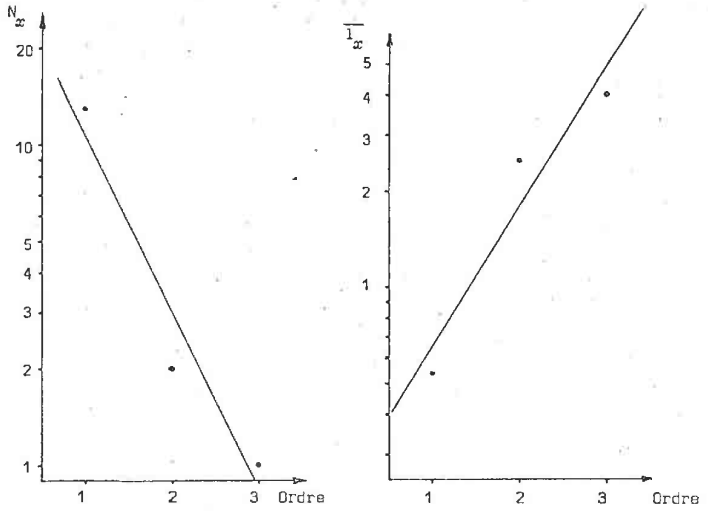
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,9274
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2249
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,41 \log P_{calculée} + 0,814$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,4936
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,5181

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,17608
- indice de pente global 0,02688
- dénivelée spécifique en m 109,5

LA MORTAGNE EN AMONT DE BLANCHE FONTAINE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau			TOTAL
	1	2	3	
Nombre N_x	13	2	1	16
Longueurs cumulées l_x en km	7	5	4	16
Longueurs moyennes $\Sigma \overline{l}_x$ en km	0,538	2,500	4	1

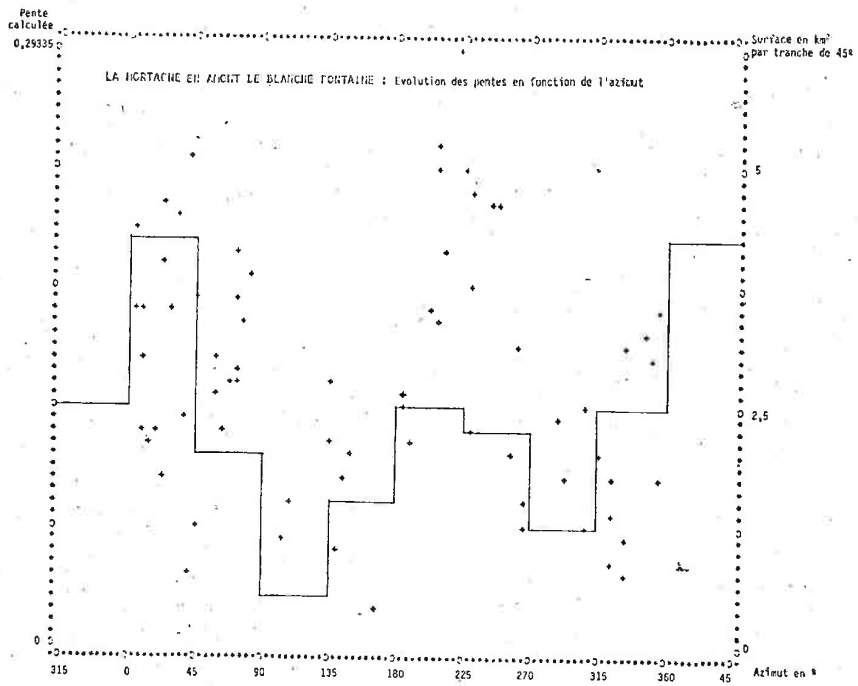


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,783\ km^{-2}$

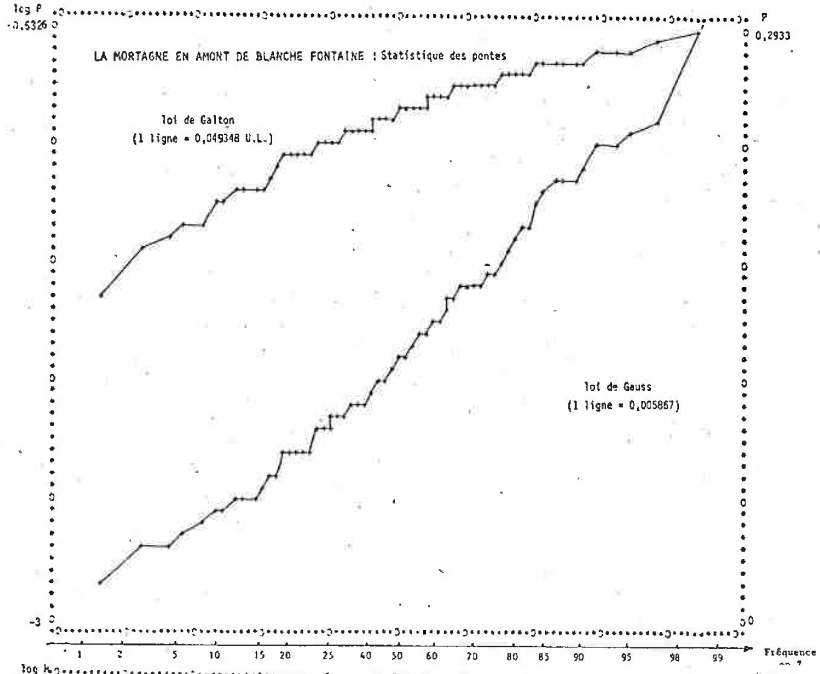
Densité de drainage : $D_d = 0,964\ km^{-1}$

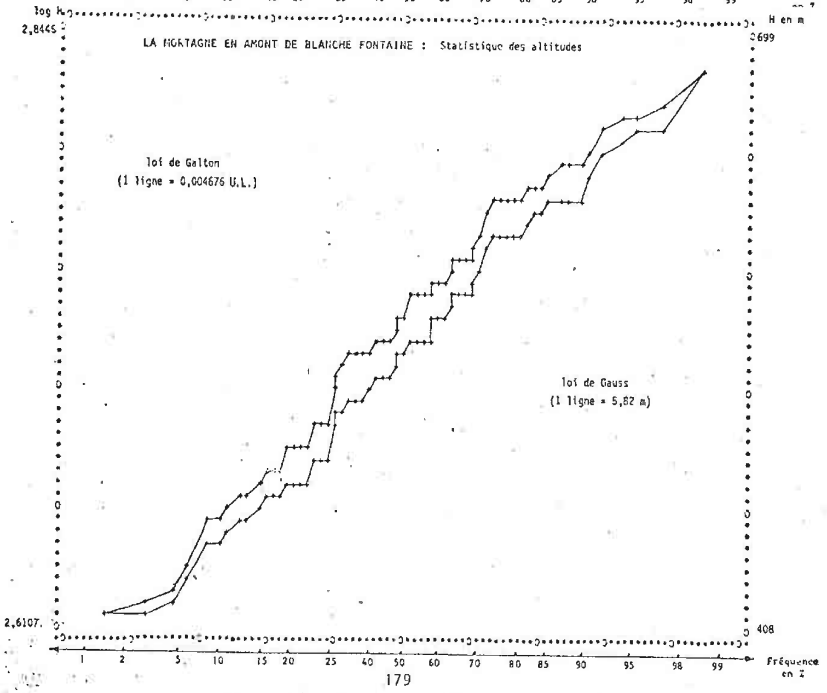
Rapport de confluence : $R_c = 3,6$

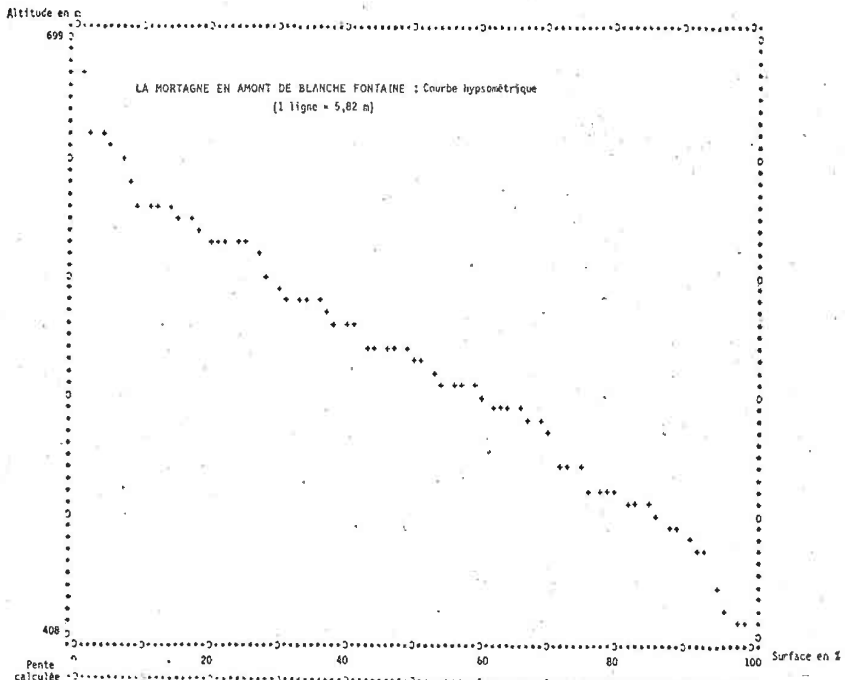
Rapport des longueurs : $R_l = 1,7$

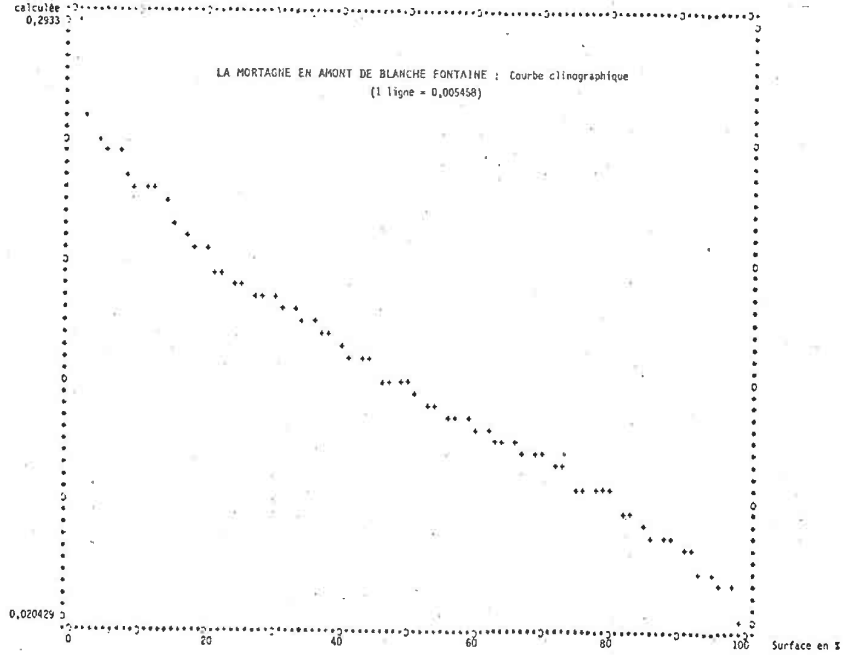


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	100 %
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	100 %
Indice de dureté	75 %









LE RUISSEAU DE BLANCHE FONTAINE

Géométrie plane

- surface en km^2 11,4
- périmètre en km 14,5
- coefficient de compacité 1,200
- longueur en km 4,9
- largeur en km 2,3
- nombre de points intérieurs 46

Altitudes

- altitude maximale en m 652
- altitude minimale en m 408
- intervalle de variation en m 244
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 162
- écart-type des altitudes en m 52,5

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — Bon

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,1004
- écart-type calculé σ_P 0,0501
- droite de régression ..... $P_{réel} = 3{,}64\ P_{calculée} - 0{,}134$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,231
- écart-type restitué σ_P 0,1817

• Ajustement à une loi de GALTON — Médiocre

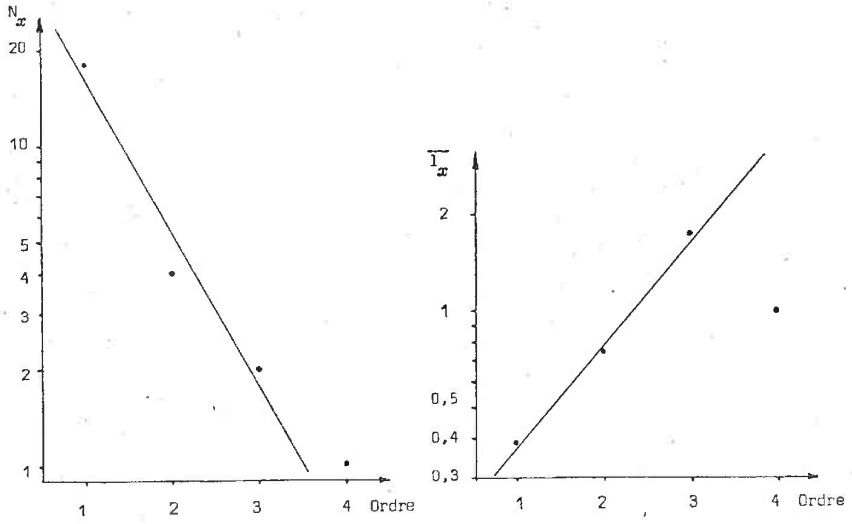
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,0622
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2191
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1{,}31 \log P_{calculée} + 0{,}625$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,7664
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,357

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,2035
- indice de pente global 0,03298
- dénivelée spécifique en m 111,4

LE RUISSEAU DE BLANCHE FONTAINE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	18	4	2	1	25
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	7	3	3,5	1	14,5
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,389	0,750	1,750	1	0,580

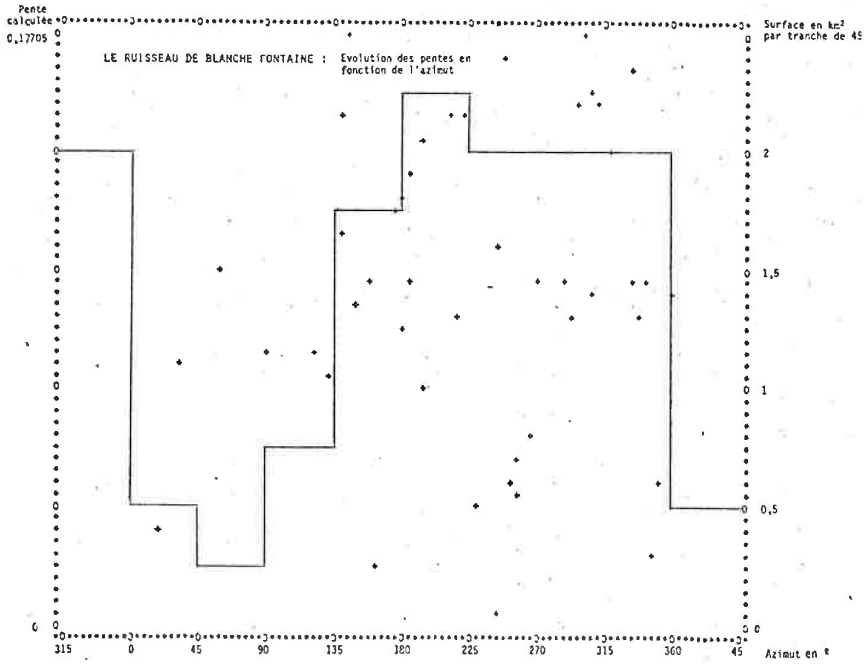


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,579\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1,272\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 3,1$

Rapport des longueurs : $R_l = 2,1$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur .....

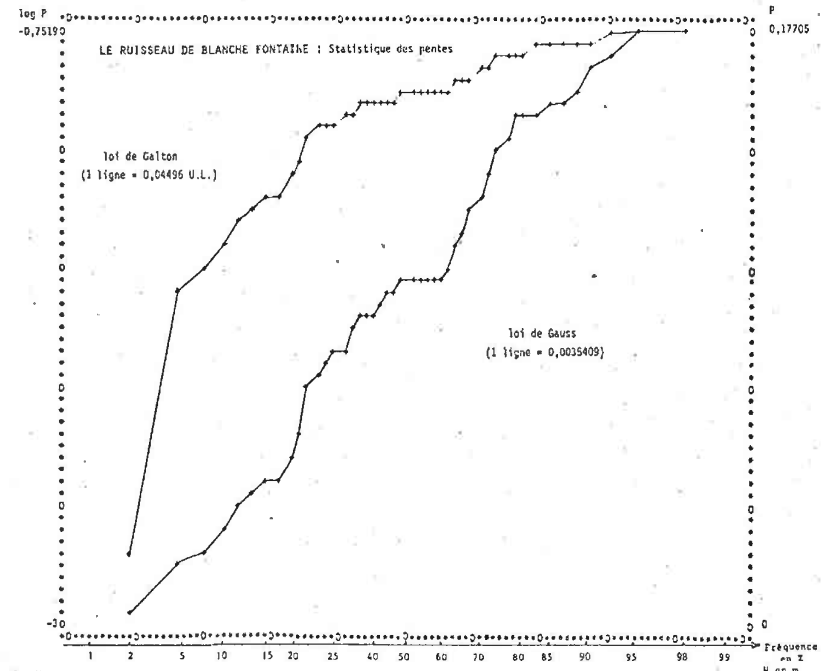
Muschelkalk moyen et inférieur .....

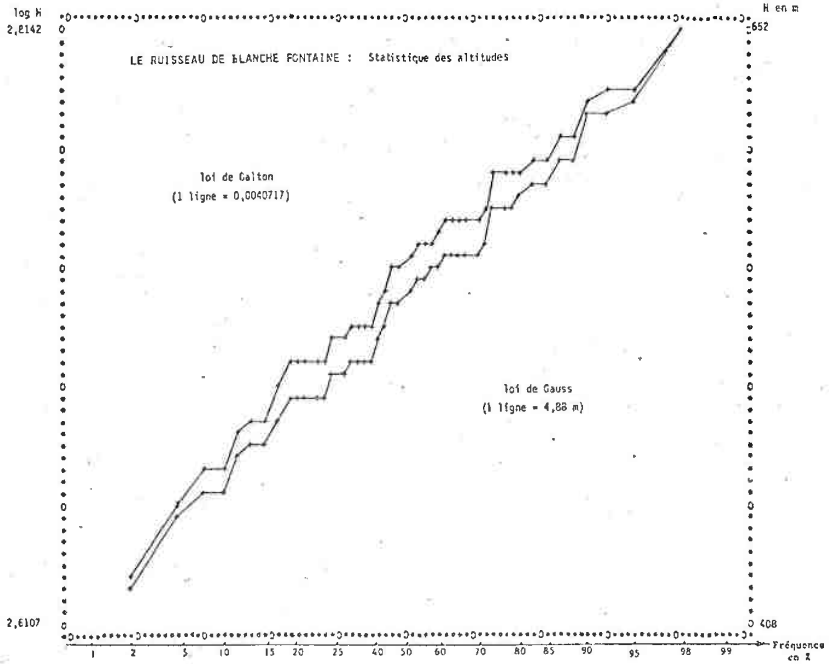
Buntsandstein et Permien ..... 100 %

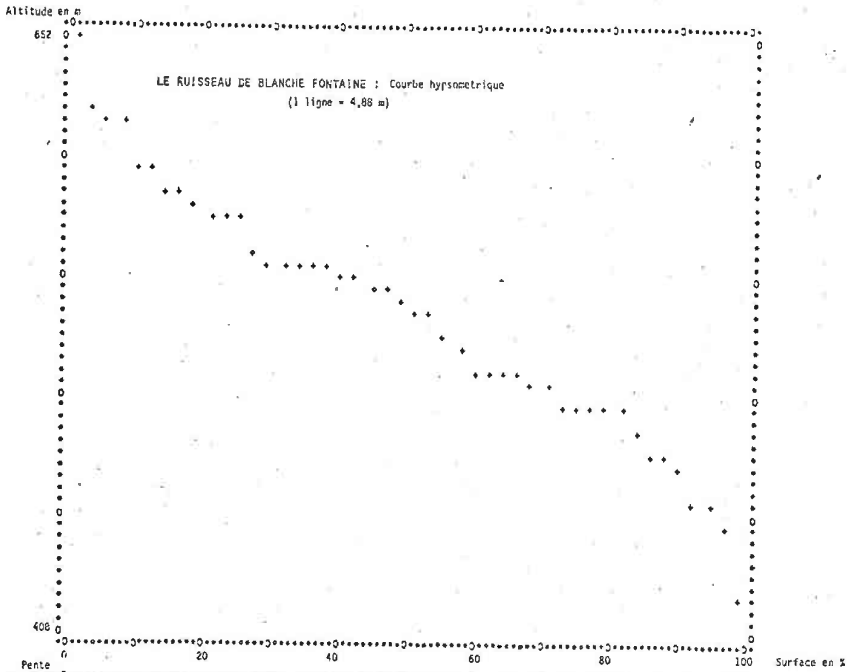
Socle cristallin et cristallophyllien .....

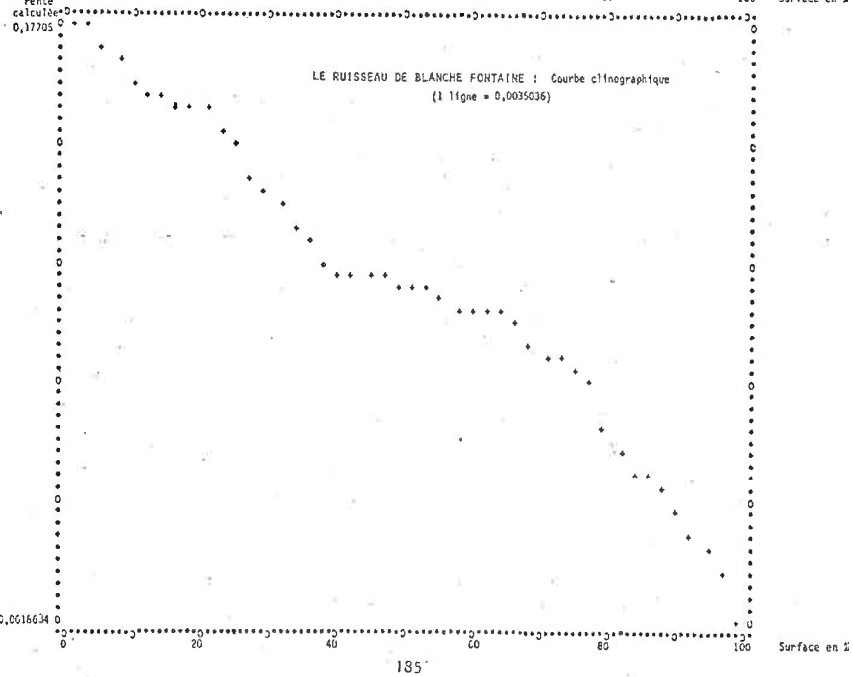
Indice de perméabilité ..... 100 %

Indice de dureté ..... 75 %

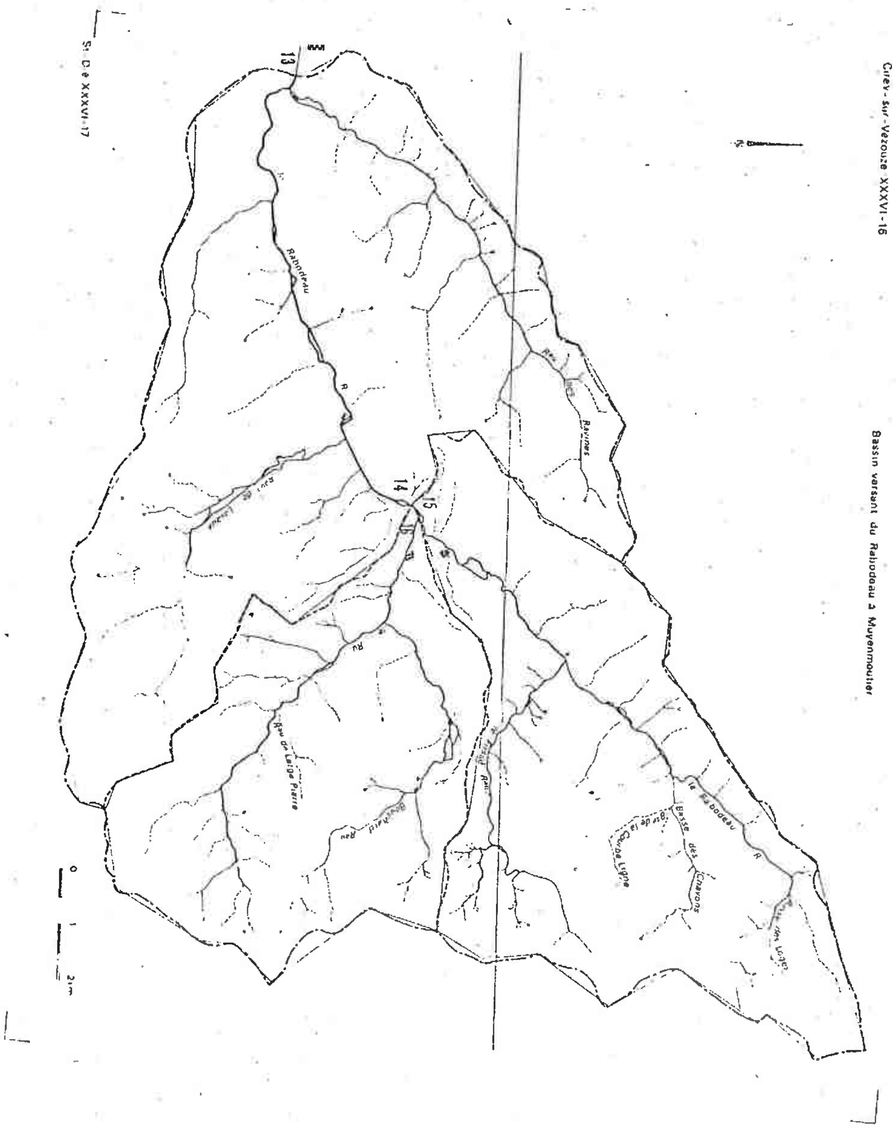

log P
-0,7519
P
0,17705
LE RUISSEAU DE BLANCHE FONTAINE : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,04496 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,0035409)
-30
0
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,8142
H en m
652
LE RUISSEAU DE BLANCHE FONTAINE : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,0040717)
loi de Gauss
(1 ligne = 4,88 m)
2,6107
408
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
652
LE RUISSEAU DE BLANCHE FONTAINE : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 4,88 m)
408
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,17705
LE RUISSEAU DE BLANCHE FONTAINE : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,0035036)
0,0016634
0
0 20 40 60 80 100
Surface en %

H - LE RABODEAU À MOYENMOUTIER ET SES BASSINS VERSANTS



LE RABODEAU À MOYENMOUTIER

Géométrie plane

- surface en km² 151,4
- périmètre en km 55,7
- coefficient de compacité 1,268
- longueur en km 20,5
- largeur en km 7,4
- nombre de points intérieurs 608

Altitudes

- altitude maximale en m 933
- altitude minimale en m 300
- intervalle de variation en m 633
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 470
- écart-type des altitudes en m 149

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,14014
- écart-type calculé σ_P 0,0925
- droite de régression .... $P_{réel} = 2,03\ P_{calculée} - 0,017$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,2675
- écart-type restitué σ_P 0,1839

. Ajustement à une loi de GALTON — bon

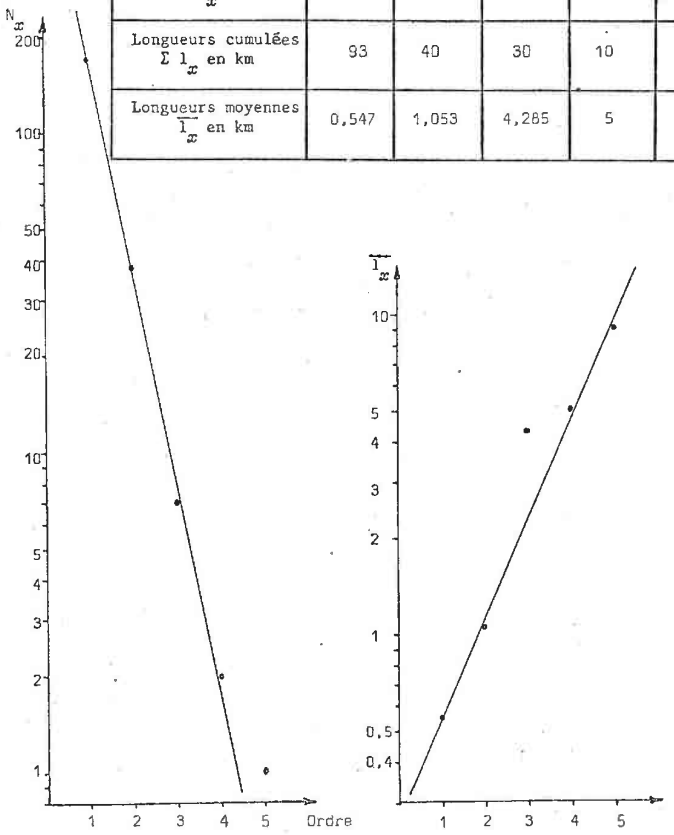
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ .... -0,9642
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3226
- droite de régression .... $\log P_{réel} = 1,44\ P_{calculée} + 0,637$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ .... -0,7514
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4596

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,16818
- indice de pente global 0,02295
- dénivelée spécifique en m 282,4

LE RABODEAU À MOYENMOUTIER : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	170	38	7	2	1	218
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	93	40	30	10	9	182
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,547	1,053	4,285	5	9	0,835

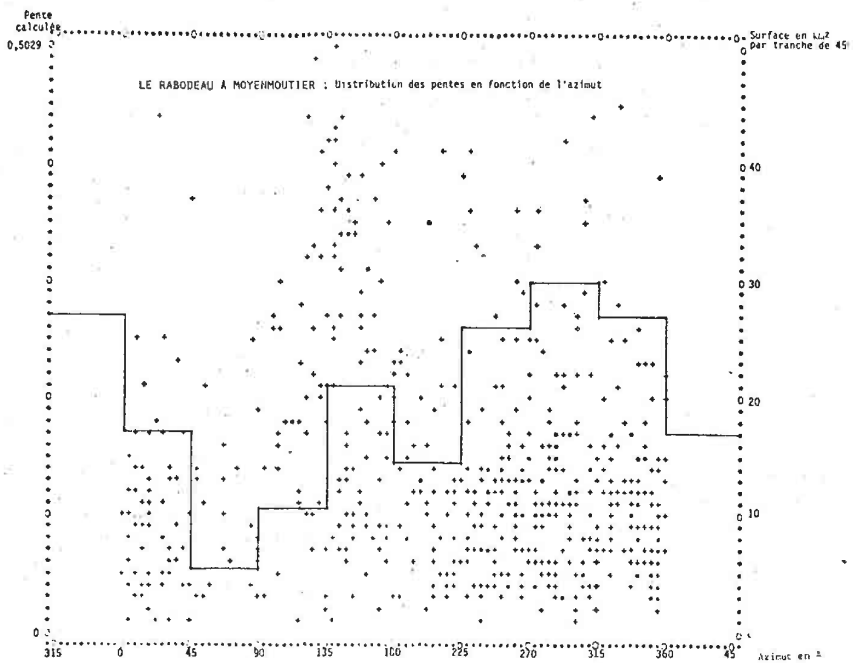


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,123\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1,202\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 4,6$

Rapport des longueurs : $R_l = 2,1$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur .....

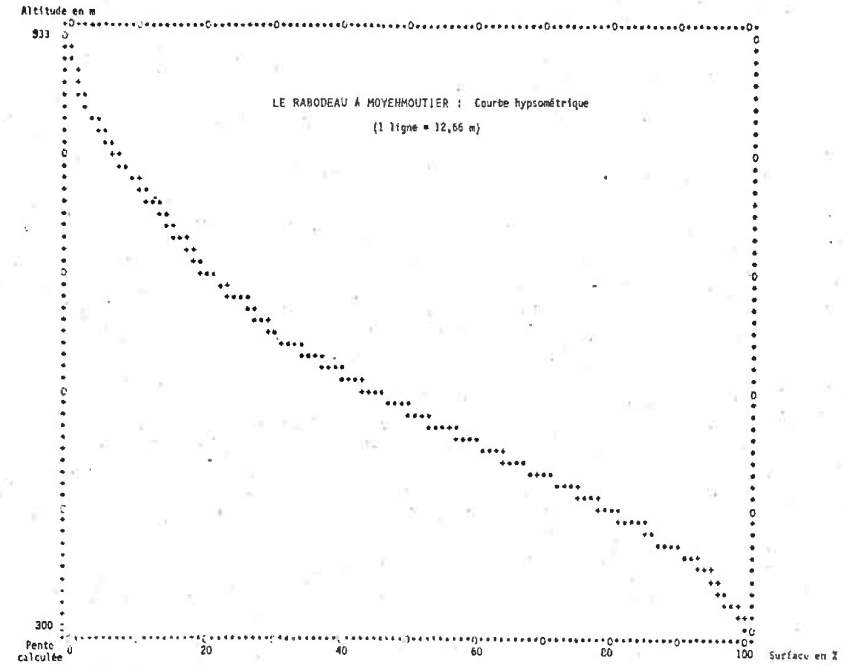
Muschelkalk moyen et inférieur .....

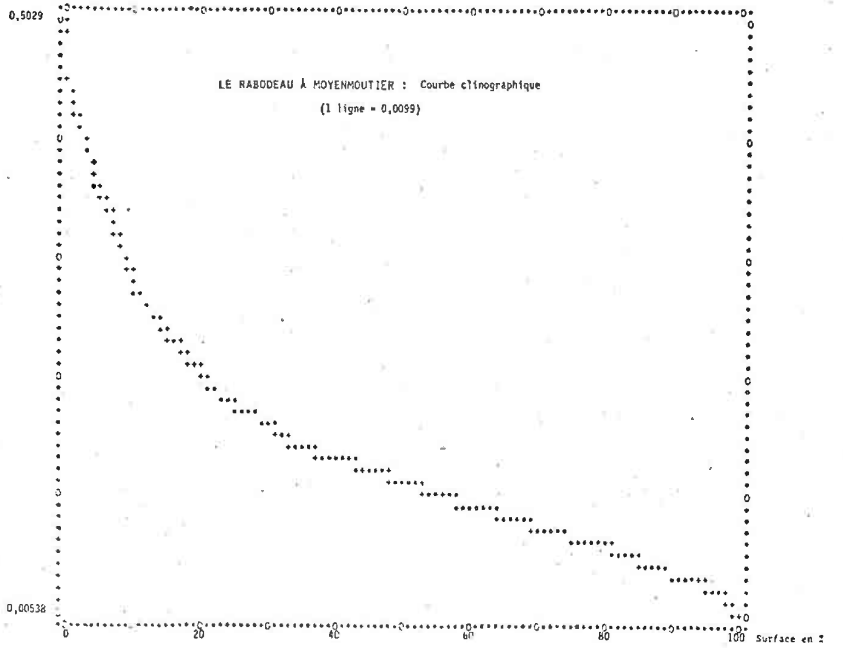
Buntsandstein et Permien ..... 62 %

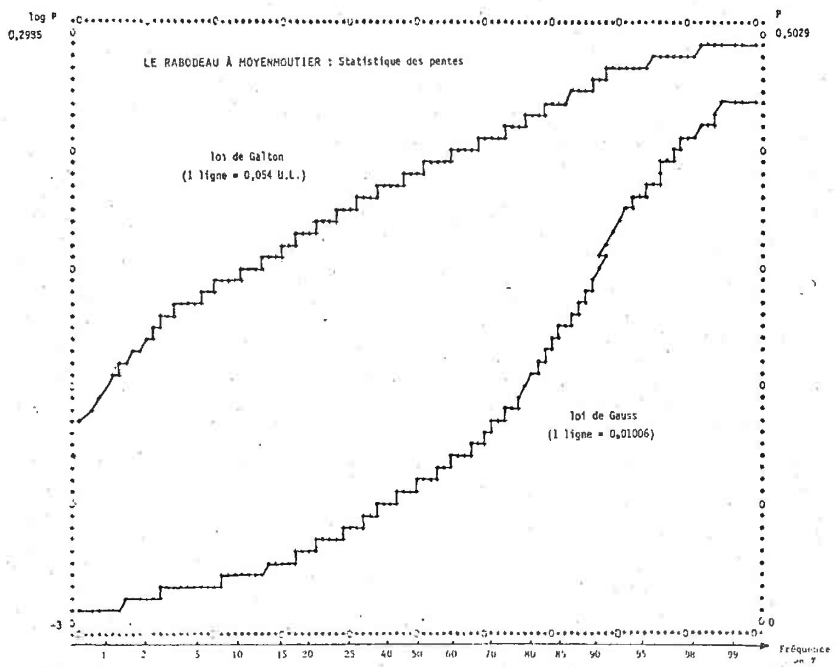
Socle cristallin et cristallophyllien ..... 38 %

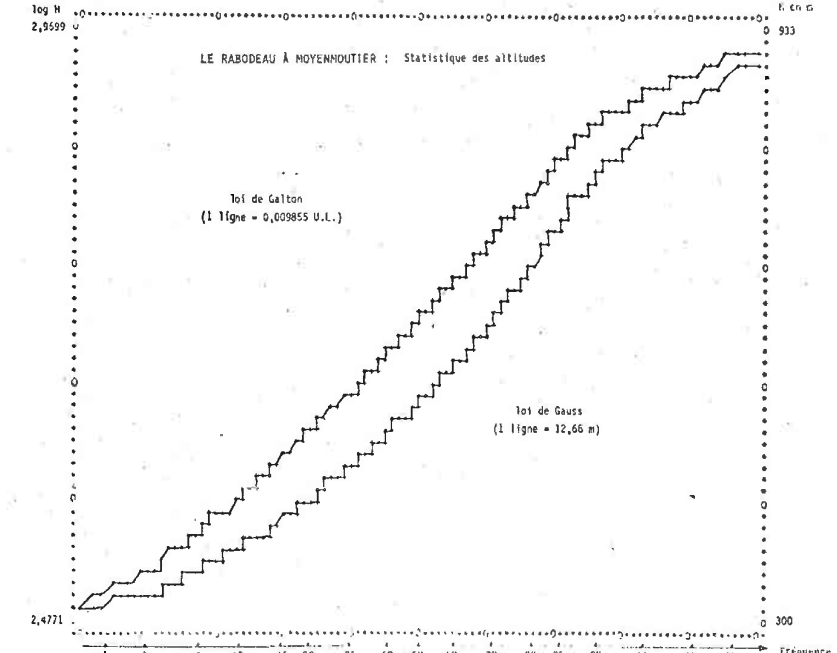
Indice de perméabilité ..... 82 %

Indice de dureté ..... 85 %


Altitude en m
933
300
LE RABODEAU À MOYENMOUTIER : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 12,66 m)
Pente calculée
0
20
40
60
80
100
Surface en %


0,5029
0,00538
LE RABODEAU À MOYENMOUTIER : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,0099)
0
20
40
60
80
100
Surface en %


log P
0,2995
P
0,5029
LE RABODEAU À MOYENMOUTIER : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,054 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,01006)
-3
0
1
2
5
10
15
20
25
40
50
60
70
80
85
90
95
98
99
Fréquence en %


log H
2,9599
933
LE RABODEAU À MOYENNOUTIER : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,009855 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 12,66 m)
2,4771
300
1
2
5
10
15
20
25
40
50
60
70
80
85
90
95
98
99
Fréquence en %

LE RABODEAU À LA PETITE RAON (AVAL)

Géométrie plane

- surface en km² 81,5
- périmètre en km 42,6
- coefficient de compacité 1,321
- longueur en km 16,3
- largeur en km 5,0
- nombre de points intérieurs 325

Altitudes

- altitude maximale en m 906
- altitude minimale en m 349
- intervalle de variation en m 557
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 452
- écart-type des altitudes en m 152,4

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,15722
- écart-type calculé σ_P 0,1132
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,93\ P_{calculée} - 0,0116$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,2918
- écart-type restitué σ_P 0,1981

. Ajustement à une loi de GALTON — bon

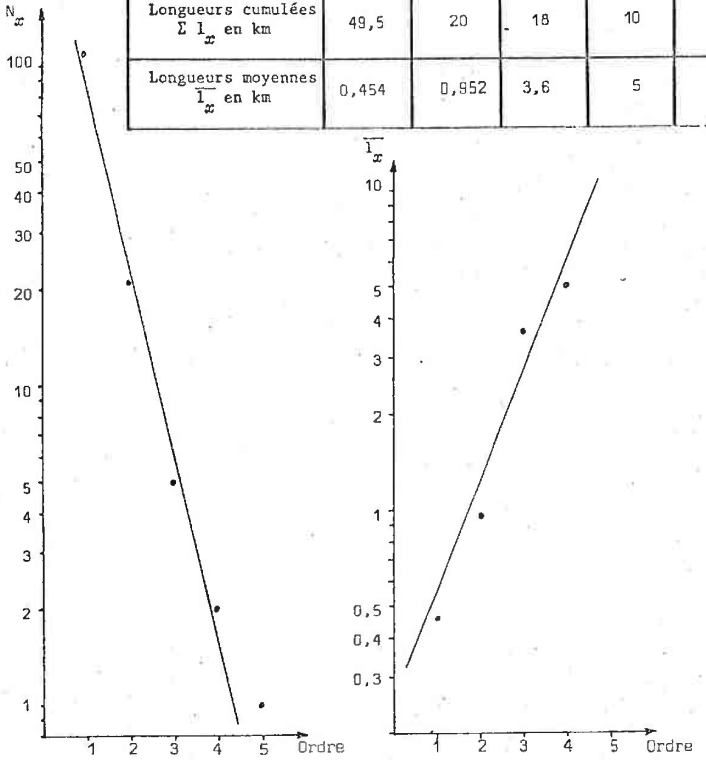
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,8982
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3482
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,27 \log P_{calculée} + 0,4700$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,6707
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4235

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,18274
- indice de pente global 0,02773
- dénivelée spécifique en m 250,3

LE RABODEAU À LA PETITE RAON (AVAL) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	109	21	5	2	1	138
Longueurs cumulées $\Sigma\ l_x$ en km	49,5	20	18	10	-	97,5
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,454	0,952	3,6	5	-	0,712

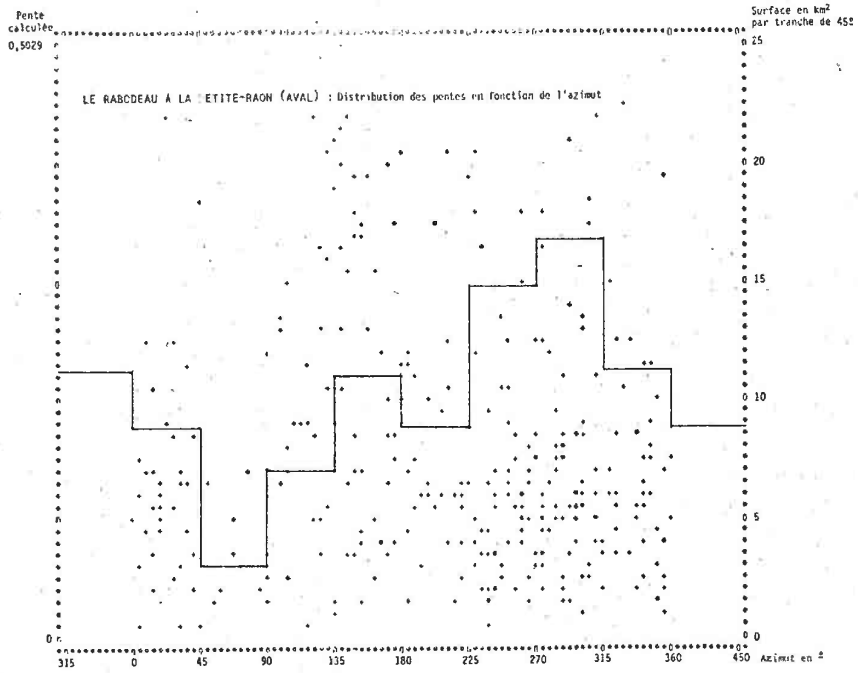


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,337\ km^{-2}$

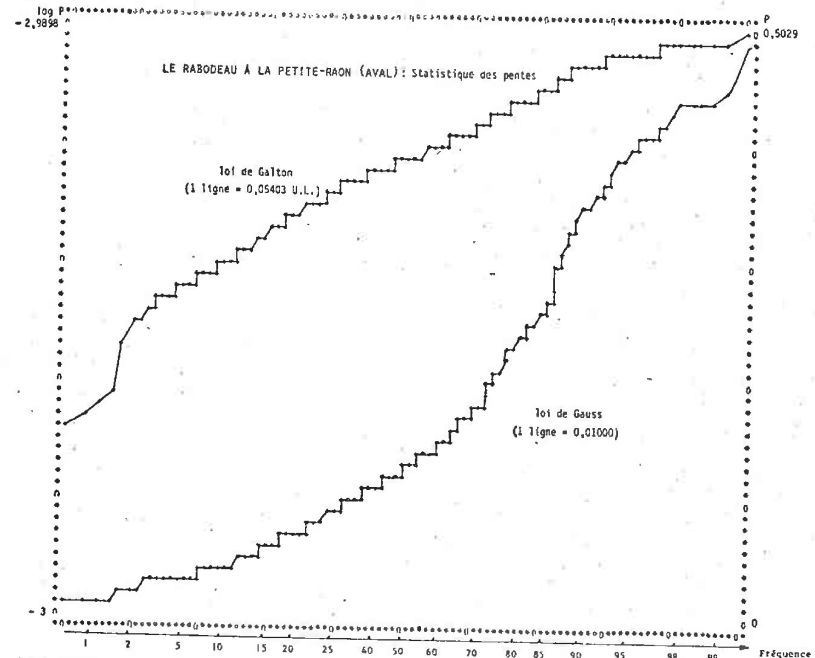
Densité de drainage : $D_d = 1,196\ km^{-1}$

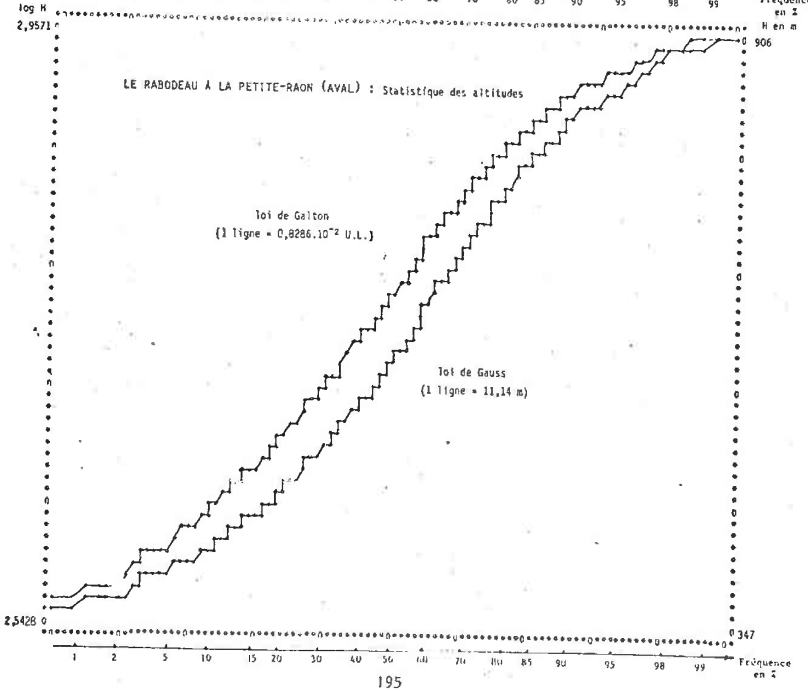
Rapport de confluence : $R_c = 3,9$

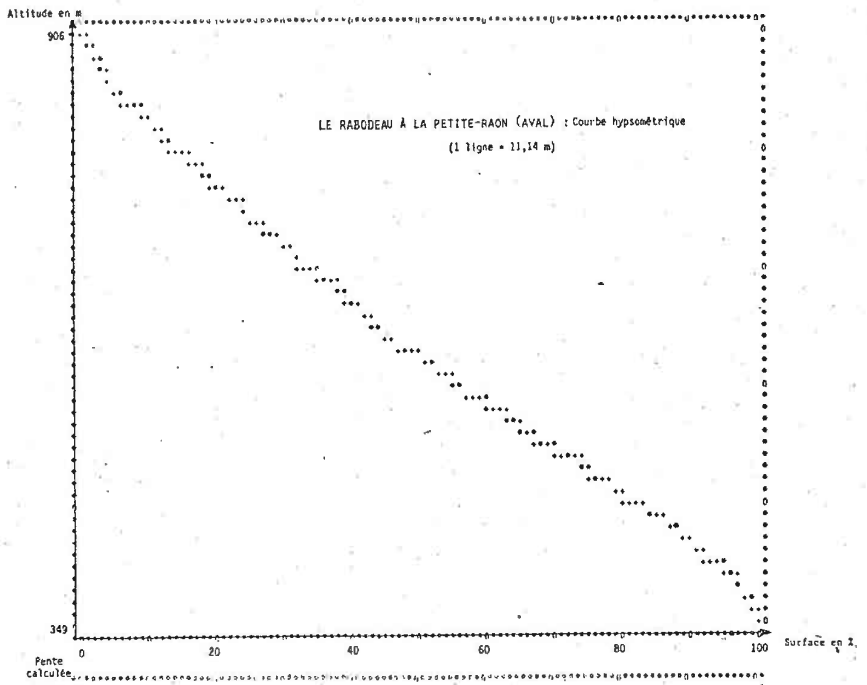
Rapport des longueurs : $R_l = 2,2$

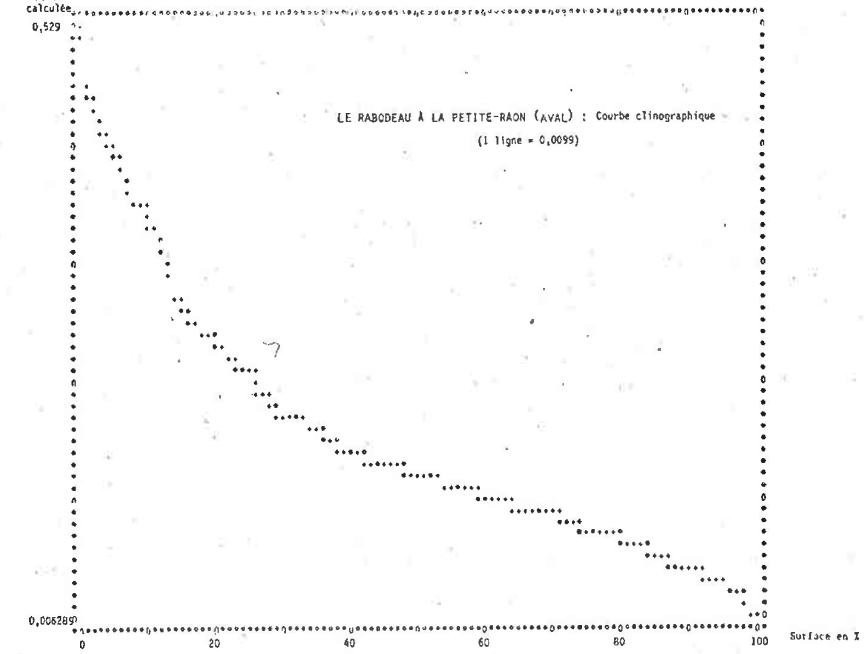


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	59 %
Socle cristallin et cristallophyllien	34 %
Indice de perméabilité	59 %
Indice de dureté	78 %









LE RABODEAU À LA PETITE RAON (AMONT)

Géométrie plane

- surface en km^2 46,2
- périmètre en km 33,0
- coefficient de compacité 1,358
- longueur en km 12,9
- largeur en km 3,6
- nombre de points intérieurs 185

Altitudes

- altitude maximale en m 906
- altitude minimale en m 349
- intervalle de variation en m 557
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 493
- écart-type des altitudes en m 172,5

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — moyen

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,19872
- écart-type calculé σ_P 0,1281
- droite de régression ..... $P_{réel} = 2,0\ P_{calculée} - 0,0273$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,3701
- écart-type restitué σ_P 0,2304

. Ajustement à une loi de GALTON — moyen

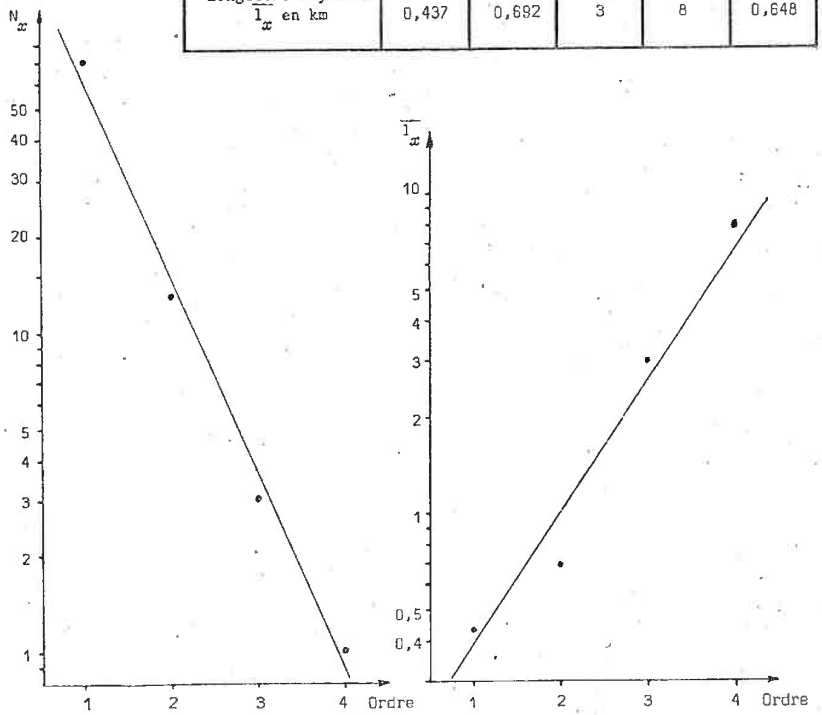
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -0,7648
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3272
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,61\ P_{calculée} + 0,675$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,5885
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4927

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,20423
- indice de pente global 0,03823
- dénivelée spécifique en m 259,8

LE RABODEAU À LA PETITE RAON (AMONT) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	71	13	3	1	88
Longueurs cumulées Σl_x en km	31	9	9	8	57
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,437	0,692	3	8	0,648

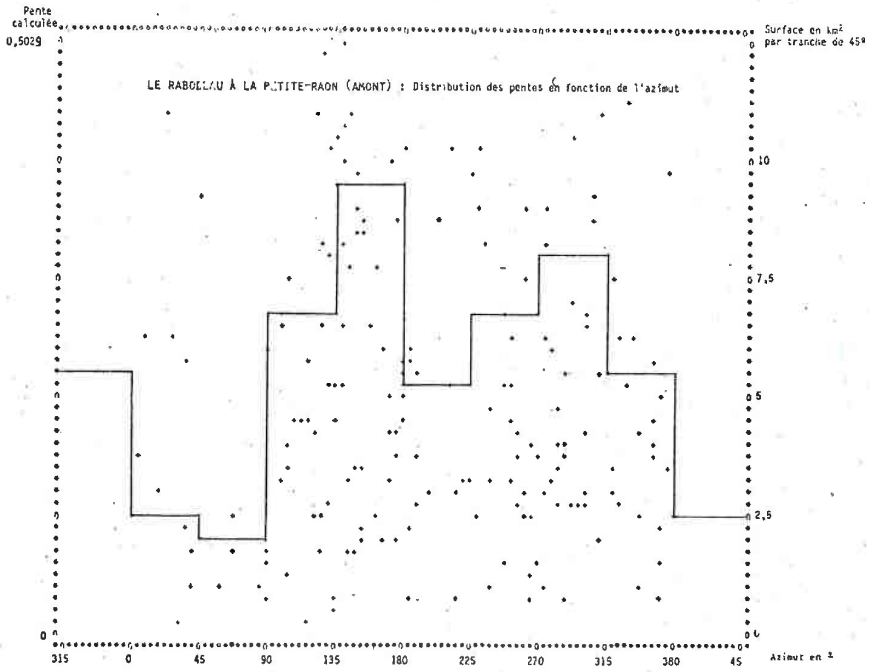


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,538\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1,905\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 4,1$

Rapport des longueurs : $R_l = 2,6$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur .....

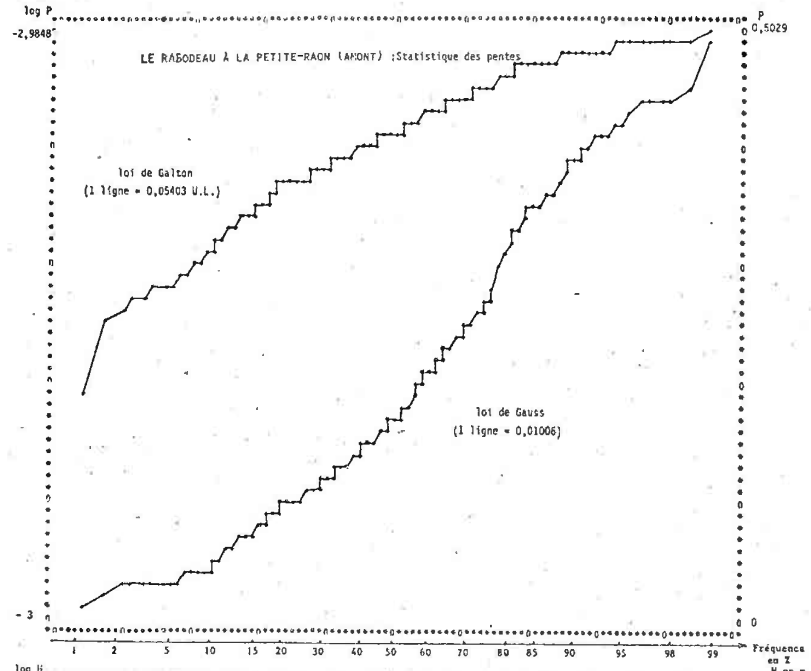
Muschelkalk moyen et inférieur .....

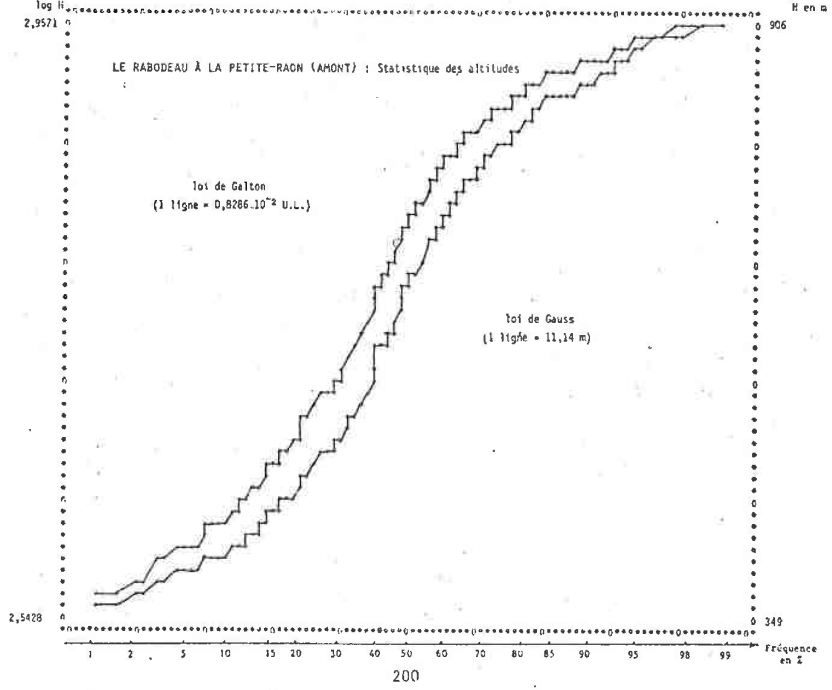
Buntsandstein et Permien ..... 100 %

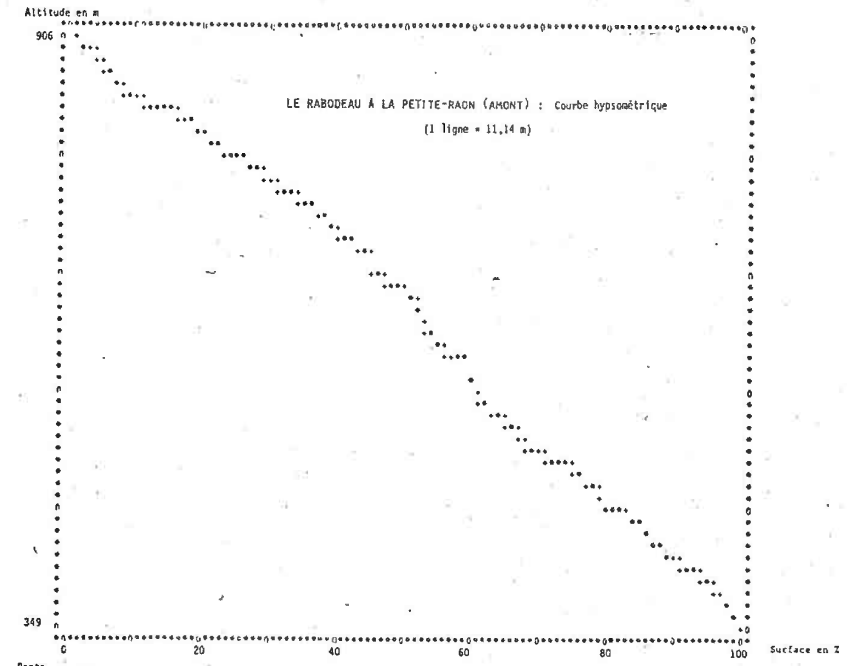
Socle cristallin et cristallophyllien .....

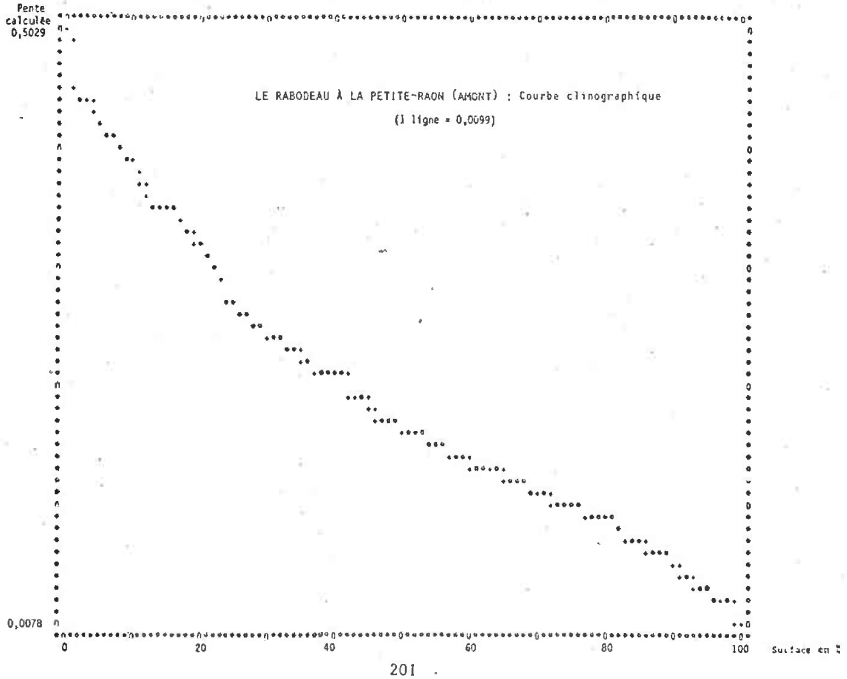
Indice de perméabilité ..... 100 %

Indice de dureté ..... 75 %


log P
-2,9848
P
0,5029
LE RABODEAU À LA PETITE-RAON (AMONT) :Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,05403 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,01006)
- 3
0
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,9571
906
LE RABODEAU À LA PETITE-RAON (AMONT) : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,8286.10⁻² U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 11,14 m)
2,5428
349
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %
H en m


Altitude en m
906
LE RABODEAU À LA PETITE-RAON (AMONT) : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 11,14 m)
349
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,5029
LE RABODEAU À LA PETITE-RAON (AMONT) : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,0099)
0,0078
0 20 40 60 80 100
Surface en %

LE RU À LA PETITE RAON

Géométrie plane

- surface en km² 35,3
- périmètre en km 26,0
- coefficient de compacité 1,224
- longueur en km 9,1
- largeur en km 3,9
- nombre de points intérieurs 140

Altitudes

- altitude maximale en m 817
- altitude minimale en m 349
- intervalle de variation en m 468
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 353
- écart-type des altitudes en m 111,8

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — bon

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,10237
- écart-type calculé σ_P 0,05224
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,44\ P_{calculée} + 0,0448$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,1922
- écart-type restitué σ_P 0,1125

. Ajustement à une loi de GALTON — médiocre

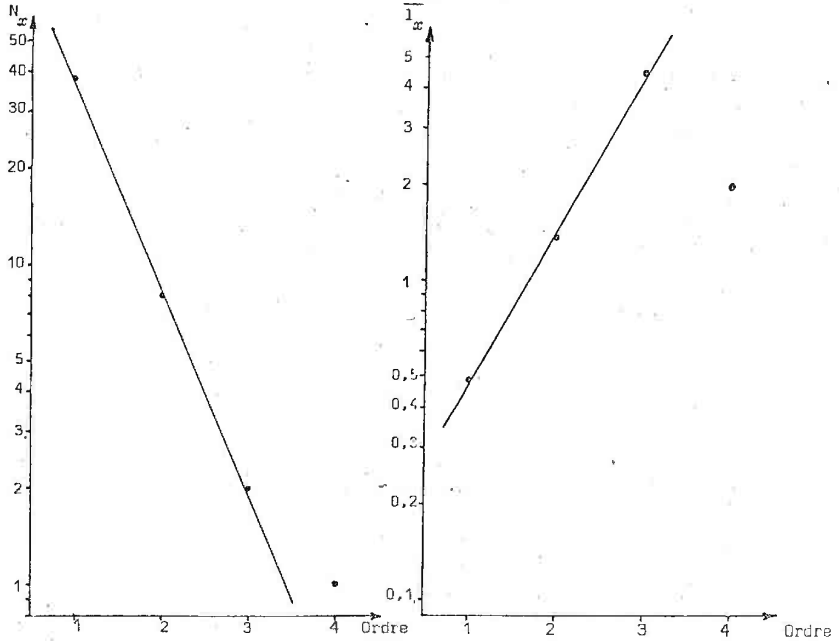
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,0556
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2486
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 0,911 \log P_{calculée} + 0,177$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -0,7847
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3076

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,21823
- indice de pente global 0,03873
- dénivelée spécifique en m 230

LE RU À LA PETITE RAON : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	38	8	2	1	49
Longueurs cumulées $\Sigma\ l_x$ en km	18,5	11	9	2	40,5
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,487	1,375	4,5	2	0,827

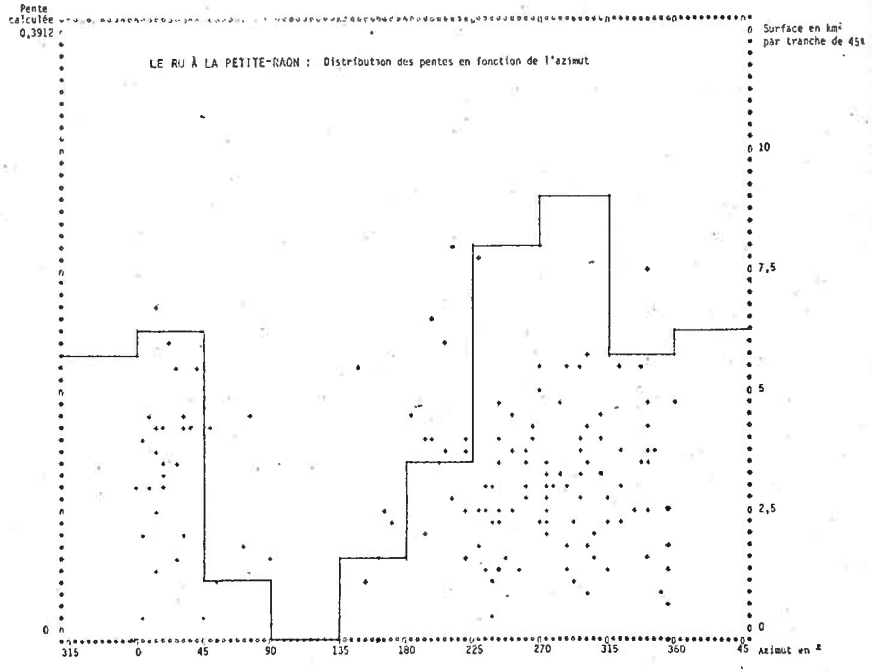


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,076\ km^{-2}$

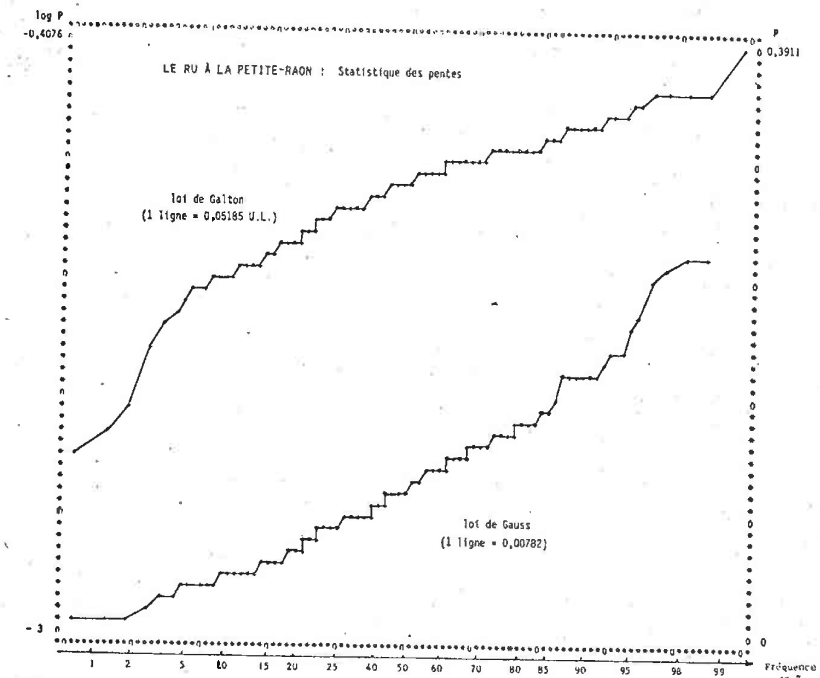
Densité de drainage : $D_d = 1,294\ km^{-1}$

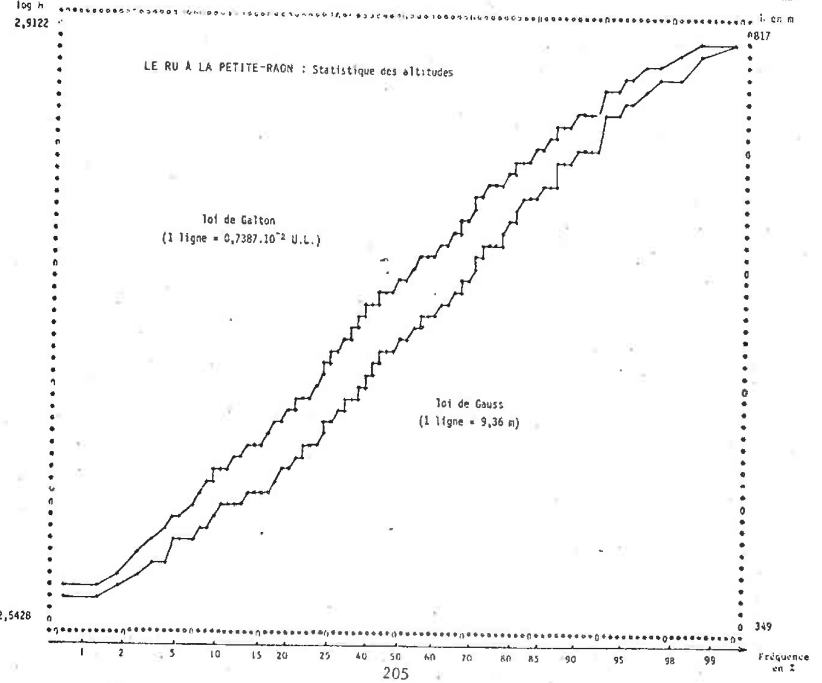
Rapport de confluence : $R_c = 4,4$

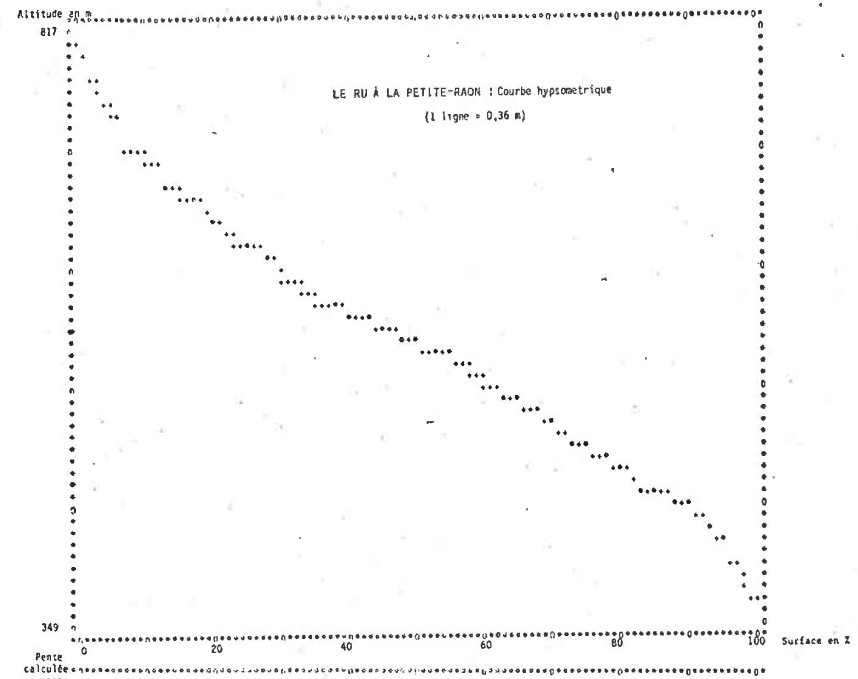
Rapport des longueurs : $R_l = 3,1$

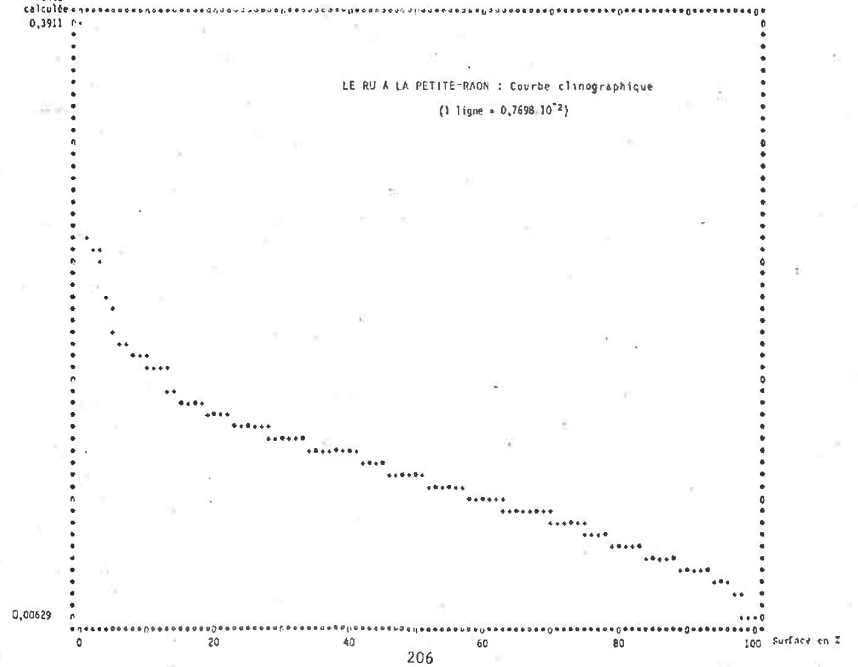


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	45 %
Socle cristallin et cristallophyllien	55 %
Indice de perméabilité	45 %
Indice de dureté	89 %

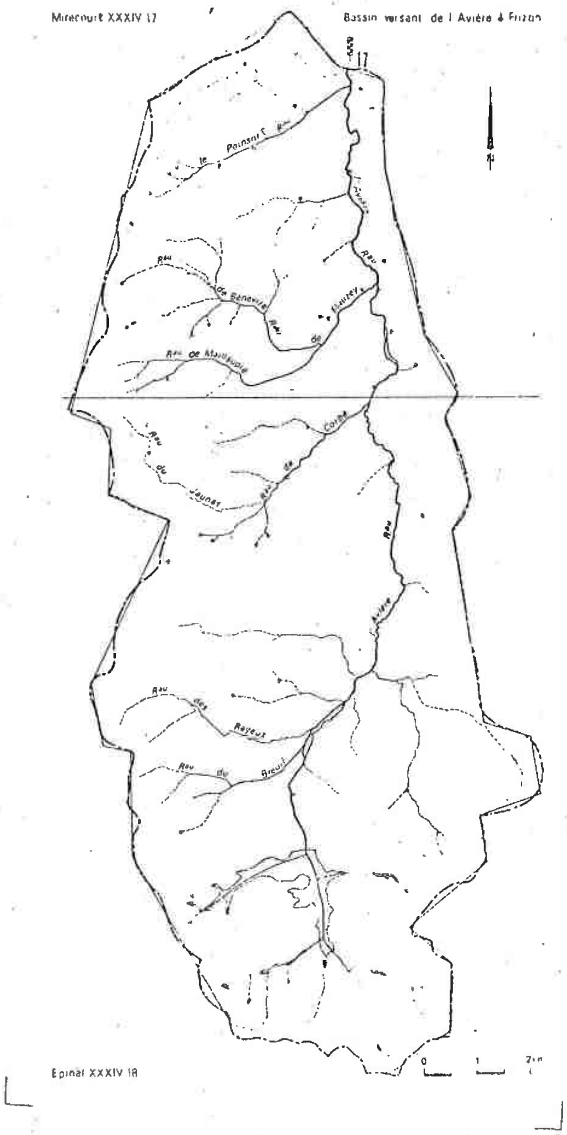








I - L'AVIERE À FRIZON



L'AVIÈRE À FRIZON

Géométrie plane

- surface en km² 105,4
- périmètre en km 49,3
- coefficient de compacité 1,344
- longueur en km 19,1
- largeur en km 5,5
- nombre de points intérieurs 425

Altitudes

- altitude maximale en m 466
- altitude minimale en m 290
- intervalle de variation en m 176
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 91
- écart-type des altitudes en m 24,9

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,03025
- écart-type calculé σ_P 0,01838
- droite de régression ..... $P_{réel} = 4,12\ P_{calculée} - 0,0486$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,08377
- écart-type restitué σ_P 0,08575

• Ajustement à une loi de GALTON — bon

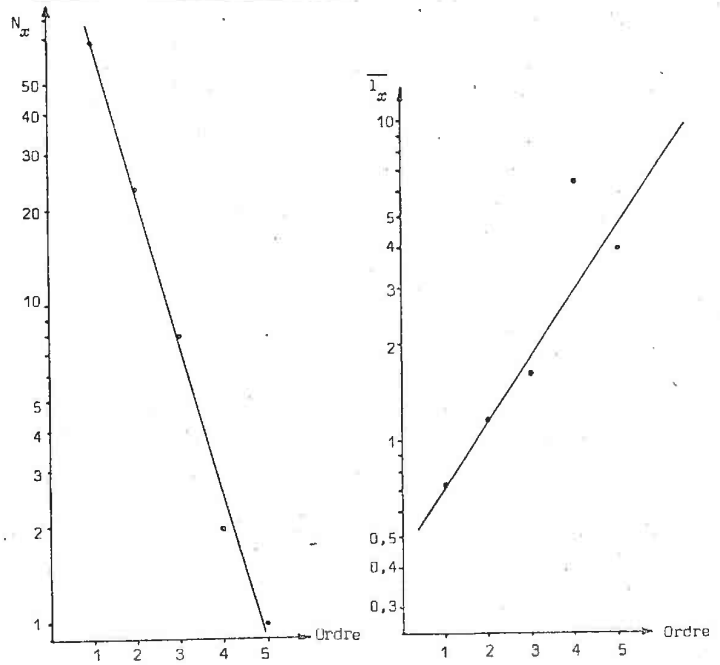
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,6062
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3838
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,42 \log P_{calculée} + 0,968$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,3128
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3975

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,08057
- indice de pente global 0,00475
- dénivelée spécifique en m 48,8

L'AVIÈRE À FRIZON : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	66	23	8	2	1	100
Longueurs cumulées $\Sigma\ l_x$ en km	48	25	13	13	4	103
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,73	1,180	1,620	6,5	4	1,03

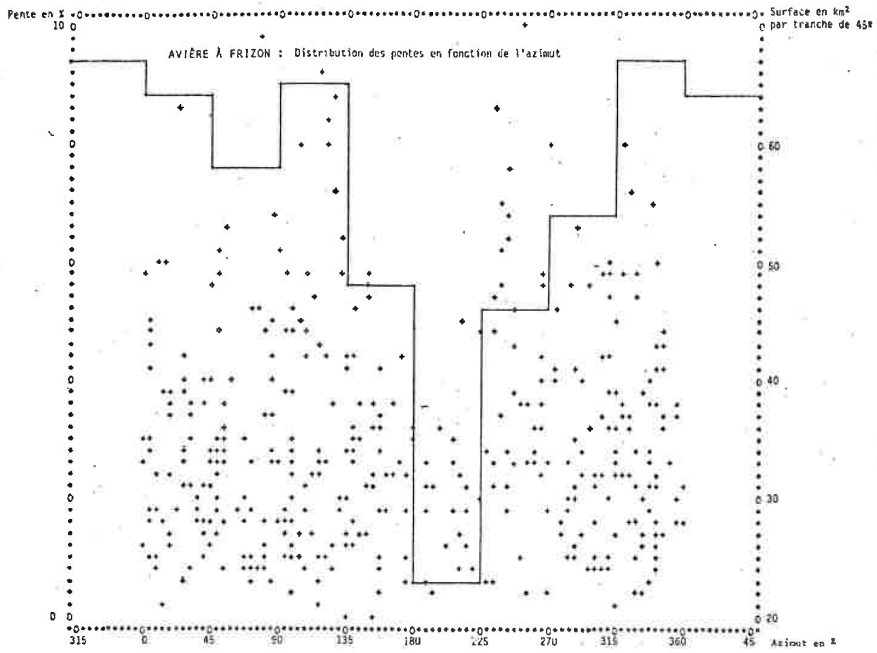


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,626\ km^{-2}$

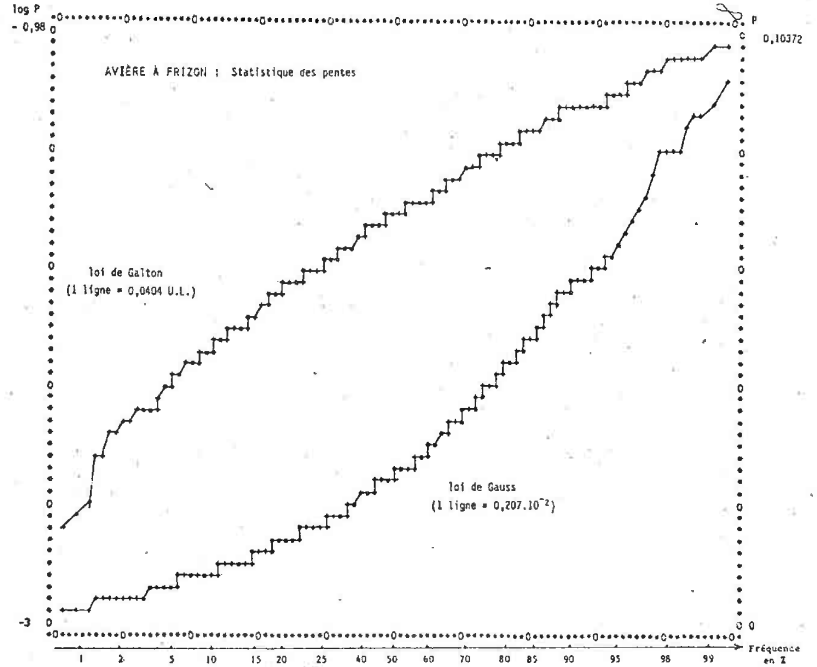
Densité de drainage : $D_d = 0,977\ km^{-1}$

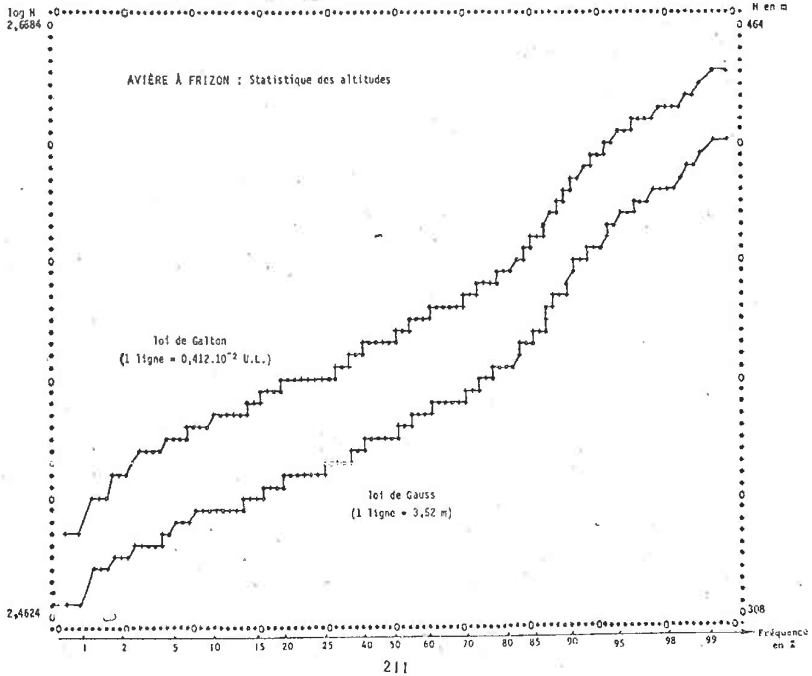
Rapport de confluence : $R_c = 3,0$

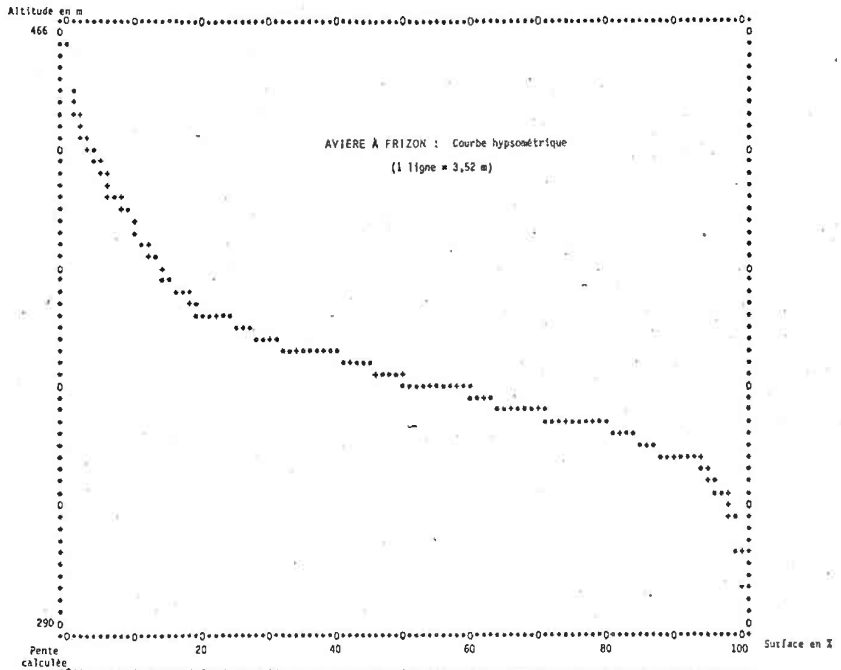
Rapport des longueurs : $R_l = 1,6$

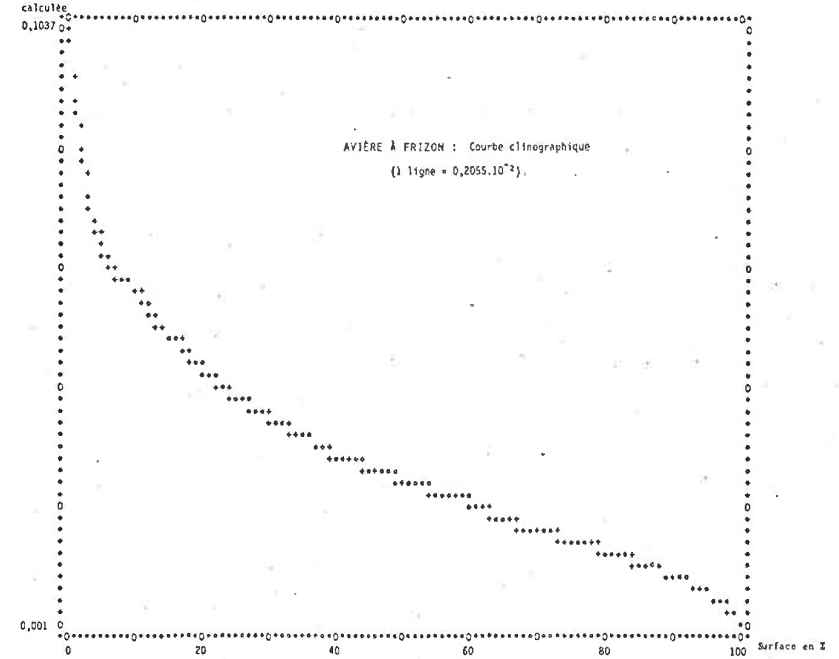


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	11 %
Muschelkalk supérieur	52 %
Muschelkalk moyen et inférieur	11 %
Buntsandstein et Permien	26 %
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	78 %
Indice de dureté	46 %

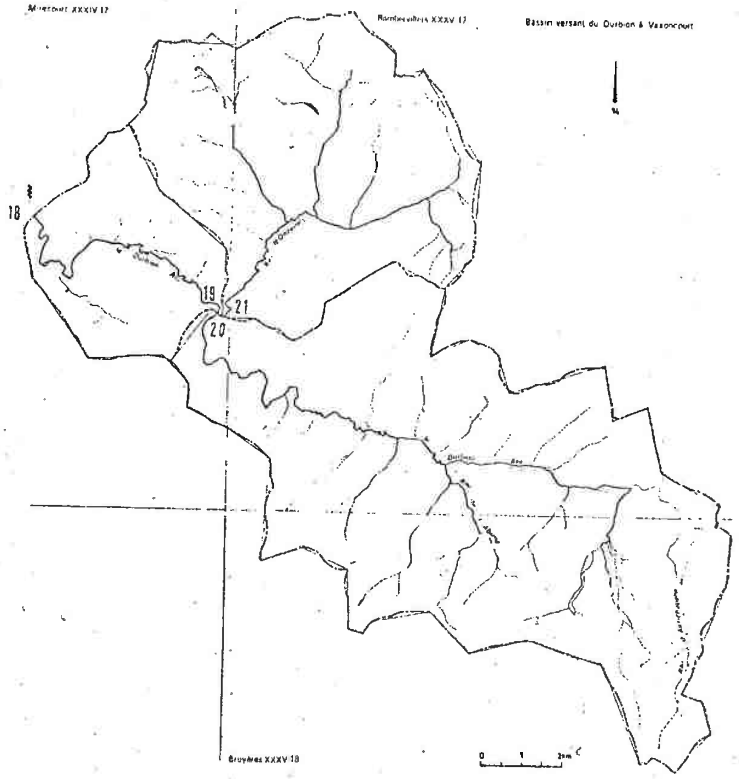








J - LE DURBION À VAXONCOURT ET SES BASSINS VERSANTS AMONTS



LE DURBION À VAXONCOURT

Géométrie plane

- surface en km² 151,7
- périmètre en km 68,5
- coefficient de compacité 1,559
- longueur en km 29,1
- largeur en km 5,2
- nombre de points intérieurs 601

Altitudes

- altitude maximale en m 585
- altitude minimale en m 293
- intervalle de variation en m 292
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 113
- écart-type des altitudes en m 27,1

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,02615
- écart-type calculé σ_P 0,01466
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,85\ P_{calculée} + 0,000785$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,04910
- écart-type restitué σ_P 0,03242

. Ajustement à une loi de GALTON — bon

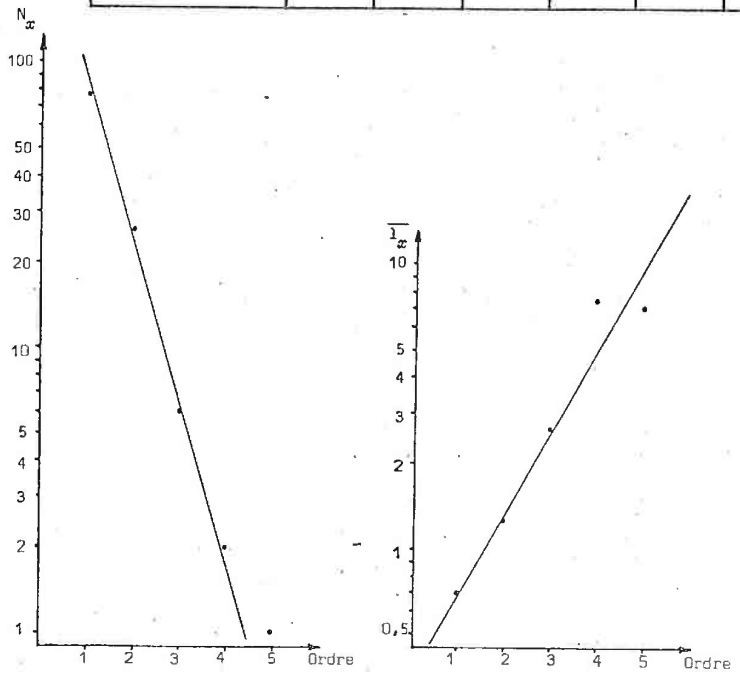
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... - 1,7157
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2863
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,07 \log P_{calculée} + 0,394$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,4419
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3494

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,07328
- indice de pente global 0,00389
- dénivelée spécifique en m 47,9

LE DURBION À VAXONCOURT : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	77	26	6	2	1	112
Longueurs cumulées Σl_x en km	54	33	16	15	7	125
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,701	1,269	2,667	7,500	7	1,116

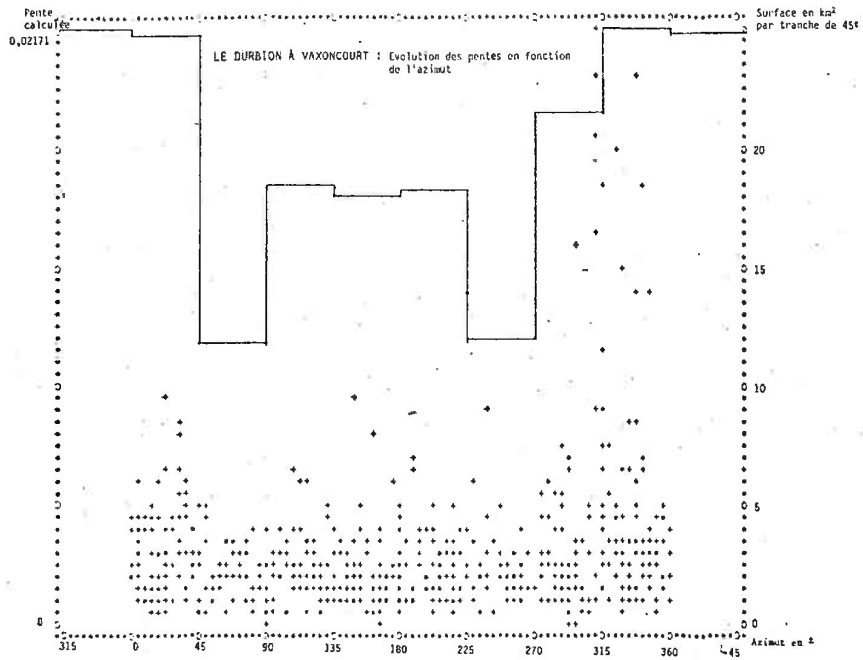


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,508\ km^{-2}$

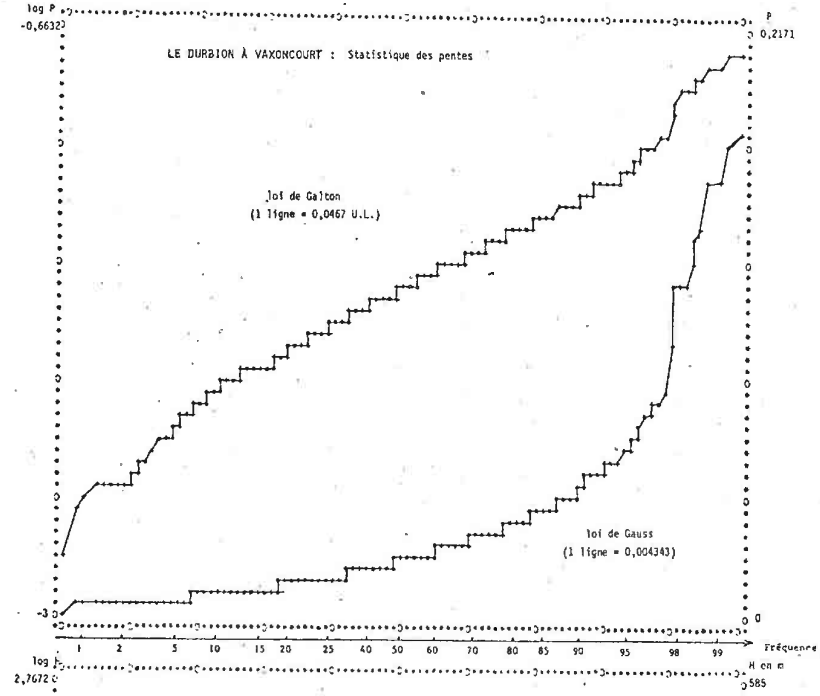
Densité de drainage : $D_d = 0,824\ km^{-1}$

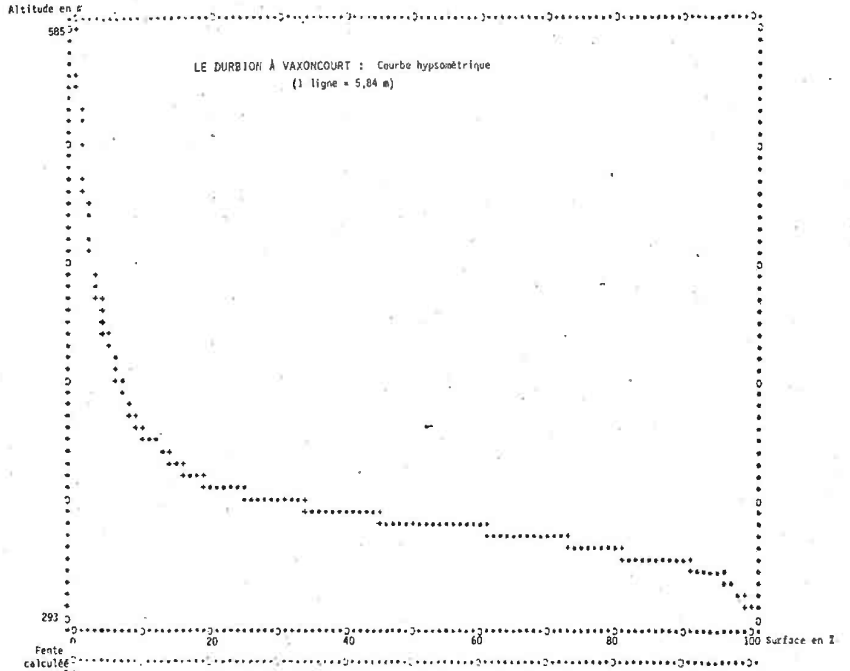
Rapport de confluence : $R_c = 3,8$

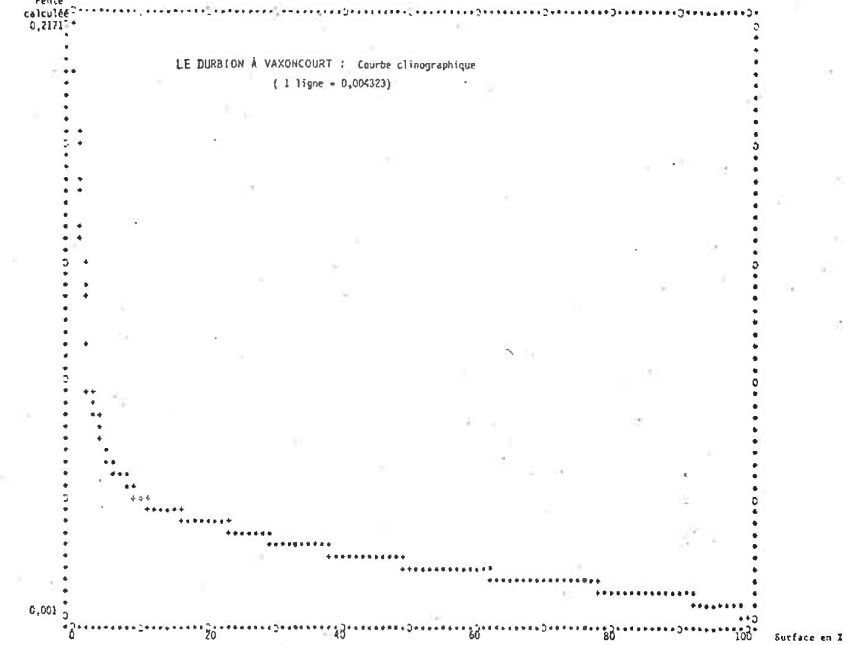
Rapport des longueurs : $R_l = 2,0$



Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	54 %
Muschelkalk moyen et inférieur	20 %
Buntsandstein et Permien	26 %
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	80 %
Indice de dureté	47 %







LE DURBION À DOMÈVRE (AVAL)

Géométrie plane

- surface en km² 133,8
- périmètre en km 66,6
- coefficient de compacité 1,613
- longueur en km 28,6
- largeur en km 4,7
- nombre de points intérieurs 532

Altitudes

- altitude maximale en m 585
- altitude minimale en m 310
- intervalle de variation en m 275
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 114
- écart-type des altitudes en m 34,6

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,02573
- écart-type calculé σ_P 0,01365
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,85\ P_{calculée} + 0,000887$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,04849
- écart-type restitué σ_P 0,03276

• Ajustement à une loi de GALTON — bon

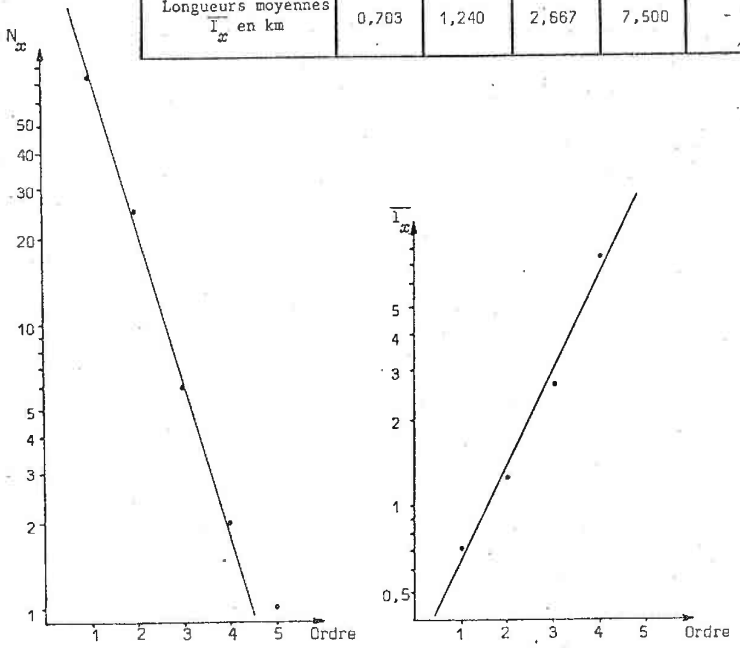
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,7149
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2828
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,10 \log P_{calculée} + 0,437$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,4494
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3520

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,07074
- indice de pente global 0,00398
- dénivelée spécifique en m 46

LE DURBION À DOMÈVRE (AVAL) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	74	25	6	2	1	108
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	52	31	16	15	0	114
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,703	1,240	2,667	7,500	-	1,056

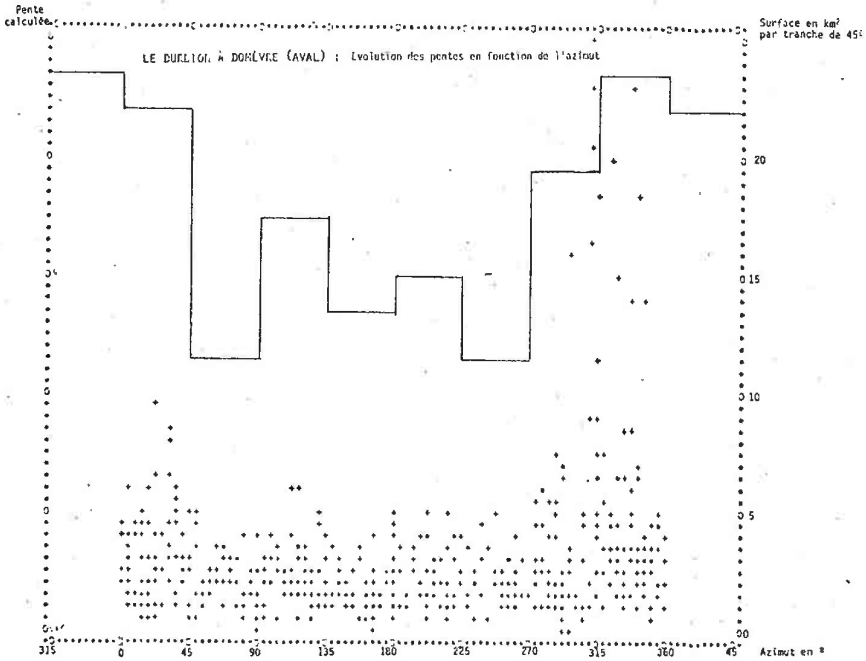


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0{,}553\ km^{-2}$

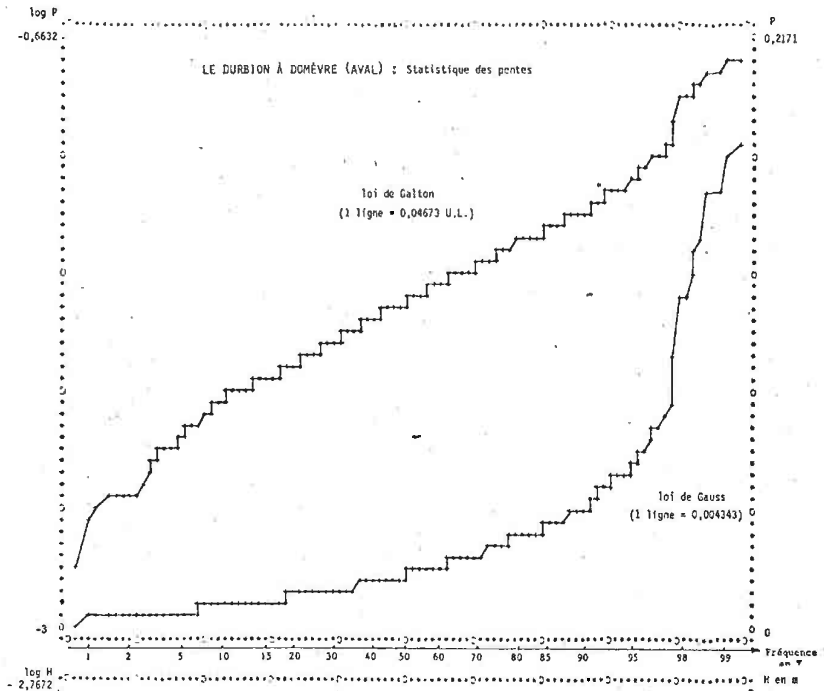
Densité de drainage : $D_d = 0{,}852\ km^{-1}$

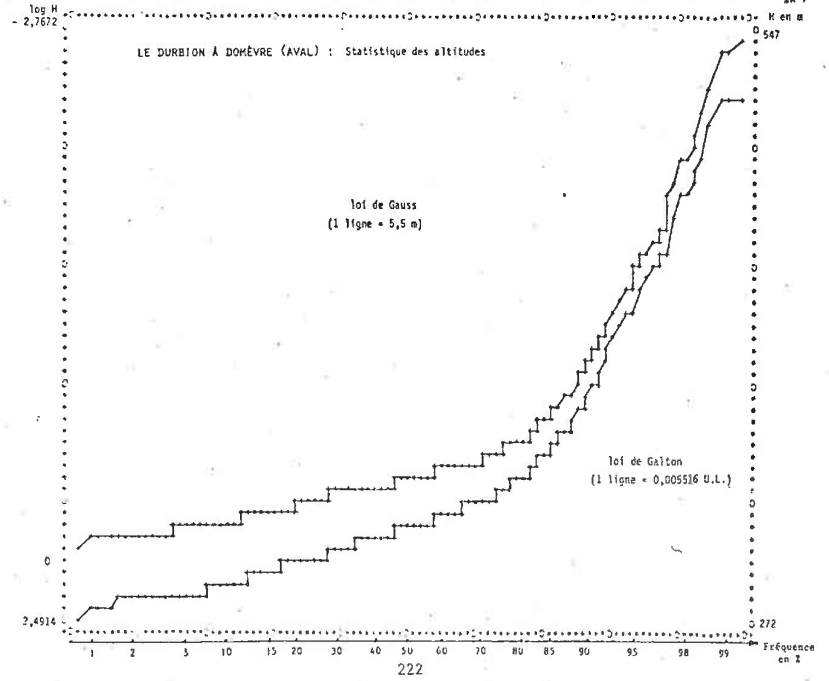
Rapport de confluence : $R_c = 3{,}4$

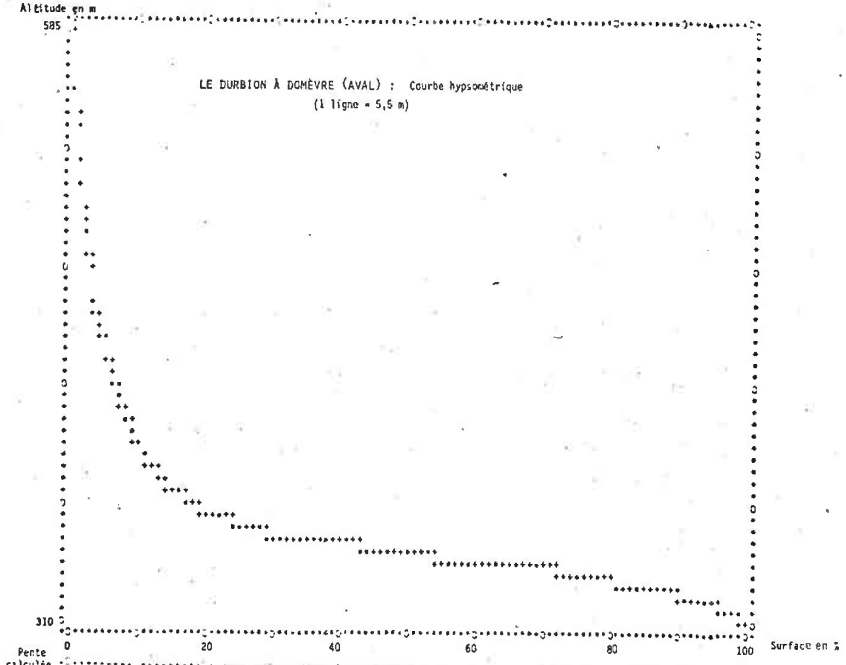
Rapport des longueurs : $R_l = 2{,}2$

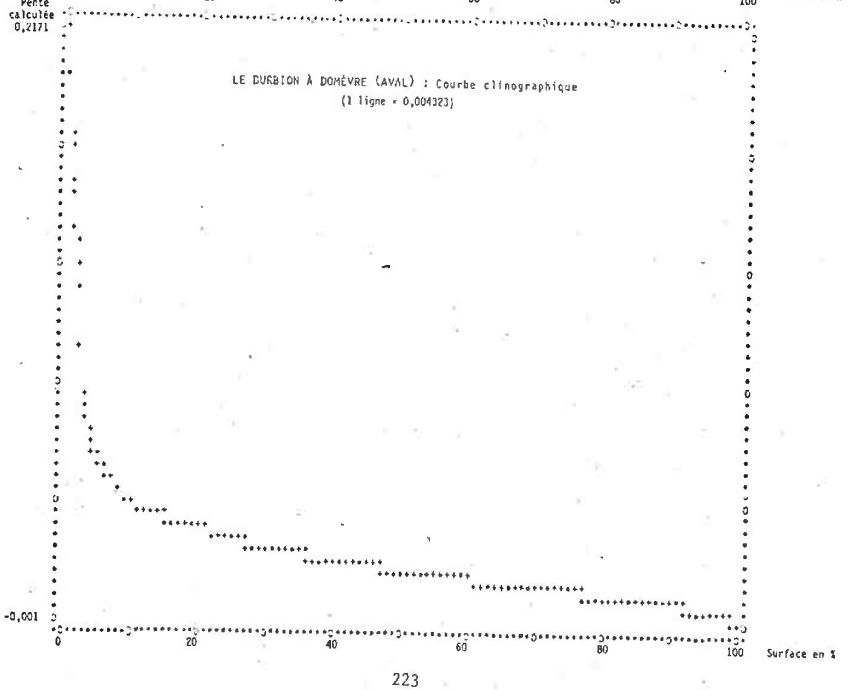


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	47 %
Muschelkalk moyen et inférieur	23 %
Buntsandstein et Permien	30 %
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	77 %
Indice de dureté	46 %


log P
-0,6632
P
0,2171
LE DURBION À DOMÈVRE (AVAL) : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,04673 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,004343)
-3
0
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,7672
H en m
547
LE DURBION À DOMÈVRE (AVAL) : Statistique des altitudes
loi de Gauss
(1 ligne = 5,5 m)
loi de Galton
(1 ligne = 0,005516 U.L.)
0
2,4914
272
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
585
LE DURBION À DOMÈVRE (AVAL) : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 5,5 m)
310
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,2171
LE DURBION À DOMÈVRE (AVAL) : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,004323)
-0,001
0 20 40 60 80 100
Surface en %

LE DURBION À DOMÈVRE (AMONT)

Géométrie plane

- surface en km^2 88,8
- périmètre en km 51,8
- coefficient de compacité 1,540
- longueur en km 21,9
- largeur en km 4,1
- nombre de points intérieurs 349

Altitudes

- altitude maximale en m 585
- altitude minimale en m 310
- intervalle de variation en m 275
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 135
- écart-type des altitudes en m 37,2

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,02766
- écart-type calculé σ_P 0,01741
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,87\ P_{calculée} - 0,0002$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,05152
- écart-type restitué σ_P 0,03783

• Ajustement à une loi de GALTON — bon

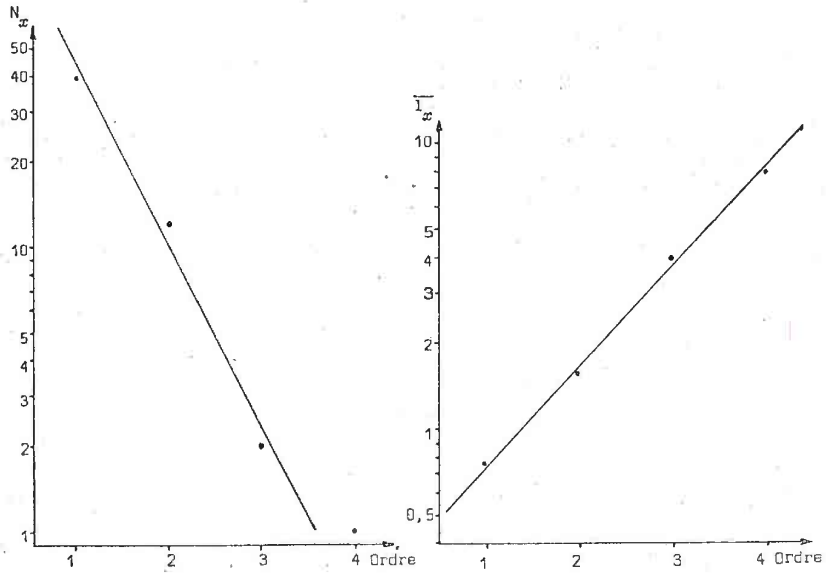
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,7149
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3012
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 0,994 \log P_{calculée} + 0,253$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,4516
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3448

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,08583
- indice de pente global 0,00618
- dénivelée spécifique en m 58,2

LE DURBION À DOMÈVRE (AMONT) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	39	12	2	1	54
Longueurs cumulées $\Sigma\ l_x$ en km	30	19	8	8	65
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,769	1,583	4	8	1,204

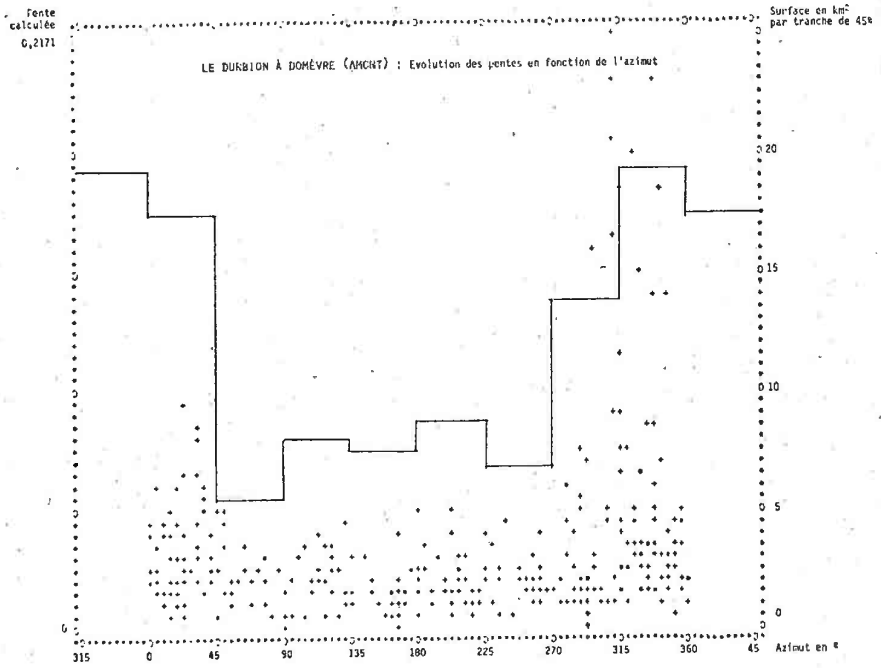


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,439\ km^{-2}$

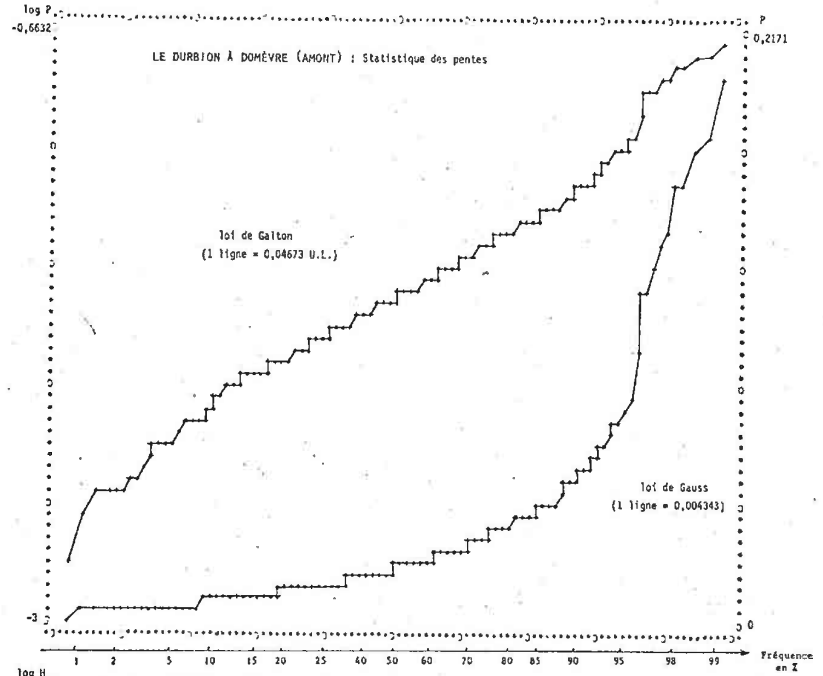
Densité de drainage : $D_d = 0,732\ km^{-1}$

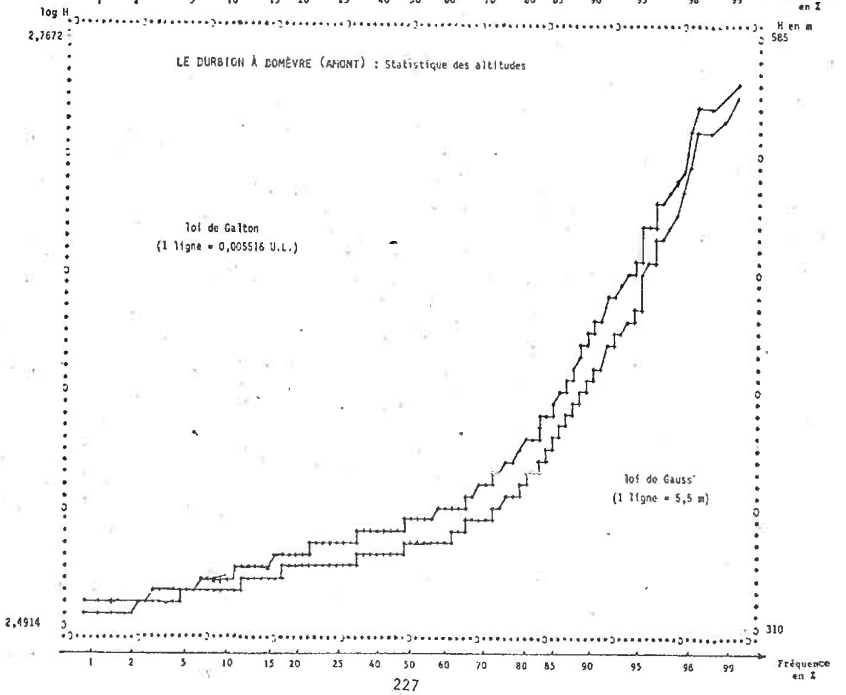
Rapport de confluence : $R_c = 4,4$

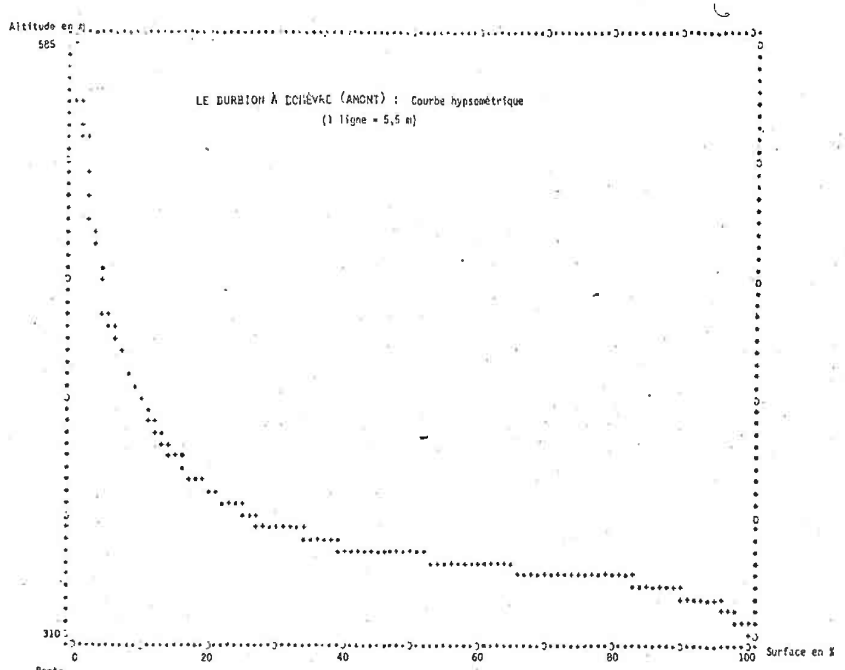
Rapport des longueurs : $R_l = 2,3$

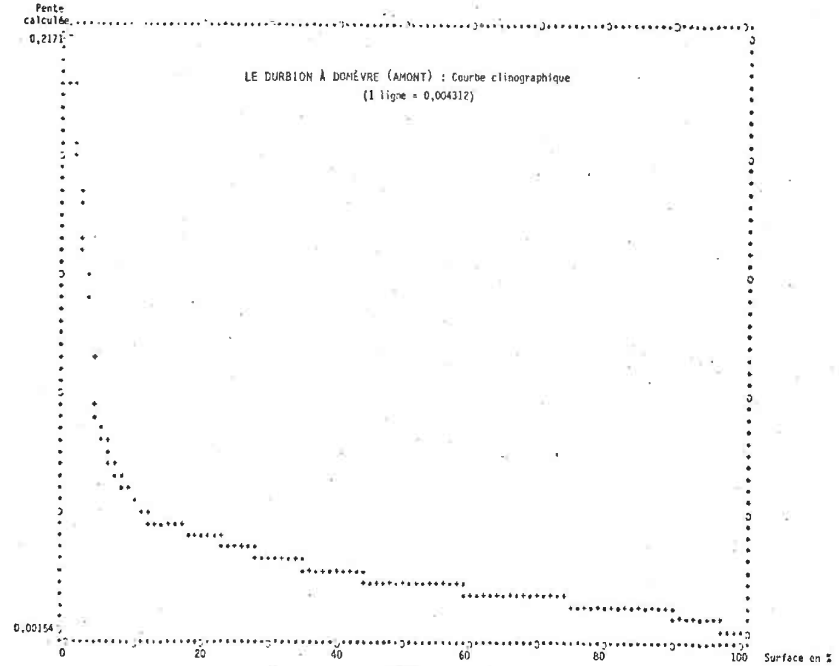


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	
Toarcien	
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	28 %
Muschelkalk moyen et inférieur	30 %
Buntsandstein et Permien	42 %
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	70 %
Indice de dureté	46 %









LE RUISSEAU D'ONZAINE À DOMÈVRE

Géométrie plane

- surface en km^2 44,2
- périmètre en km 27,6
- coefficient de compacité 1,170
- longueur en km 9,0
- largeur en km 4,9
- nombre de points intérieurs 179

Altitudes

- altitude maximale en m 369
- altitude minimale en m 310
- intervalle de variation en m 59
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 40
- écart-type des altitudes en m 12,7

Pentes mesurées et pentes calculées

- Ajustement à une loi de GAUSS médiocre
  - moyenne calculée $\overline{P}$ 0,02206
  - écart-type calculé σ_P 0,01097
  - droite de régression ..... $P_{réel} = 1,66\ P_{calculée} + 0,00602$
  - moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,04264
  - écart-type restitué σ_P 0,02156

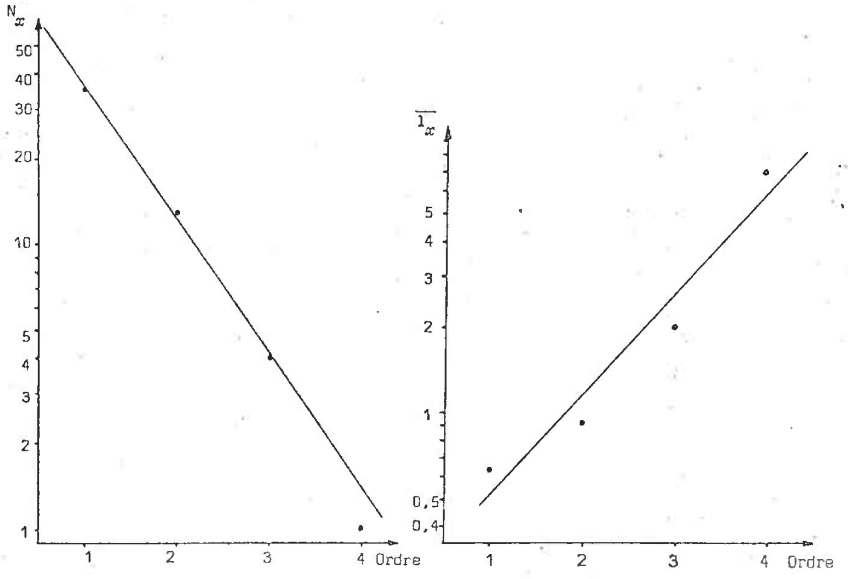
- Ajustement à une loi de GALTON bon
  - moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,7359
  - écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2533
  - droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,24 \log P_{calculée} + 0,676$
  - moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,4634
  - écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3680

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,07608
- indice de pente global 0,00446
- dénivelée spécifique en m 29,6

LE RUISSEAU D'ONZAINE À DOMÈVRE : Caractéristiques du réseau hydrographique.

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	35	13	4	1	53
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	22	12	8	7	49
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,629	0,923	2	7	0,925

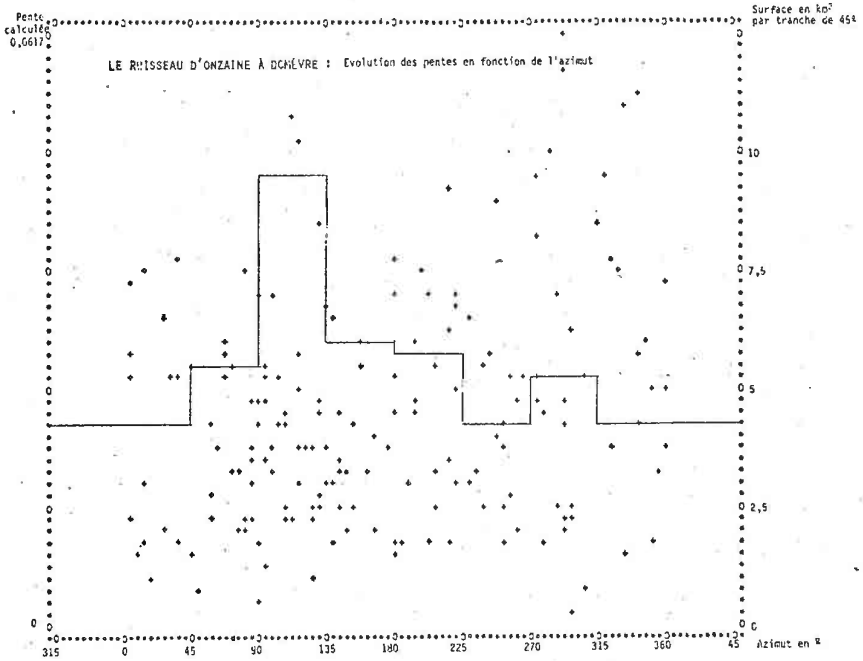


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0{,}792\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1{,}109\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 2{,}9$

Rapport des longueurs : $R_l = 2{,}3$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur ..... 93 %

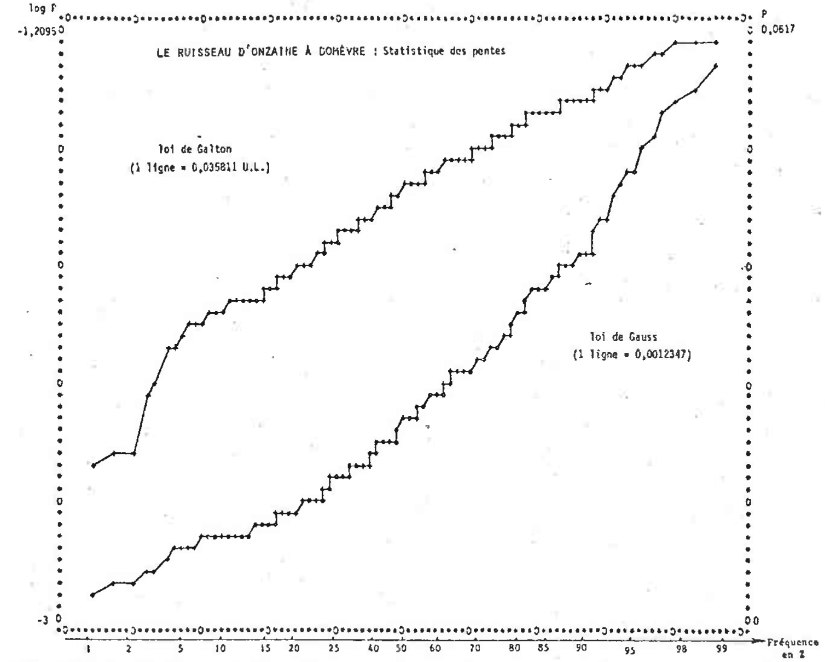
Muschelkalk moyen et inférieur ..... 7 %

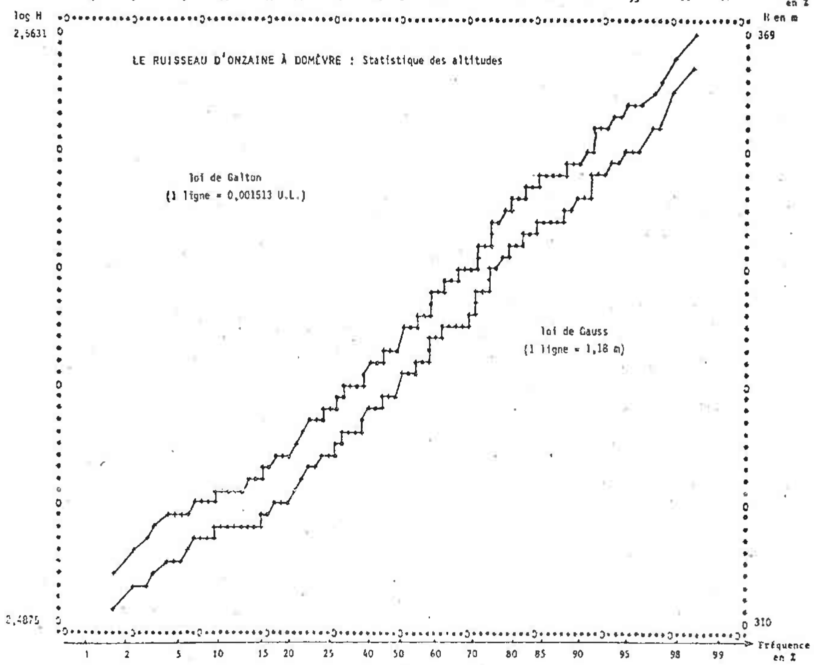
Buntsandstein et Permien .....

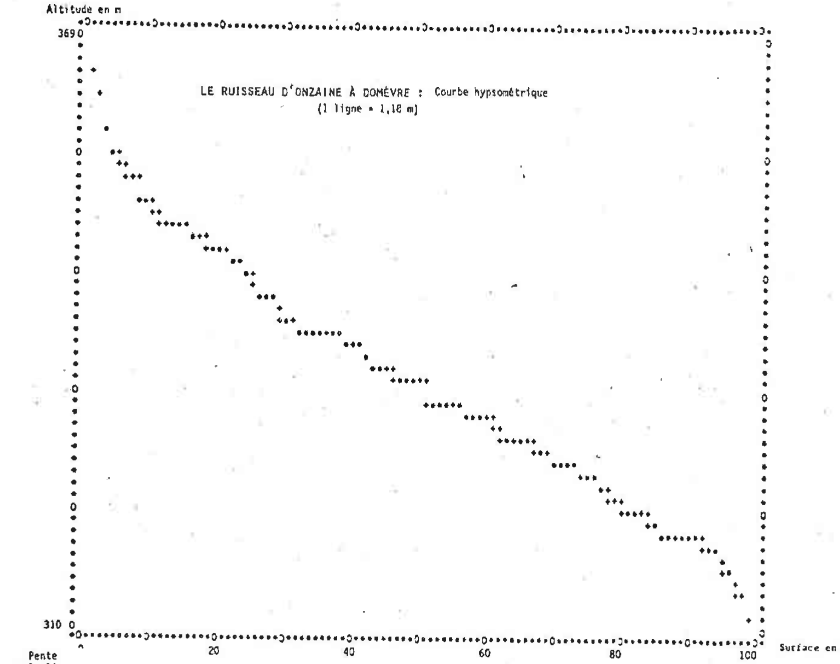
Socle cristallin et cristallophyllien .....

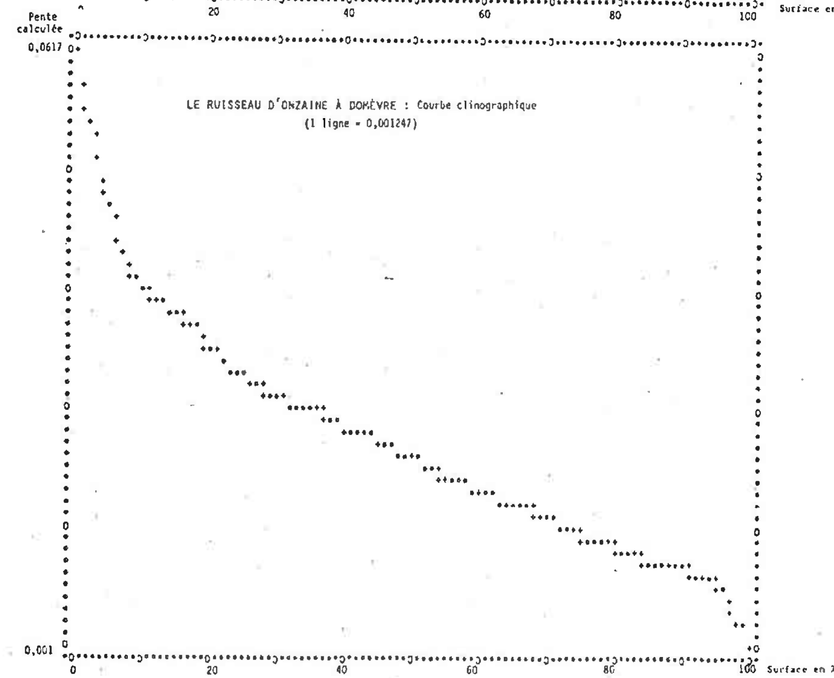
Indice de perméabilité ..... 93 %

Indice de dureté ..... 47 %

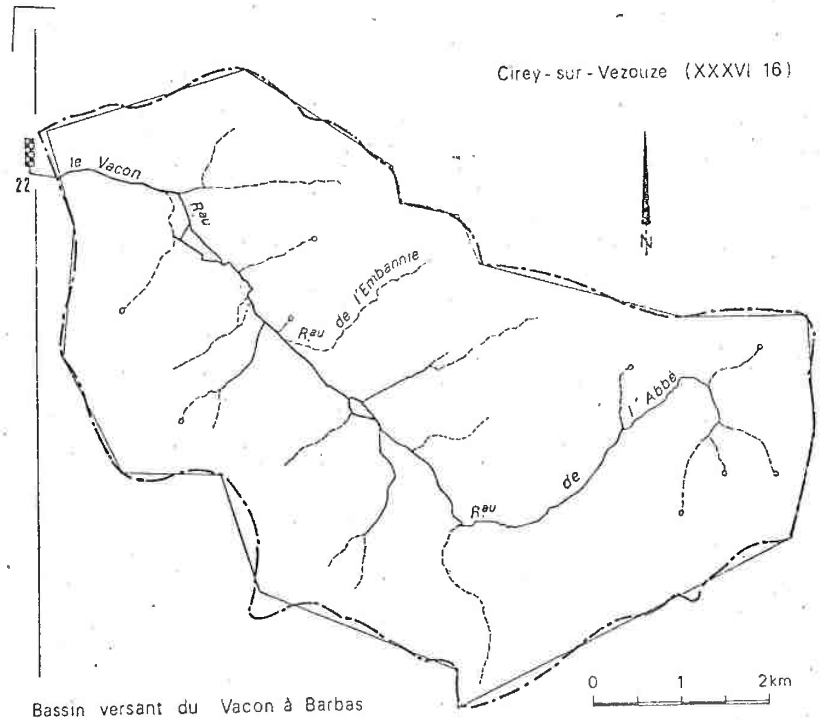

LE RUISSEAU D'ONZAINE À DOMÈVRE : Statistique des pentes
log P
-1,2095
-3
P
0,0617
0
loi de Galton
(1 ligne = 0,035811 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,0012347)
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


LE RUISSEAU D'ONZAINE À DOMÈVRE : Statistique des altitudes
log H
2,5631
2,4875
H en m
369
310
loi de Galton
(1 ligne = 0,001513 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 1,18 m)
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
369
310
LE RUISSEAU D'ONZAINE À DOMÈVRE : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 1,18 m)
20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,0617
0,001
LE RUISSEAU D'ONZAINE À DOMÈVRE : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,001247)
0 20 40 60 80 100
Surface en %

K - LE VACON À BARBAS



Bassin versant du Vacon à Barbas

Géométrie plane

- surface en km^2 35,0
- périmètre en km 25,8
- coefficient de compacité 1,222
- longueur en km 9,0
- largeur en km 3,9
- nombre de points intérieurs 140

Altitudes

- altitude maximale en m 430
- altitude minimale en m 250
- intervalle de variation en m 180
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 95
- écart-type des altitudes en m 28,3

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — moyen

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,03300
- écart-type calculé σ_P 0,01867
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,37\ P_{calculée} + 0,00556$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,05077
- écart-type restitué σ_P 0,04008

. Ajustement à une loi de GALTON — moyen

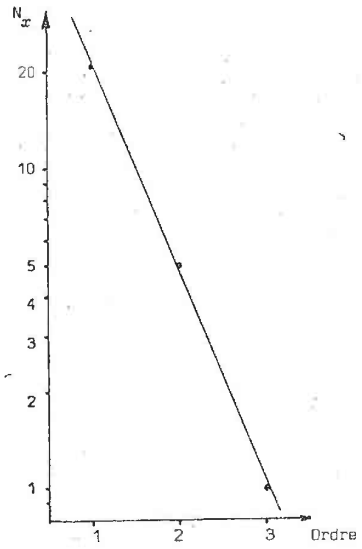
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,5874
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2064
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 2 \log P_{calculée} + 1,57$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,6047
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,5097

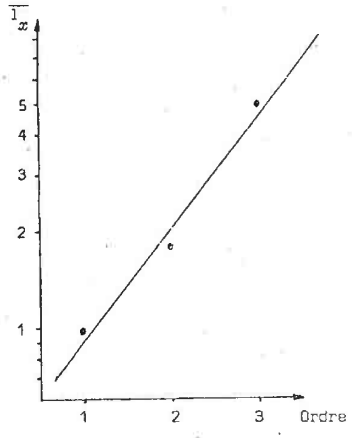
Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,11708
- indice de pente global 0,01052
- dénivelée spécifique en m 62,2

LE VACON À BARBAS : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau			TOTAL
	1	2	3	
Nombre N_x	21	5	1	27
Longueurs cumulées l_x en km	20,5	9 -	5	34,5
Longueurs moyennes $\Sigma \overline{l_x}$ en km	0,976	1,800	5,000	1,278



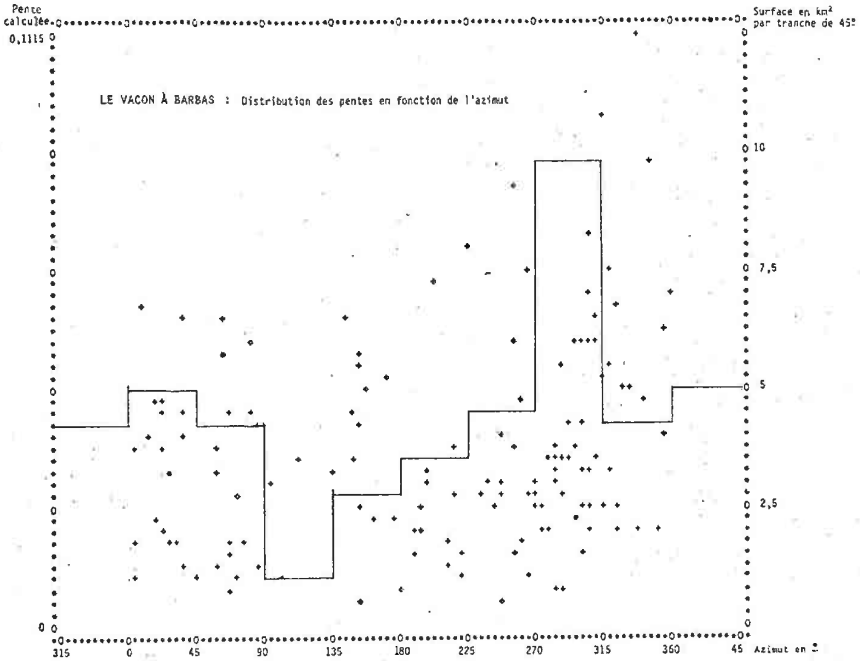


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,600\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 0,986\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 4,5$

Rapport des longueurs : $R_l = 2,2$



LE VACON À BARBAS : Distribution des pentes en fonction de l'azimut

Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle .....

Muschelkalk supérieur ..... 16 %

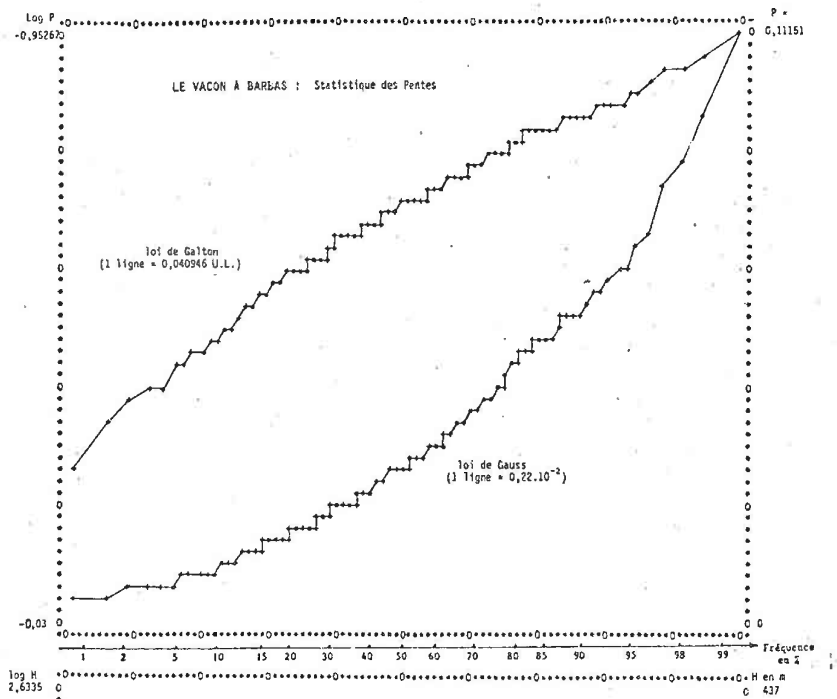
Muschelkalk moyen et inférieur ..... 36 %

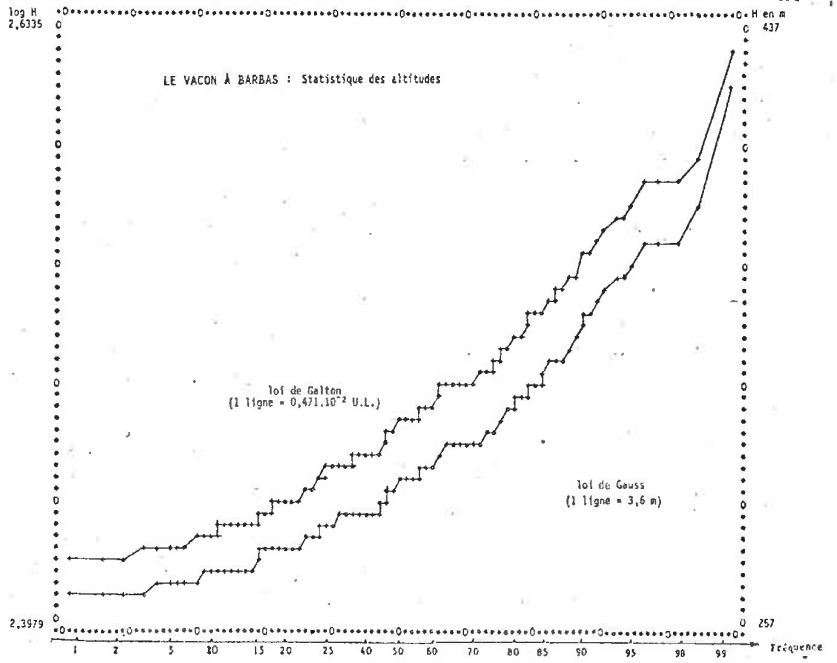
Buntsandstein et Permien ..... 48 %

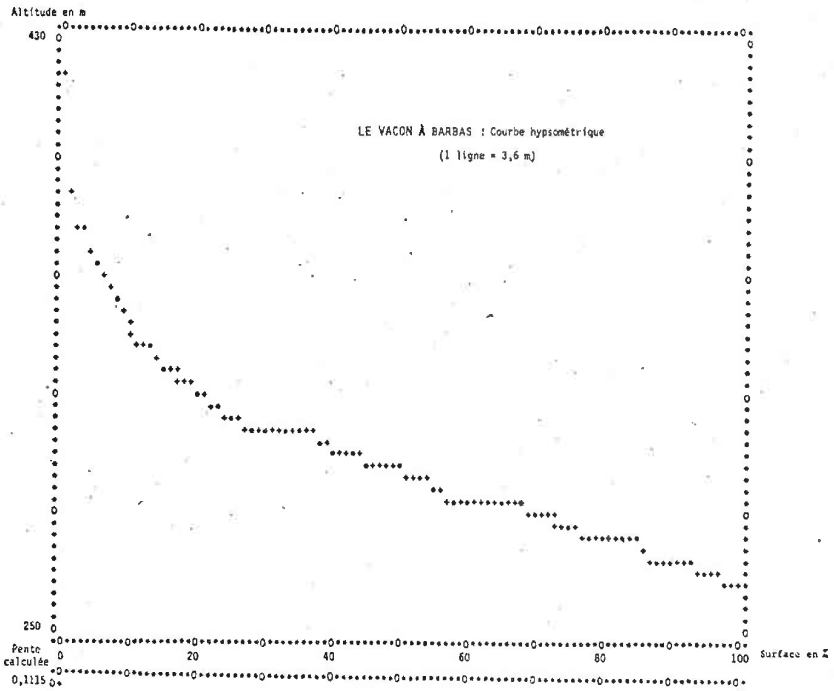
Socle cristallin et cristallophyllien .....

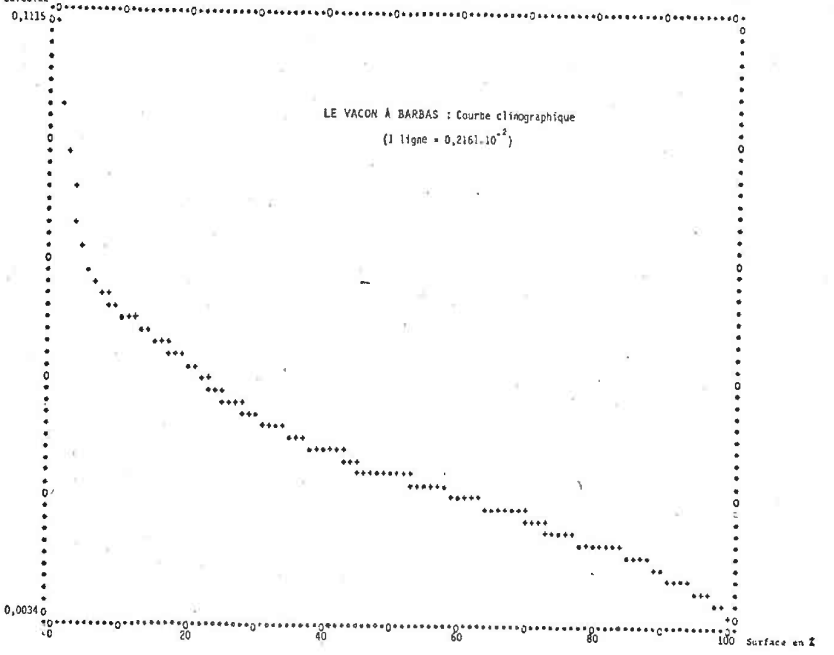
Indice de perméabilité ..... 64 %

Indice de dureté ..... 44 %

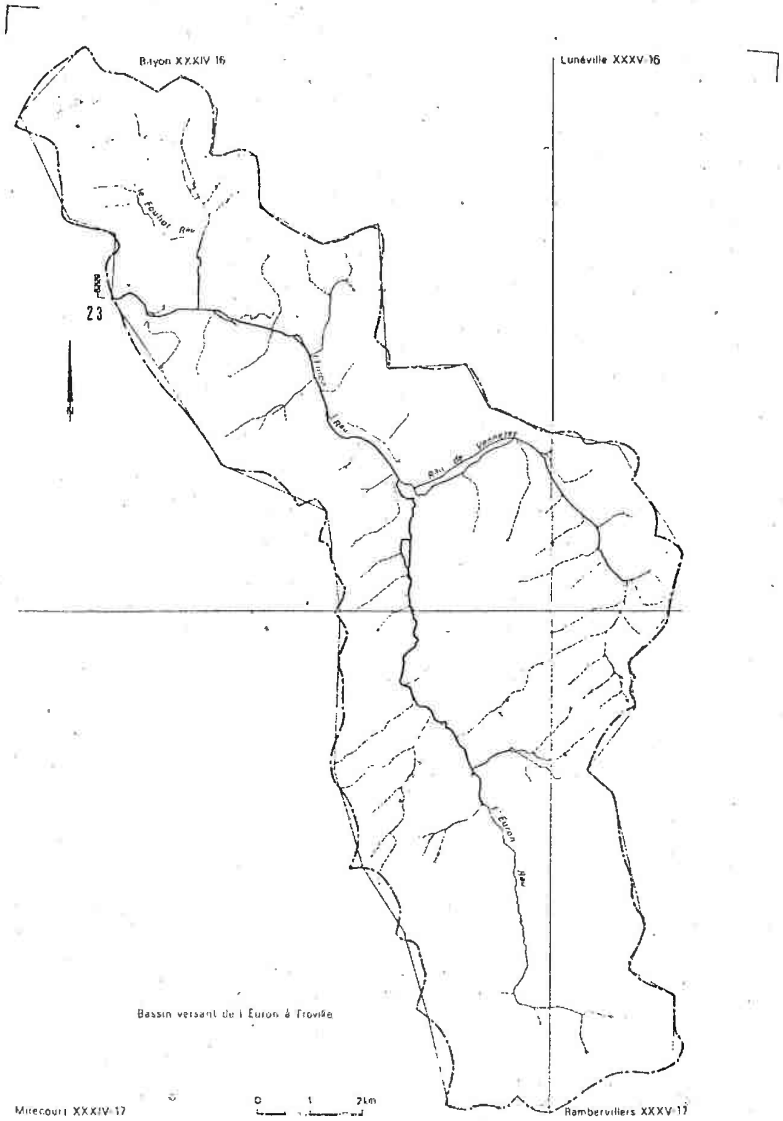

Log P
-0,952670
P =
0,11151
LE VACON À BARBAS : Statistique des Pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,040946 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,22.10⁻²)
-0,03
0
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,6335
H en m
437
LE VACON À BARBAS : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,471.10⁻² U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 3,6 m)
2,3979
257
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence


Altitude en m
430
LE VACON À BARBAS : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 3,6 m)
250
Pente calculée
0,1115
0 20 40 60 80 100
Surface en %


LE VACON À BARBAS : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,2161.10⁻²)
0,0034
0 20 40 60 80 100
Surface en %

L - L'EURON À FROVILLE



L'EURON À FROVILLE

Géométrie plane

- surface en km^2 92,5
- périmètre en km 56,0
- coefficient de compacité 1,631
- longueur en km 24,2
- largeur en km 3,8
- nombre de points intérieurs 369

Altitudes

- altitude maximale en m 420
- altitude minimale en m 250
- intervalle de variation en m 170
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 93
- écart-type des altitudes en m 32,1

Pentes mesurées et pentes calculées

- Ajustement à une loi de GAUSS médiocre
  - moyenne calculée $\overline{P}$ 0,02941
  - écart-type calculé σ_P 0,01906
  - droite de régression ..... $P_{réel} = 2,56\ P_{calculée} - 0,00893$
  - moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,05636
  - écart-type restitué σ_P 0,05353

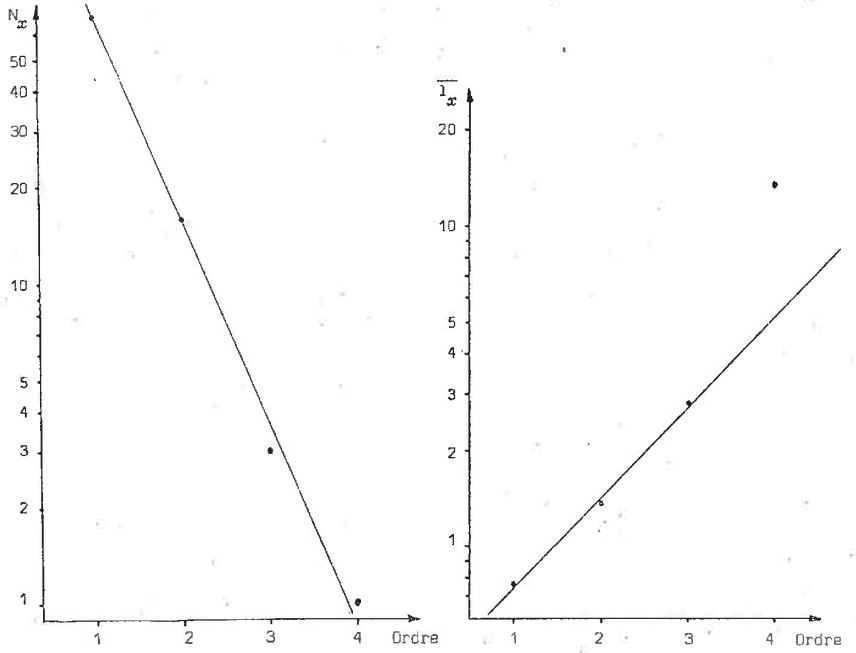
- Ajustement à une loi de GALTON Bon
  - moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,6273
  - écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,2937
  - droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,34 \log P_{calculée} + 0,85$
  - moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,3305
  - écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4072

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,07286
- indice de pente global 0,00384
- dénivelée spécifique en m 36,9

L'EURON À FROVILLE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	69	16	3	1	89
Longueurs cumulées Σl_x en km	53	22	8,5	13,5	97
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,768	1,375	2,833	13,500	1,090

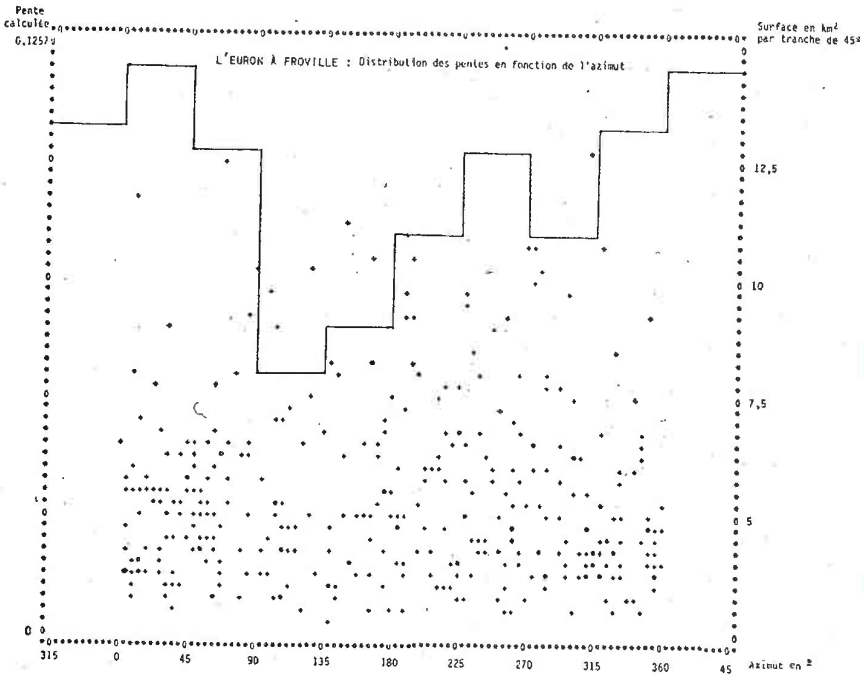


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,746\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1,049\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 4,4$

Rapport des longueurs : $R_l = 1,9$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle ..... 79 %

Muschelkalk supérieur ..... 21 %

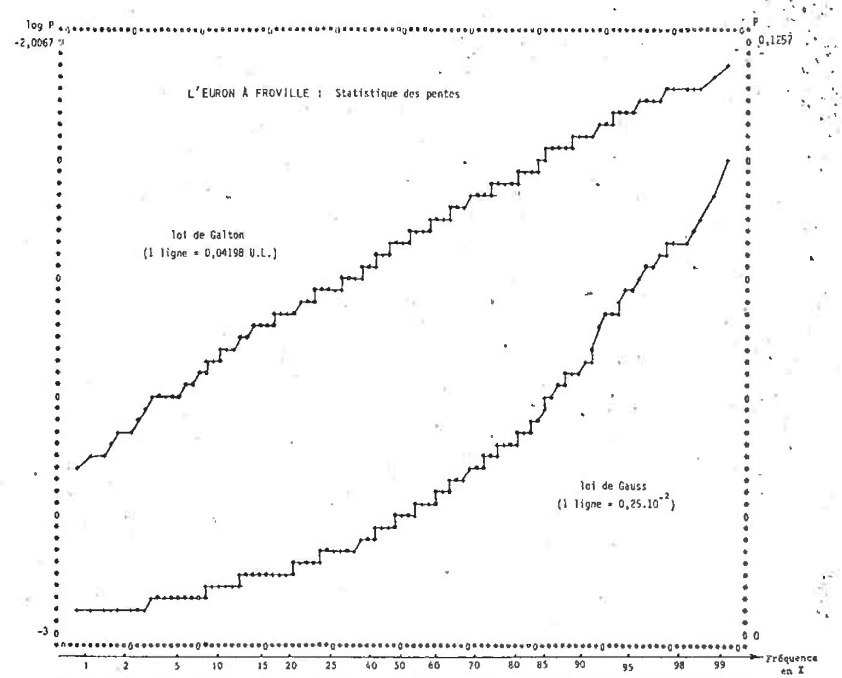
Muschelkalk moyen et inférieur .....

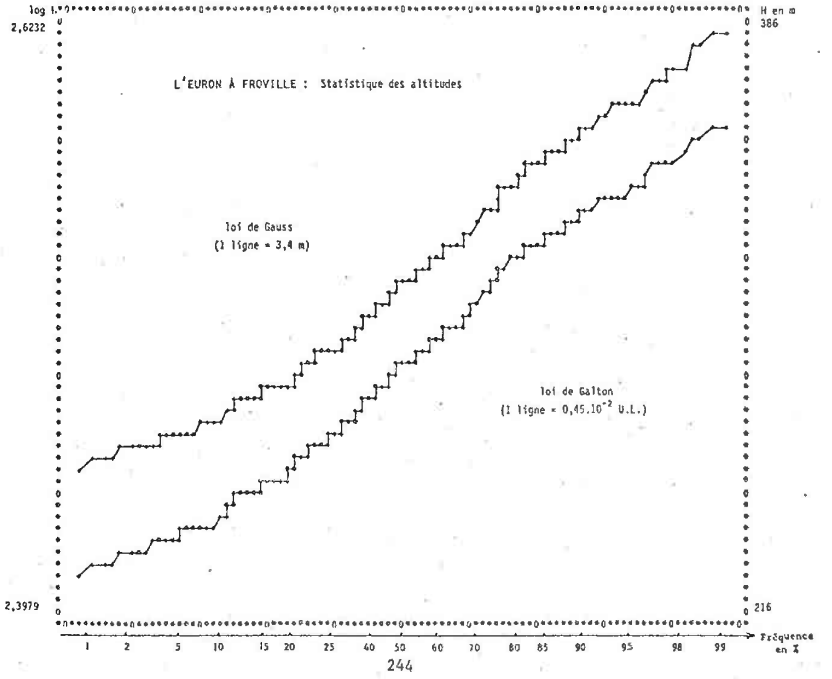
Buntsandstein et Permien .....

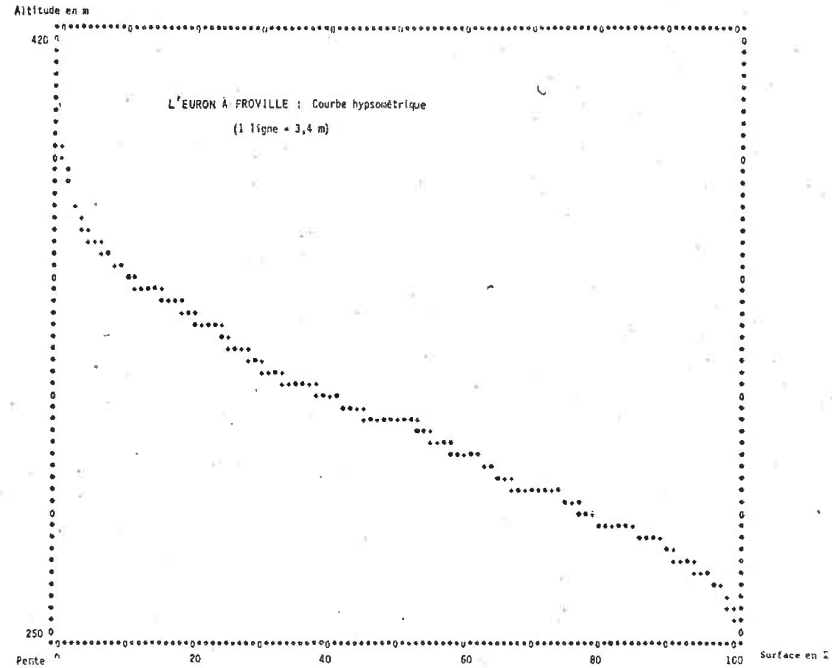
Socle cristallin et cristallophyllien .....

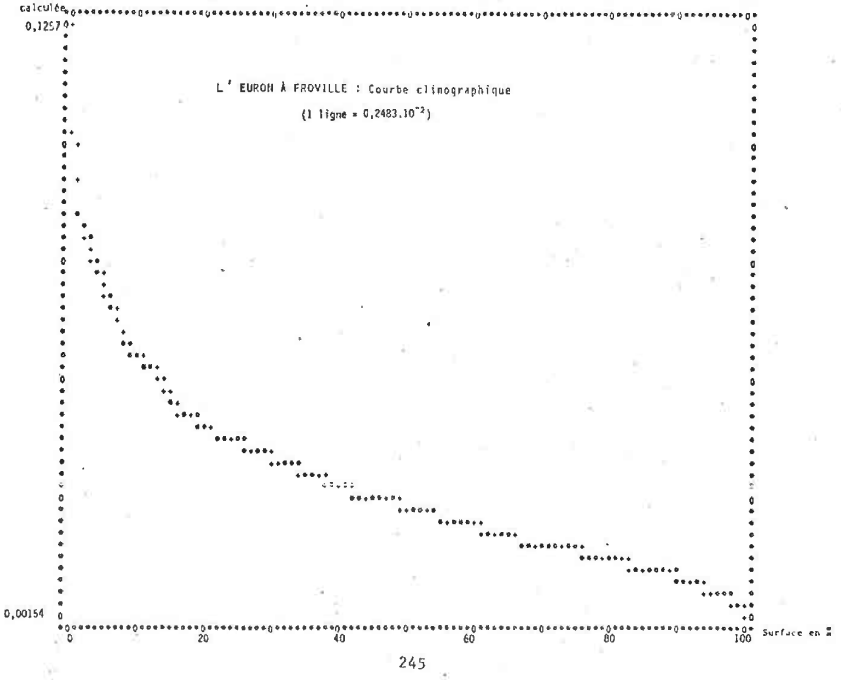
Indice de perméabilité ..... 21 %

Indice de dureté ..... 11 %

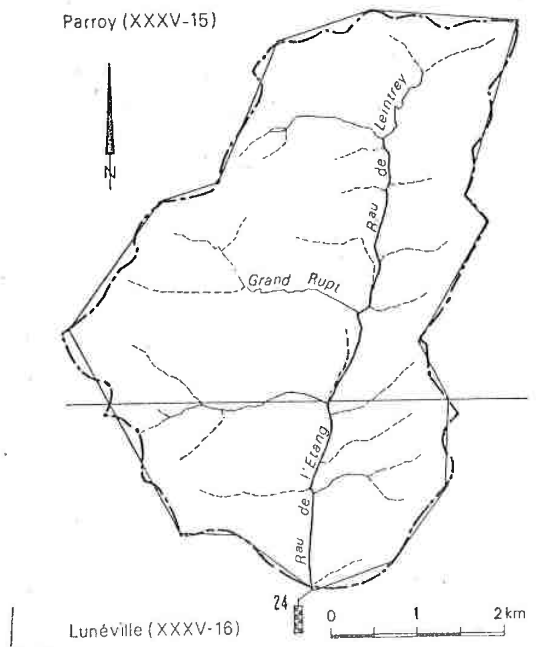

log P
-2,0067
P
0,1257
L'EURON À FROVILLE : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,04198 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,25.10⁻²)
-3
0
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,6232
H en m
386
L'EURON À FROVILLE : Statistique des altitudes
loi de Gauss
(1 ligne = 3,4 m)
loi de Galton
(1 ligne = 0,45.10⁻² U.L.)
2,3979
216
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
420
250
L'EURON À FROVILLE : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 3,4 m)
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,1257
0,00154
L' EURON À FROVILLE : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,2483.10⁻²)
0 20 40 60 80 100
Surface en %

M - LE RUISSEAU DE LEINTREY À BLEMEREY



Bassin versant du R^au Leintrey à Blemerey

LE RUISSEAU DE LEINTREY À BLEMEREY

Géométrie plane

- surface en km^2 20,0
- périmètre en km 18,7
- coefficient de compacité 1,169
- longueur en km 6,0
- largeur en km 3,3
- nombre de points intérieurs 81

Altitudes

- altitude maximale en m 312
- altitude minimale en m 246
- intervalle de variation en m 66
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 40
- écart-type des altitudes en m 13,2

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — bon

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,02474
- écart-type calculé σ_P 0,01536
- droite de régression ..... $P_{réel} = 3,23\ P_{calculée} - 0,0221$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,05781
- écart-type restitué σ_P 0,05159

• Ajustement à une loi de GALTON — médiocre

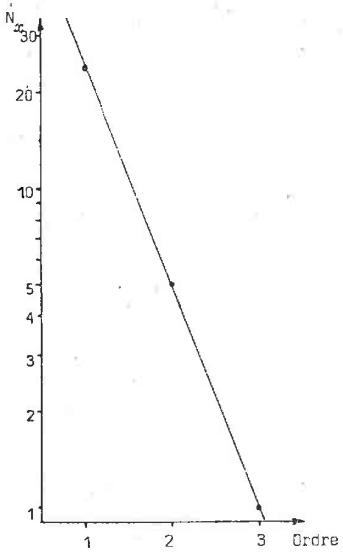
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... - 1,6826
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3292
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,08 \log P_{calculée} + 0,432$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,3052
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4145

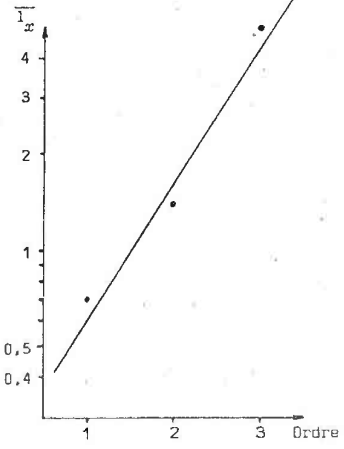
Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,09241
- indice de pente global 0,00666
- dénivelée spécifique en m 29,8

LE RUISSEAU DE LEINTREY À BLEMEREY : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau			TOTAL
	1	2	3	
Nombre N_x	24	5	1	30
Longueurs cumulées l_x en km	17	7	5	29
Longueurs moyennes $\Sigma \overline{l_x}$ en km	0,708	1,400	5,000	1,034



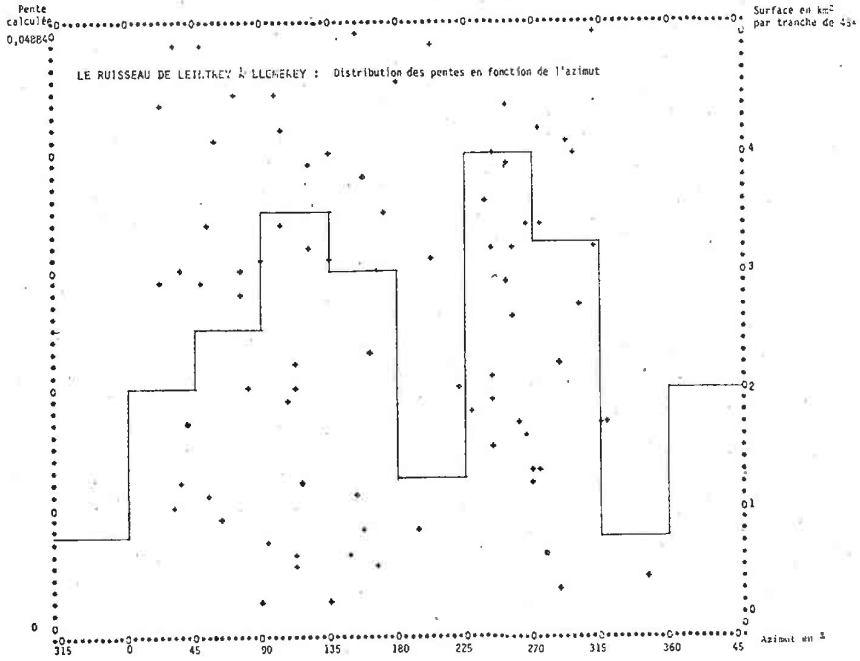


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 1,200\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 1,450\ km^{-1}$

Rapport de confluence : $R_c = 4,9$

Rapport des longueurs : $R_l = 2,7$



Alluvions récentes et terrasses anciennes .....

Bajocien et Aalénien .....

Toarcien .....

Charmouthien, Sinémurien, Hettangien .....

Rhétien supérieur .....

Rhétien inférieur .....

Keuper et Lettenkohle ..... 100 %

Muschelkalk supérieur .....

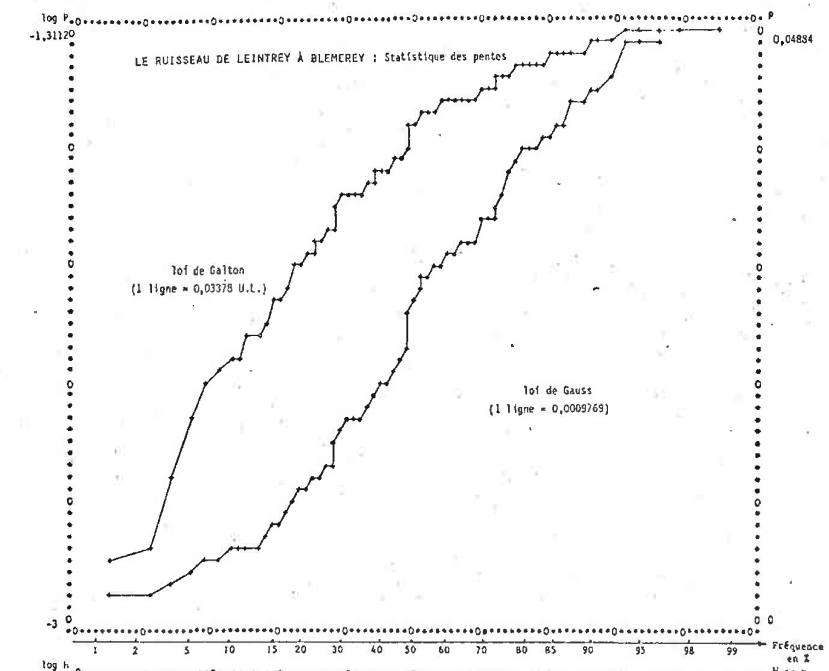
Muschelkalk moyen et inférieur .....

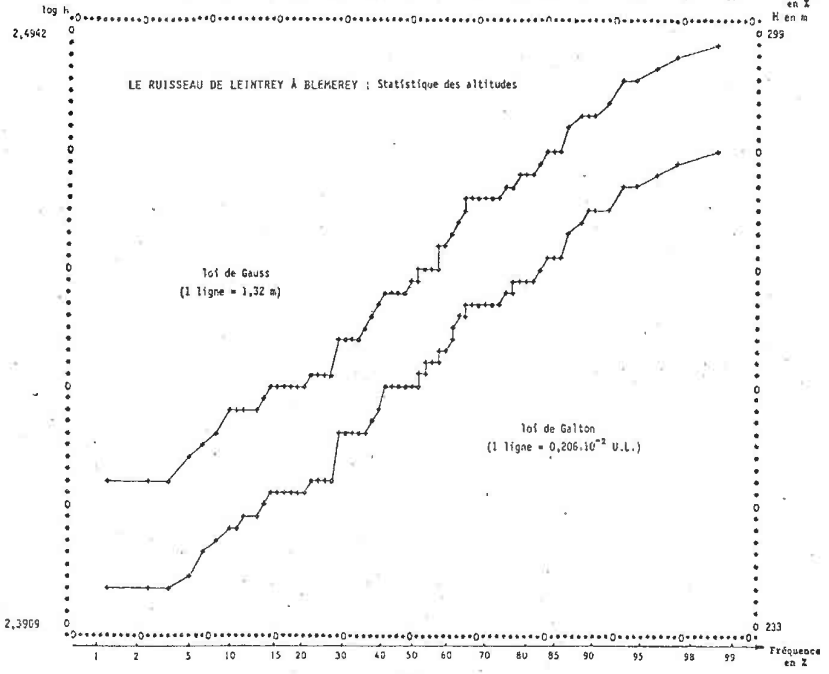
Buntsandstein et Permien .....

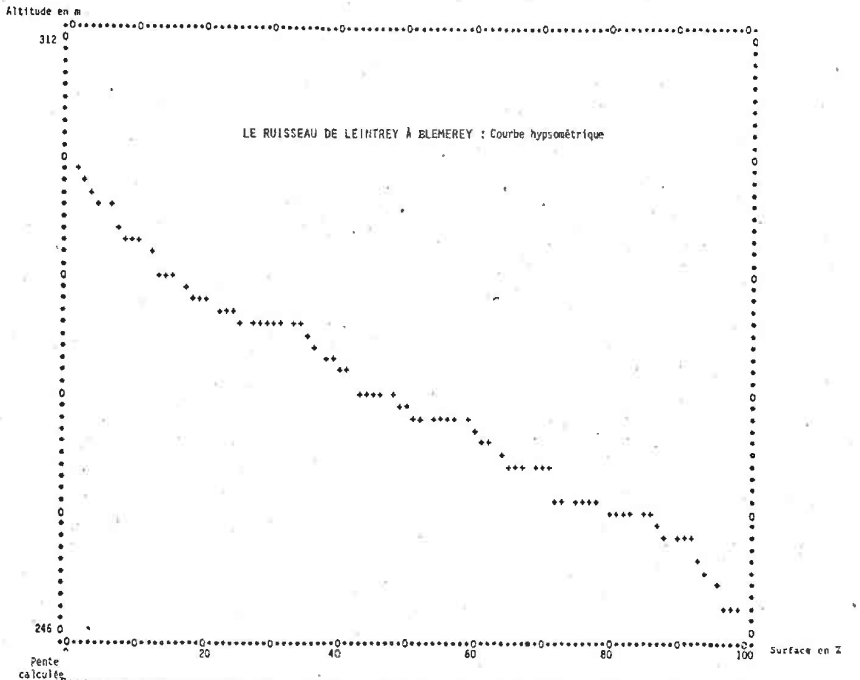
Socle cristallin et cristallophyllien .....

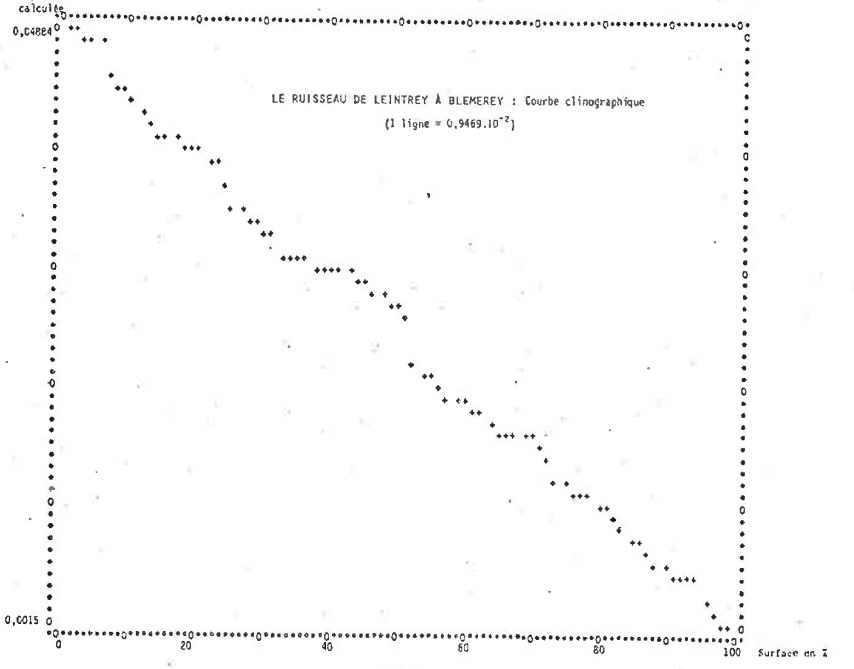
Indice de perméabilité ..... 0 %

Indice de dureté ..... 0 %

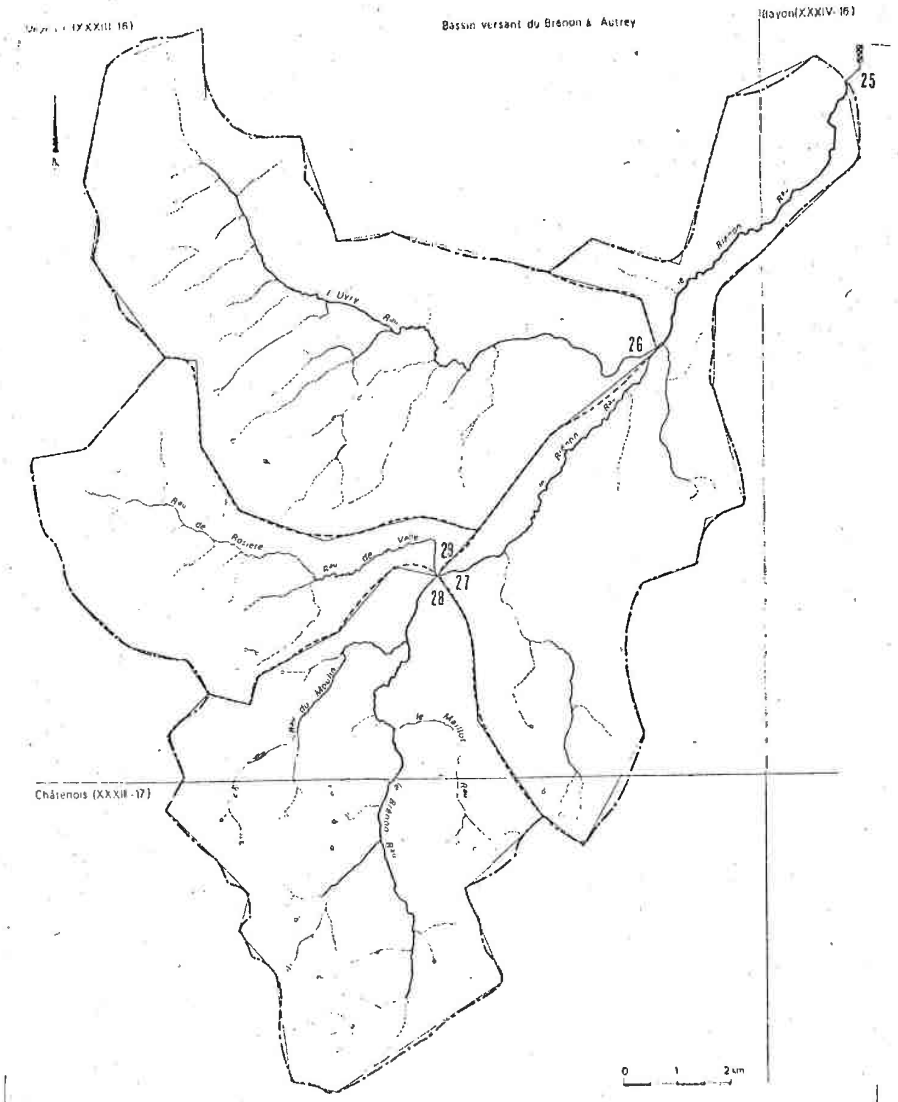

log P
P
-1,31120
0,04884
LE RUISSEAU DE LEINTREY À BLEMEREY : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,03378 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,0009769)
-3
0
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log h
H en m
2,4942
299
LE RUISSEAU DE LEINTREY À BLEMEREY : Statistique des altitudes
loi de Gauss
(1 ligne = 1,32 m)
loi de Galton
(1 ligne = 0,206.10⁻² U.L.)
2,3909
233
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
312
246
LE RUISSEAU DE LEINTREY À BLEMEREY : Courbe hypsométrique
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,04884
0,0015
LE RUISSEAU DE LEINTREY À BLEMEREY : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,9469.10⁻²)
0 20 40 60 80 100
Surface en %

N - LE BRÉNON À AUTREY ET SES BASSINS VERSANTS AMONTS



LE BRÉNON À AUTREY

Géométrie plane

- surface en km² 145,1
- périmètre en km 68,1
- coefficient de compacité 1,582
- longueur en km 29,0
- largeur en km 5,0
- nombre de points intérieurs 583

Altitudes

- altitude maximale en m 541
- altitude minimale en m 232
- intervalle de variation en m 309
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 181
- écart-type des altitudes en m 54,9

Pentes mesurées et pentes calculées

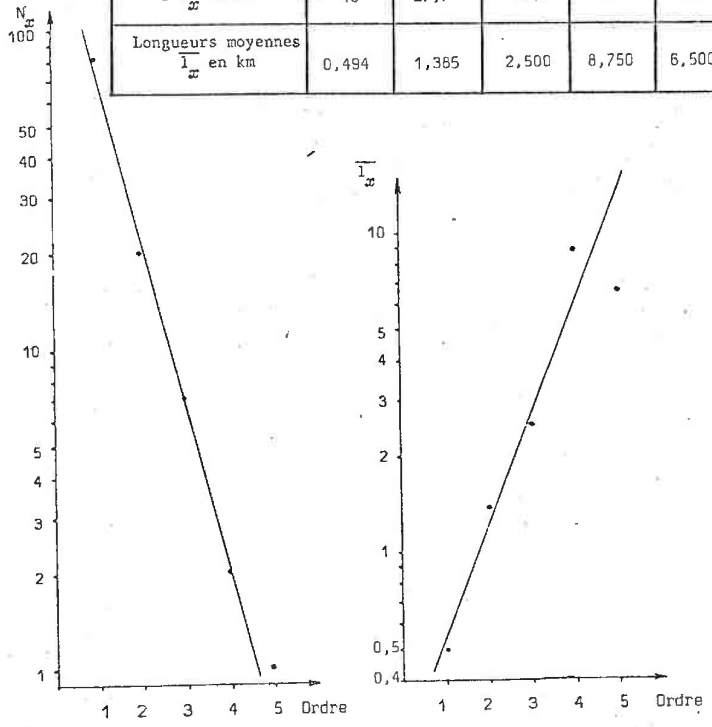
- Ajustement à une loi de GAUSS — Médiocre
  - moyenne calculée $\overline{P}$ 0,05076
  - écart-type calculé σ_P 0,0397
  - droite de régression ..... $P_{réel} = 1,72\ P_{calculée} - 0,00106$
  - moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,08625
  - écart-type restitué σ_P 0,07397
- Ajustement à une loi de GALTON — Bon
  - moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,4434
  - écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,4127
  - droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,19 \log P_{calculée} + 0,46$
  - moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,2577
  - écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4545

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,08929
- indice de pente global 0,00623
- dénivelée spécifique en m 75,0

LE BRÉNON À AUTREY : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau					TOTAL
	1	2	3	4	5	
Nombre N_x	81	20	7	2	1	111
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	40	27,7	17,5	17,5	6,5	109,2
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,494	1,385	2,500	8,750	6,500	0,984

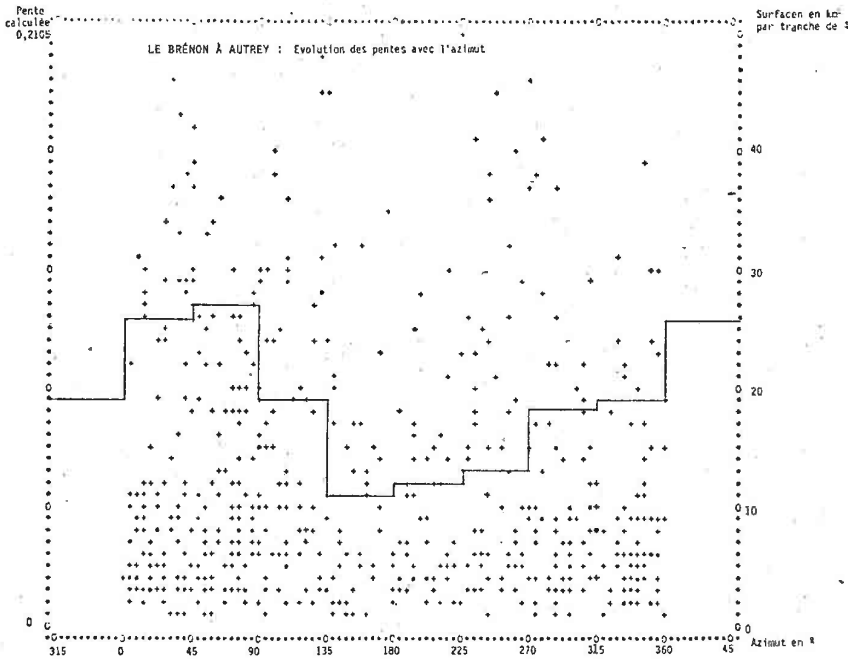


Rapport des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0{,}558\ km^{-2}$

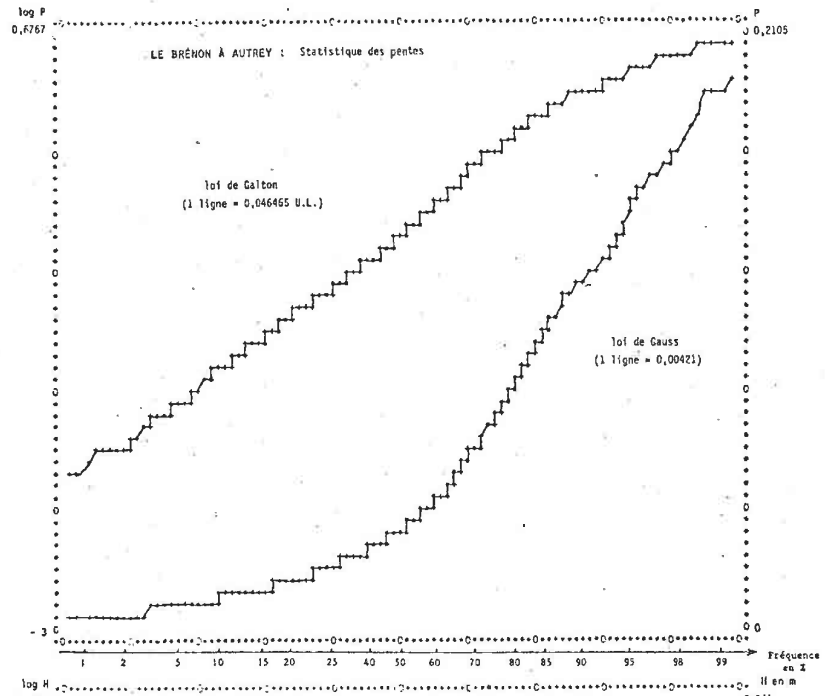
Densité de drainage : $D_d = 0{,}753\ km^{-1}$

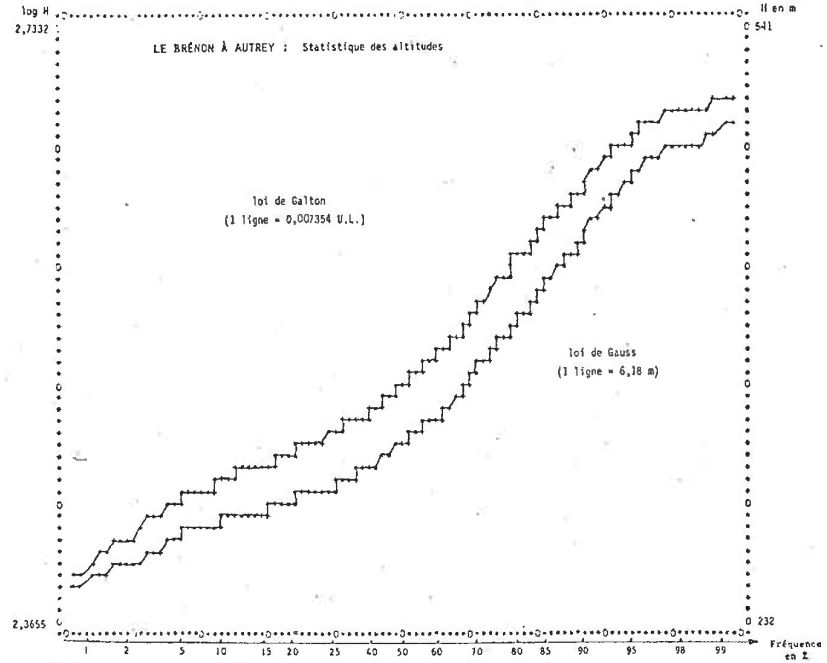
Rapport de confluence : $R_c = 3{,}2$

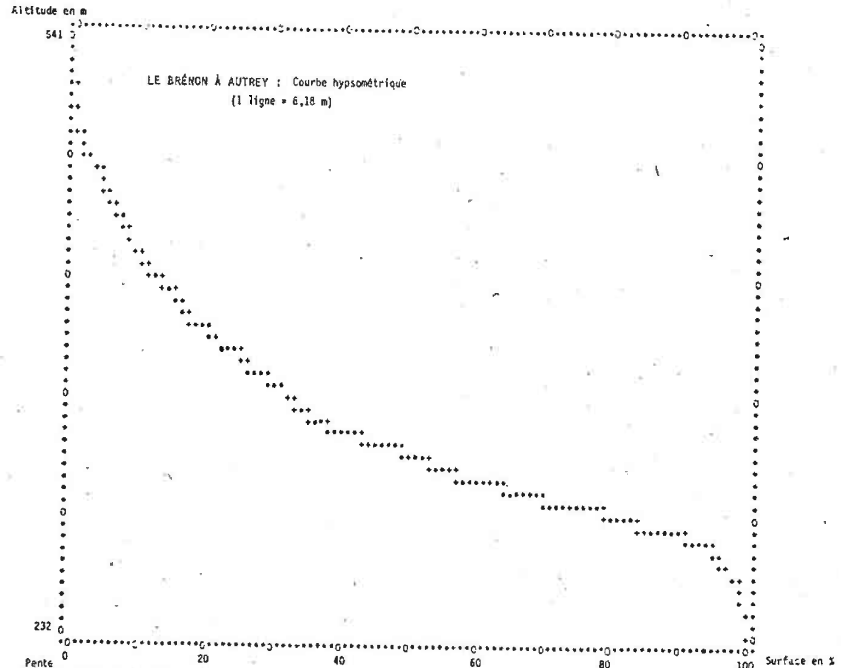
Rapport des longueurs : $R_l = 2{,}2$

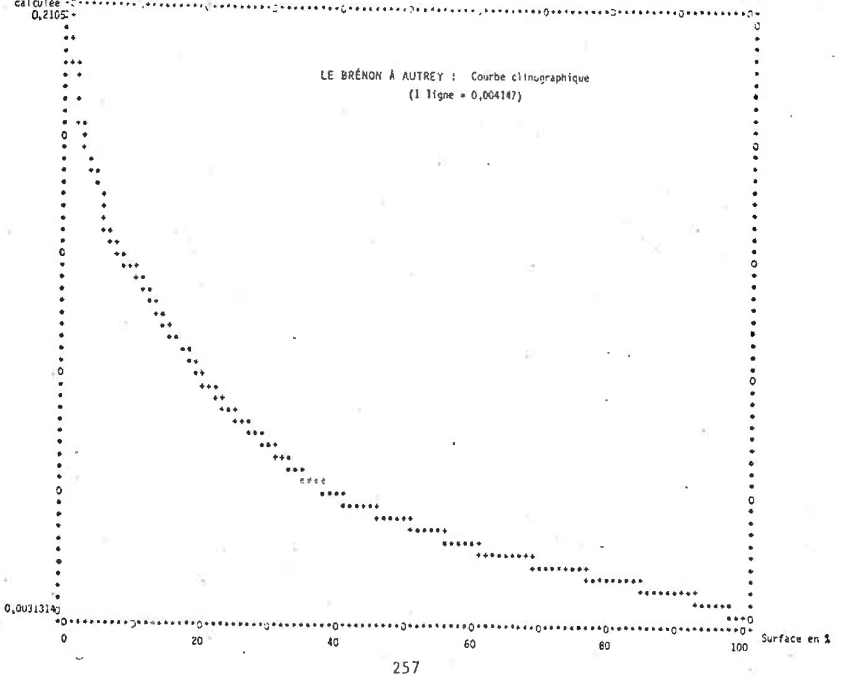


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	19 %
Toarcien	29 %
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	48 %
Rhétien supérieur	2 %
Rhétien inférieur	2 %
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	45 %
Indice de dureté	39 %


log P
0,6767
P
0,2105
LE BRÉNON À AUTREY : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,046465 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,00421)
- 3
0
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,7332
H en m
541
LE BRÉNON À AUTREY : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,007354 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 6,18 m)
2,3655
232
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
541
LE BRÉNON À AUTREY : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 6,18 m)
232
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,2105
LE BRÉNON À AUTREY : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,004147)
0,0031314
0 20 40 60 80 100
Surface en %

L'UVRY À VÉZELISE

Géométrie plane

- surface en km² 49,9
- périmètre en km 32,9
- coefficient de compacité 1,303
- longueur en km 12,4
- largeur en km 4,0
- nombre de points intérieurs 198

Altitudes

- altitude maximale en m 439
- altitude minimale en m 250
- intervalle de variation en m 189
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 132
- écart-type des altitudes en m 38,3

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — Médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,04156
- écart-type calculé σ_P 0,03294
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,66\ P_{calculée} + 0,00032$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,0693
- écart-type restitué σ_P 0,05645

. Ajustement à une loi de GALTON — Bon

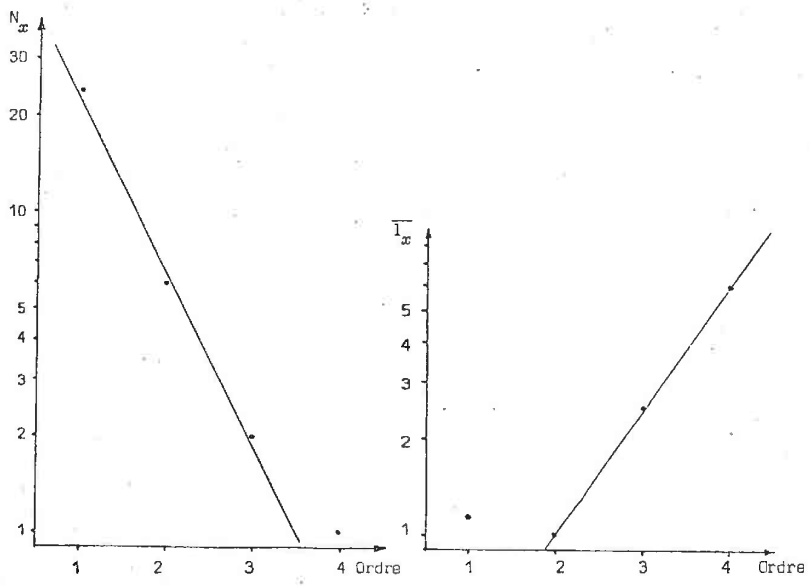
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,5272
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,39155
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,08 \log P_{calculée} + 0,327$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,3224
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,3832

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,10983
- indice de pente global 0,01064
- dénivelée spécifique en m 75,2

L'UVRY À VÉZELISE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	24	6	2	1	33
Longueurs cumulées $\Sigma\ l_x$ en km	27	6	5	6	44
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	1,125	1	2,500	6,000	1,333

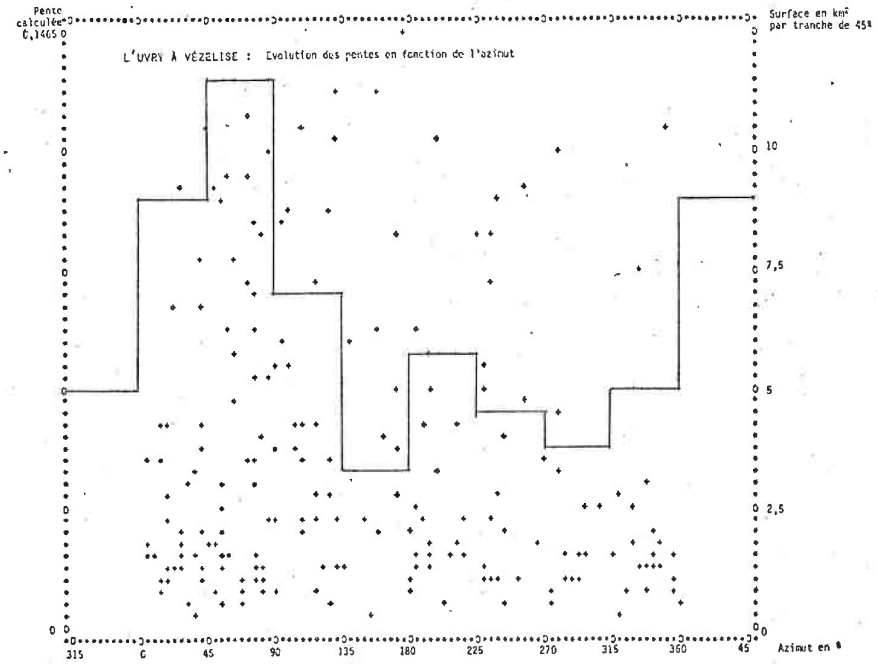


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,481\ km^{-2}$

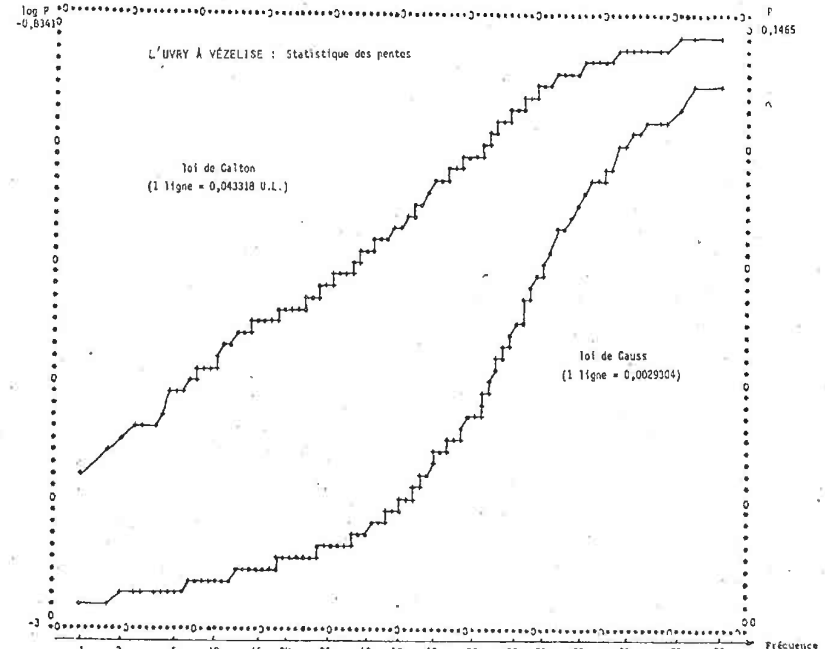
Densité de drainage : $D_d = 0,882\ km^{-1}$

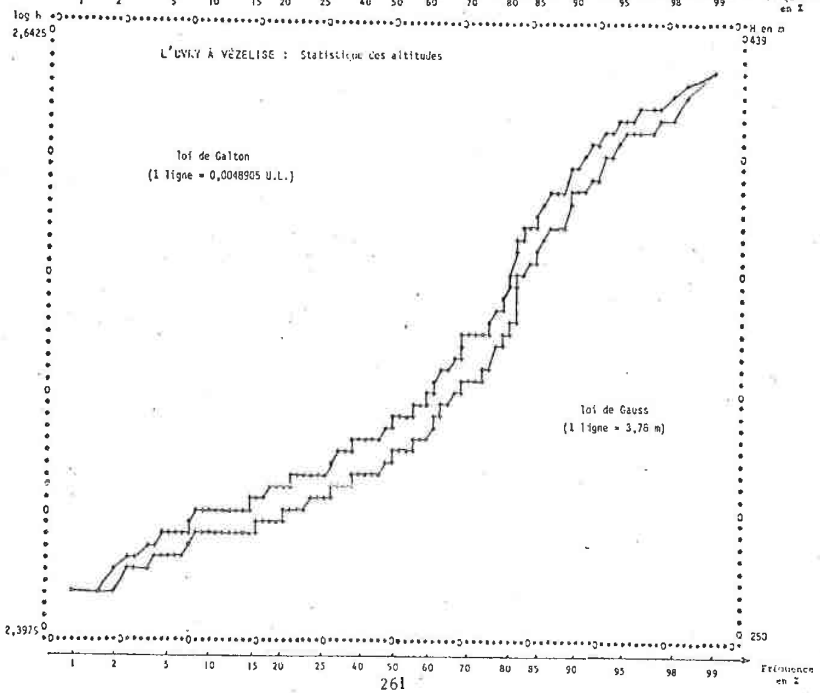
Rapport de confluence : $R_c = 3,5$

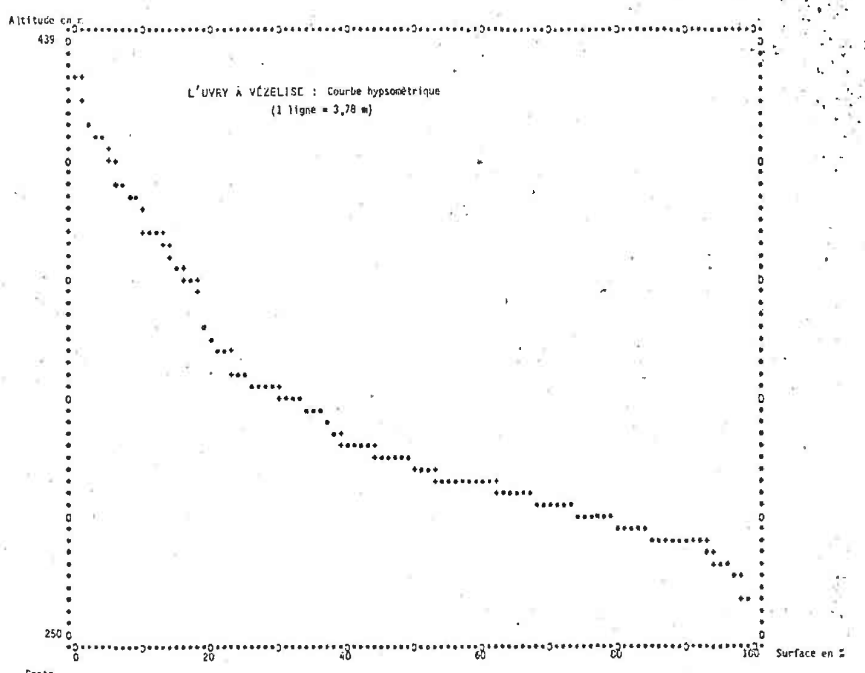
Rapport des longueurs : $R_l = 2,4$

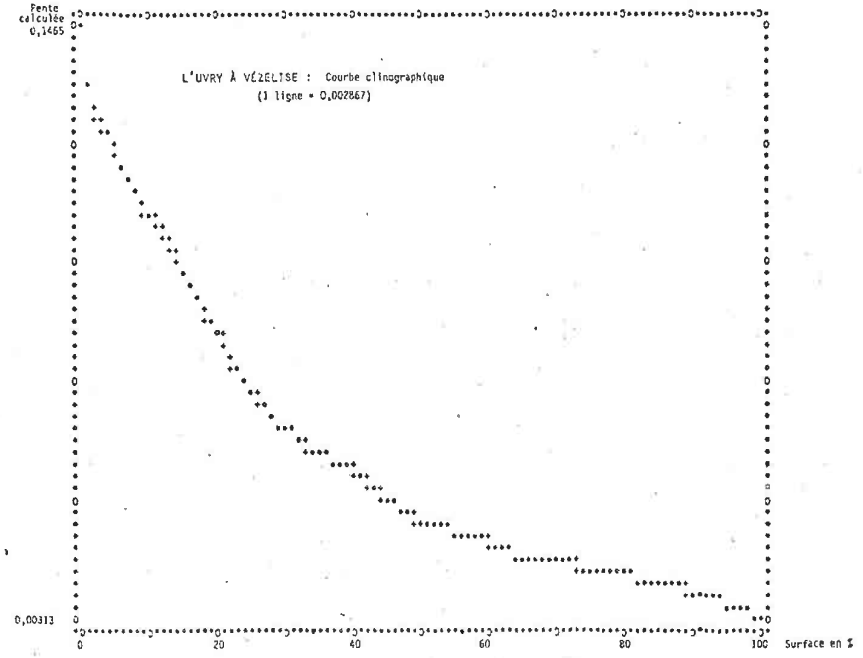


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	14 %
Toarcien	25 %
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	60 %
Rhétien supérieur	1 %
Rhétien inférieur	1 %
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	45 %
Indice de dureté	42 %









LE BRÉNON À L'ÉTANCHE (AVAL)

Géométrie plane

- surface en km² 60,3
- périmètre en km 39,6
- coefficient de compacité 1,429
- longueur en km 16,1
- largeur en km 3,6
- nombre de points intérieurs 246

Altitudes

- altitude maximale en m 522
- altitude minimale en m 280
- intervalle de variation en m 242
- D = ($H_{0,95}$ - $H_{0,5}$) en m 173
- écart-type des altitudes en m 57,1

Pentes mesurées et pentes calculées

• Ajustement à une loi de GAUSS — médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,08196
- écart-type calculé σ_P 0,04699
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,51\ P_{calculée} + 0,00236$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,09583
- écart-type restitué σ_P 0,07613

• Ajustement à une loi de GALTON

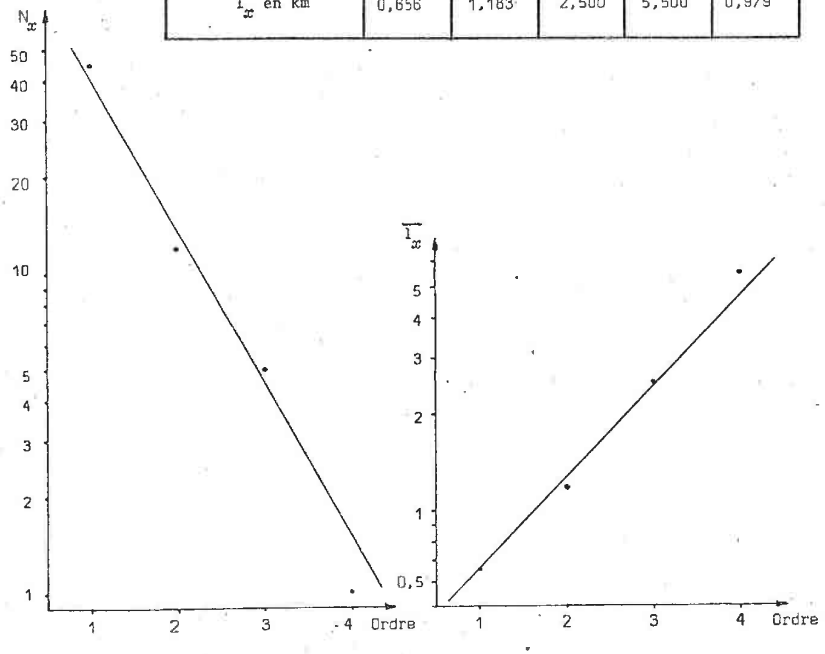
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,3505
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,04017
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,24 \log P_{calculée} + 0,453$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,2116
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4873

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,11423
- indice de pente global 0,01077
- dénivelée spécifique en m 83,6

LE BRÉNON À L'ÉTANCHE (AVAL) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	45	12	5	1	63
Longueurs cumulées $\Sigma\, l_x$ en km	29,5	14,2	12,5	5,5	61,7
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,656	1,183	2,500	5,500	0,979

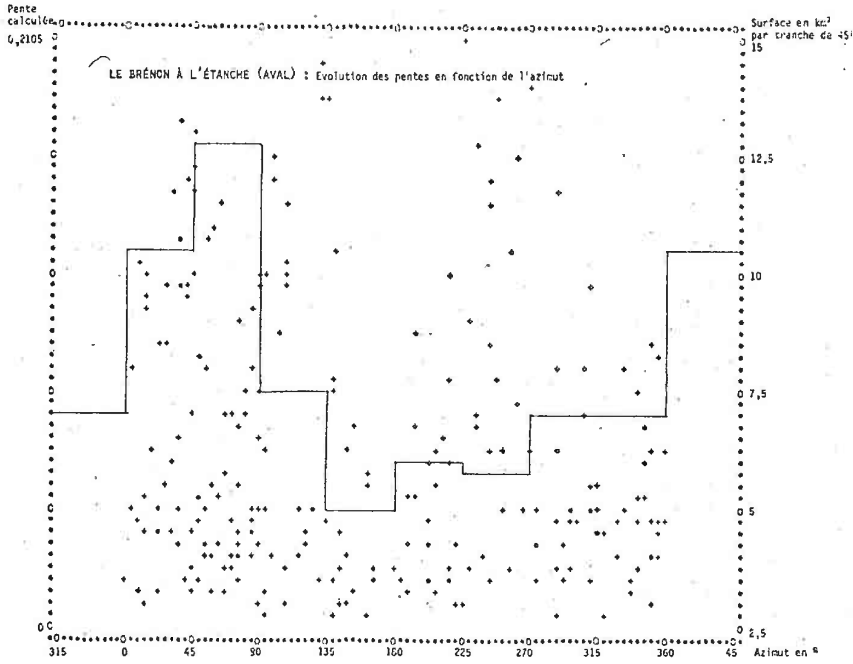


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0{,}726\ km^{-2}$

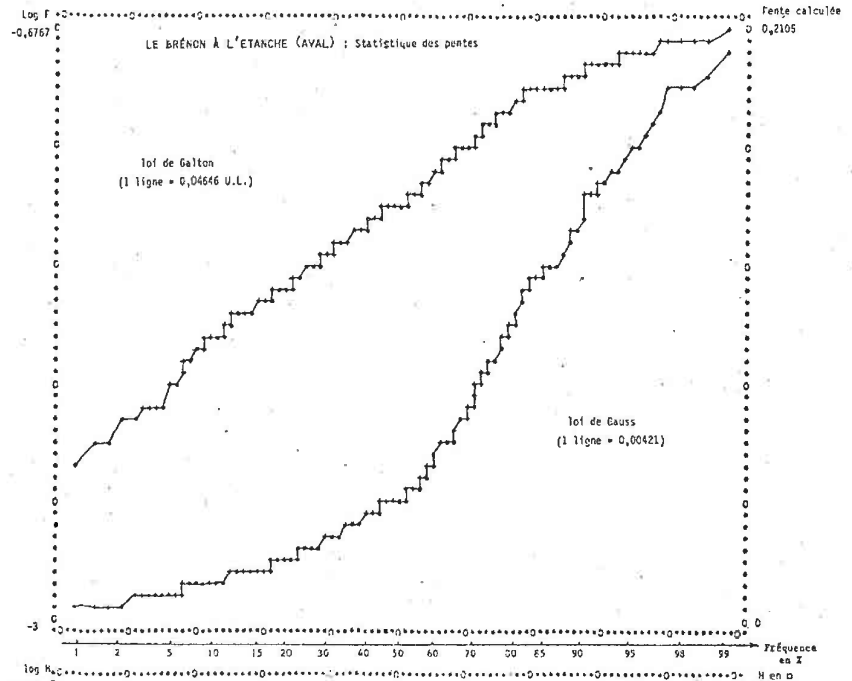
Densité de drainage : $D_d = 1{,}016\ km^{-1}$

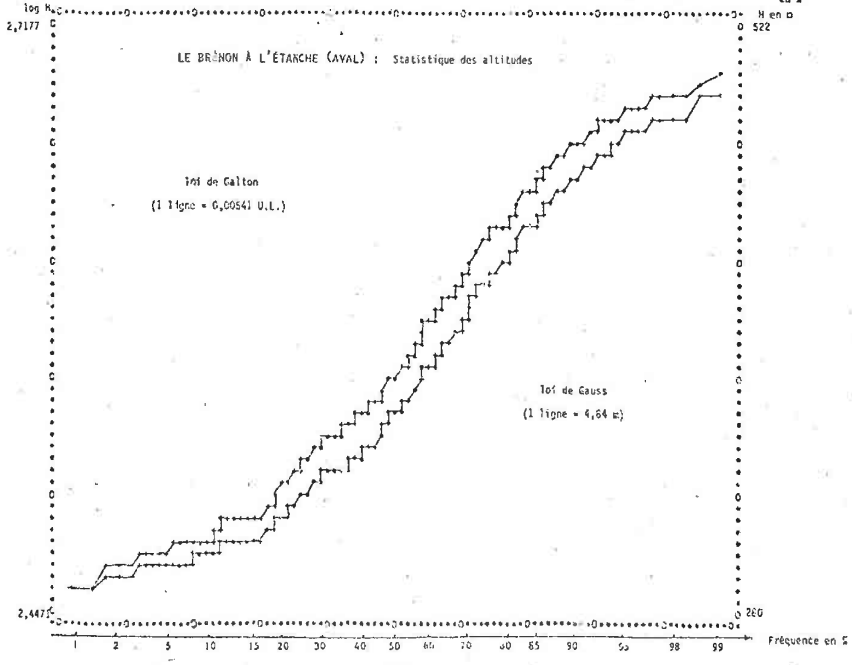
Rapport de confluence : $R_c = 3{,}1$

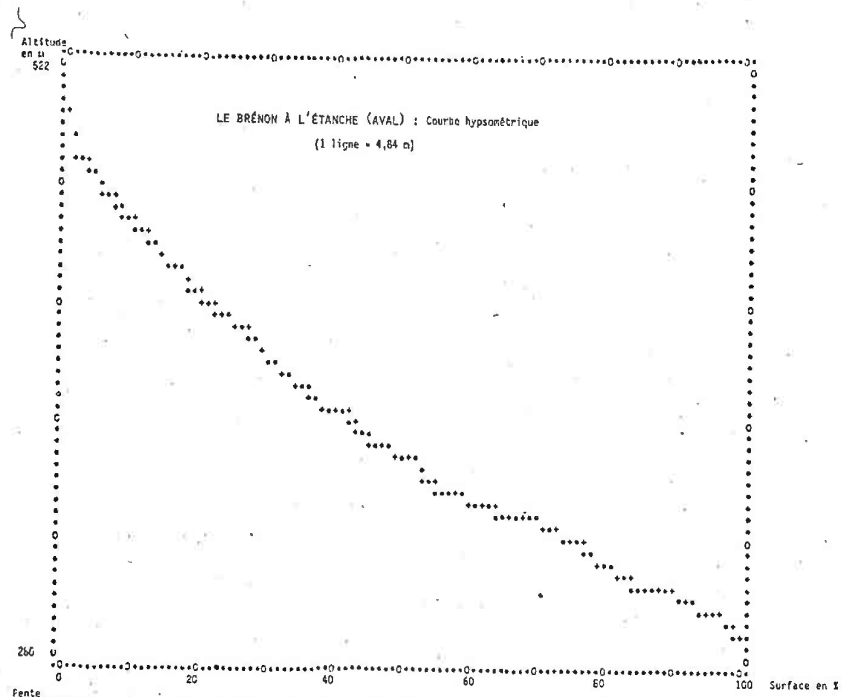
Rapport des longueurs : $R_l = 1{,}9$

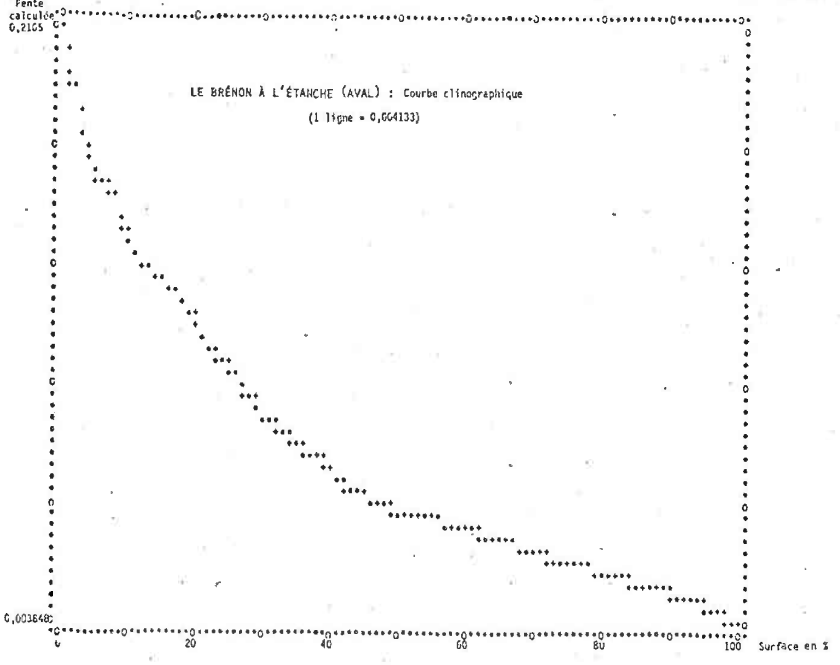


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	30 %
Toarcien	42 %
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	28 %
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	44 %
Indice de dureté	37 %


Log F
-0,6767
-3
Pente calculée
0,2105
0
LE BRÉNON À L'ETANCHE (AVAL) : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,04646 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,00421)
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,7177
2,4471
H en m
522
266
LE BRÉNON À L'ETANCHE (AVAL) : Statistique des altitudes
loi de Galton
(1 ligne = 0,00541 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 4,64 m)
1 2 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
522
266
LE BRÉNON À L'ÉTANCHE (AVAL) : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 4,84 m)
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,2105
0,0038482
LE BRÉNON À L'ÉTANCHE (AVAL) : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,004133)
0 20 40 60 80 100
Surface en %

LE BRÉNON À L'ÉTANCHE (AMONT)

Géométrie plane

- surface en km² 38,7
- périmètre en km 26,9
- coefficient de compacité 1,212
- longueur en km 9,3
- largeur en km 4,2
- nombre de points intérieurs 158

Altitudes

- altitude maximale en m 522
- altitude minimale en m 280
- intervalle de variation en m 242
- D = $[H_{0,95} - H_{0,5}]$ en m 179
- écart-type des altitudes en m 61,2

Pentes mesurées et pentes calculées

. Ajustement à une loi de GAUSS — Médiocre

- moyenne calculée $\overline{P}$ 0,06893
- écart-type calculé σ_P 0,04964
- droite de régression ..... $P_{réel} = 1,48\ P_{calculée} + 0,0177$
- moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,1197
- écart-type restitué σ_P 0,07996

. Ajustement à une loi de GALTON — Bon

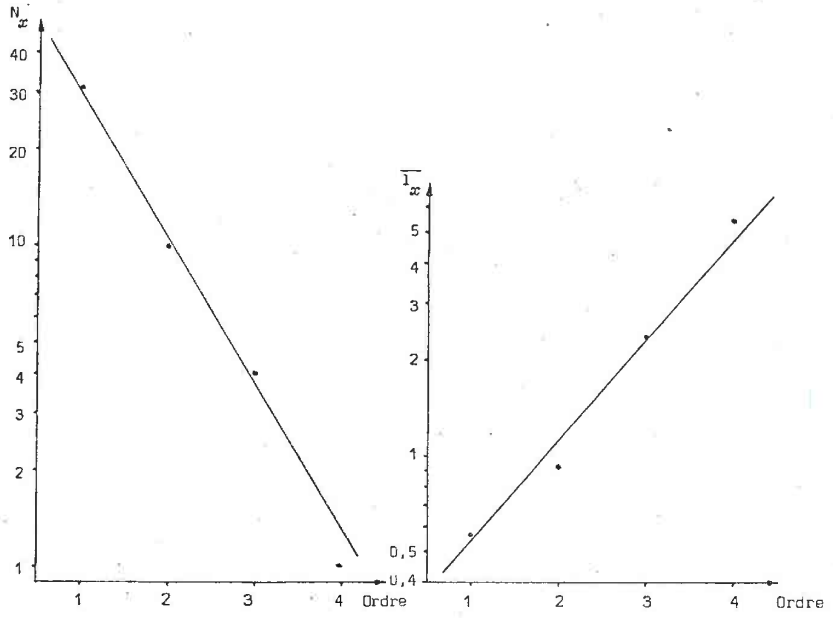
- moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,2808
- écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3908
- droite de régression ..... $\log P_{réel} = 0,978 \log P_{calculée} + 0,217$
- moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,0356
- écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,4014

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,1508
- indice de pente global 0,01925
- dénivelée spécifique en m 119,7

LE BRÉNON À L'ÉTANCHE (AMONT) : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau				TOTAL
	1	2	3	4	
Nombre N_x	31	10	4	1	46
Longueurs cumulées Σl_x en km	17,5	9,2	9,5	5,5	41,7
Longueurs moyennes $\overline{l_x}$ en km	0,565	0,920	2,375	5,5	0,907

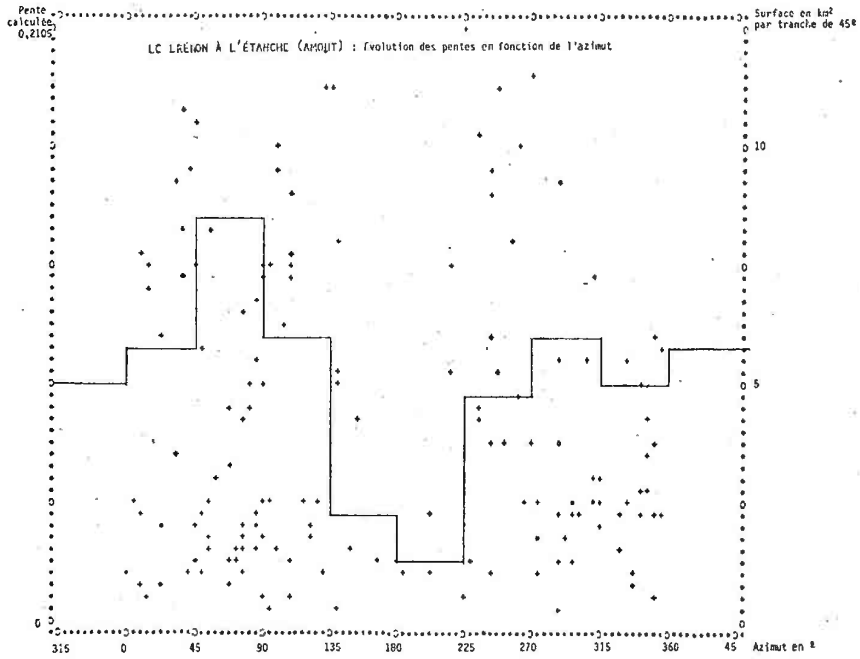


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,801\ km^{-2}$

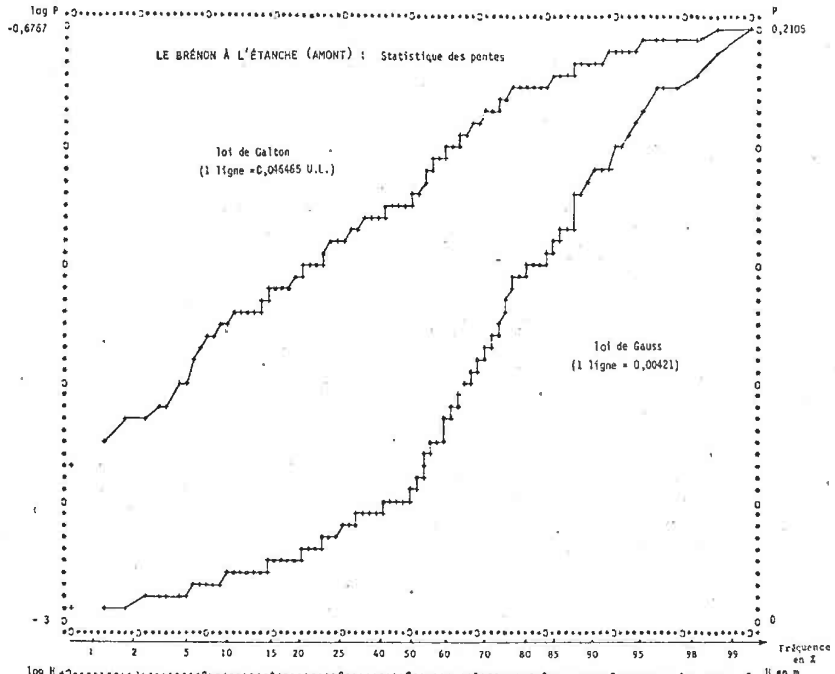
Densité de drainage : $D_d = 1,078\ km^{-1}$

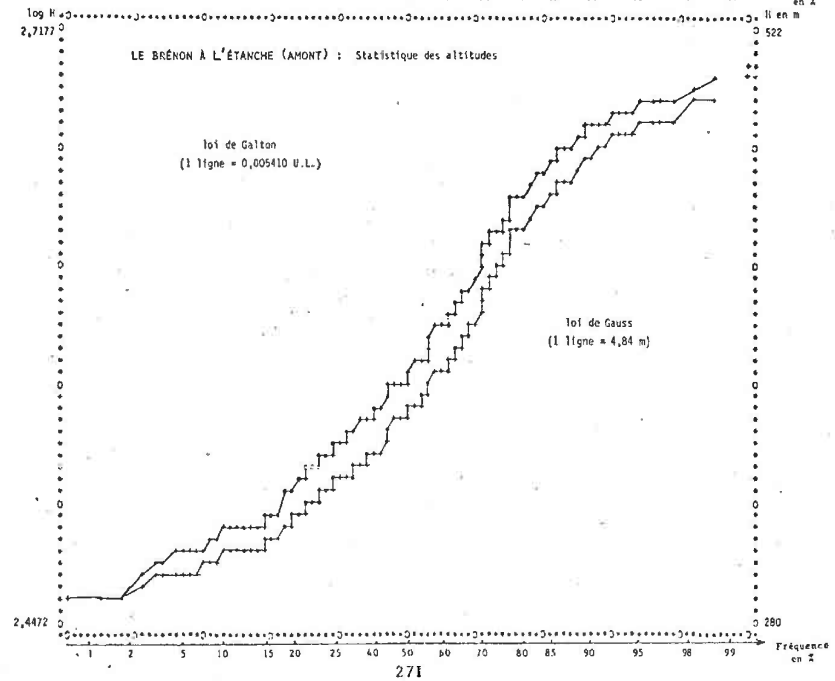
Rapport de confluence : $R_c = 2,8$

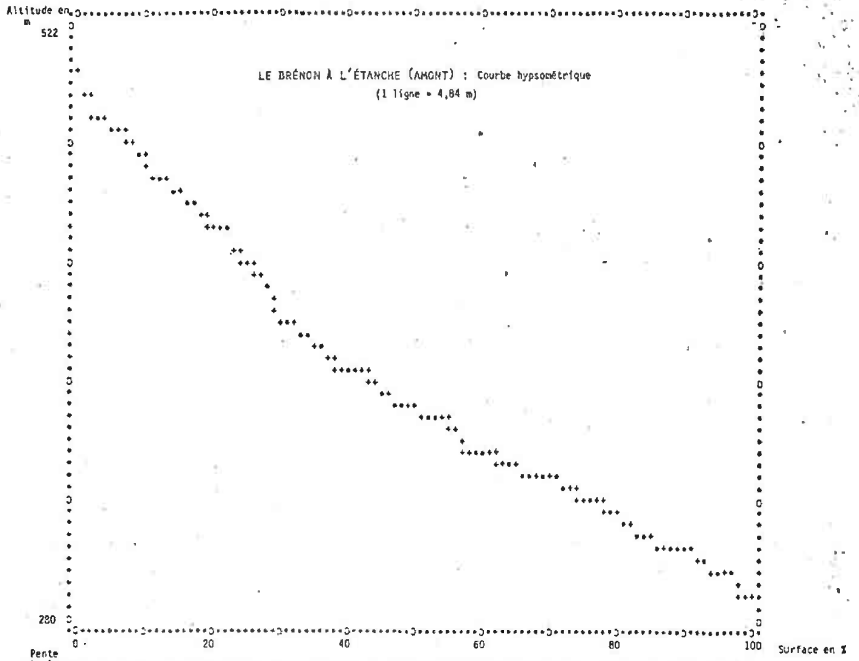
Rapport des longueurs : $R_l = 2,1$

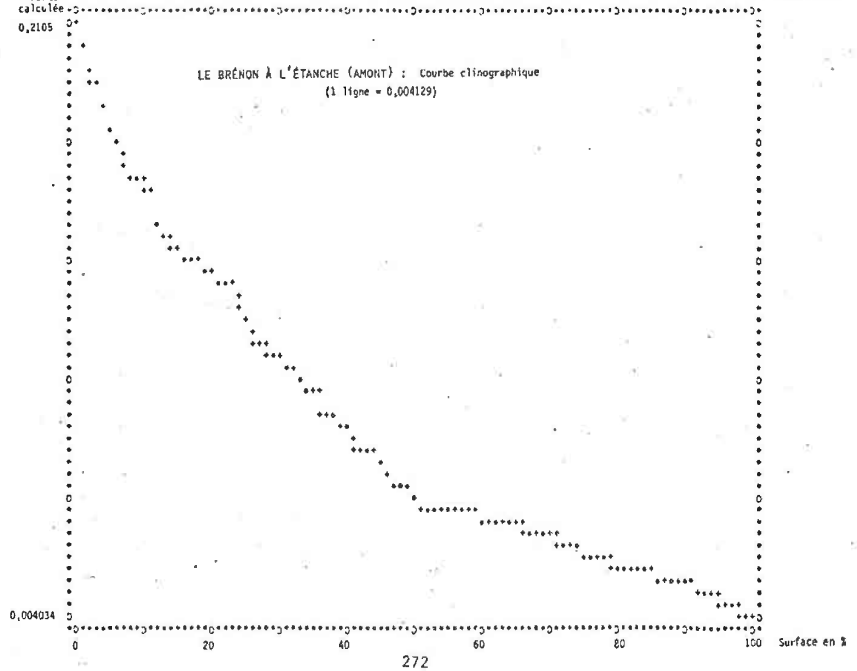


Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	23 %
Toarcien	46 %
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	31 %
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	
Indice de perméabilité	38 %
Indice de dureté	33 %









LE RUISSEAU DE VELLE À L'ÉTANCHE

Géométrie plane

- surface en km² 21,6
- périmètre en km 23,9
- coefficient de compacité 1,436
- longueur en km 9,7
- largeur en km 2,2
- nombre de points intérieurs 88

Altitudes

- altitude maximale en m 474
- altitude minimale en m 280
- intervalle de variation en m 194
- $D = (H_{0,95} - H_{0,5})$ en m 155
- écart-type des altitudes en m 51,2

Pentes mesurées et pentes calculées

- Ajustement à une loi de GAUSS — Médiocre
  - moyenne calculée $\overline{P}$ 0,04846
  - écart-type calculé σ_P 0,03740
  - droite de régression ..... $P_{réel} = 1,02\ P_{calculée} + 0,0032$
  - moyenne réelle restituée $\overline{P}$ 0,05365
  - écart-type restitué σ_P 0,04656

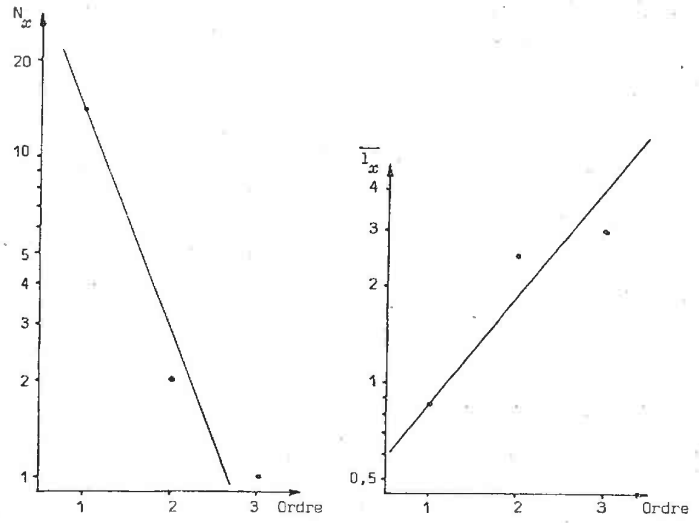
- Ajustement à une loi de GALTON — Bon
  - moyenne calculée $\overline{\log P}$ ..... -1,4074
  - écart-type calculé $\sigma_{\log P}$ 0,3721
  - droite de régression ..... $\log P_{réel} = 1,35 \log P_{calculée} + 0,453$
  - moyenne réelle restituée $\overline{\log P}$ ..... -1,4470
  - écart-type restitué $\sigma_{\log P}$ 0,5303

Indices de pente

- indice de pente de Roche 0,13466
- indice de pente global 0,01597
- dénivelée spécifique en m 74,2

LE RUISSEAU DE VELLE À L'ÉTANCHE : Caractéristiques du réseau hydrographique

	Ordre x des cours d'eau			TOTAL
	1	2	3	
Nombre N_x	14	2	1	17
Longueurs cumulées l_x en km	12	5-	3	20
Longueurs moyennes $\Sigma \overline{l_x}$ en km	0,857	2,500	3	1,176

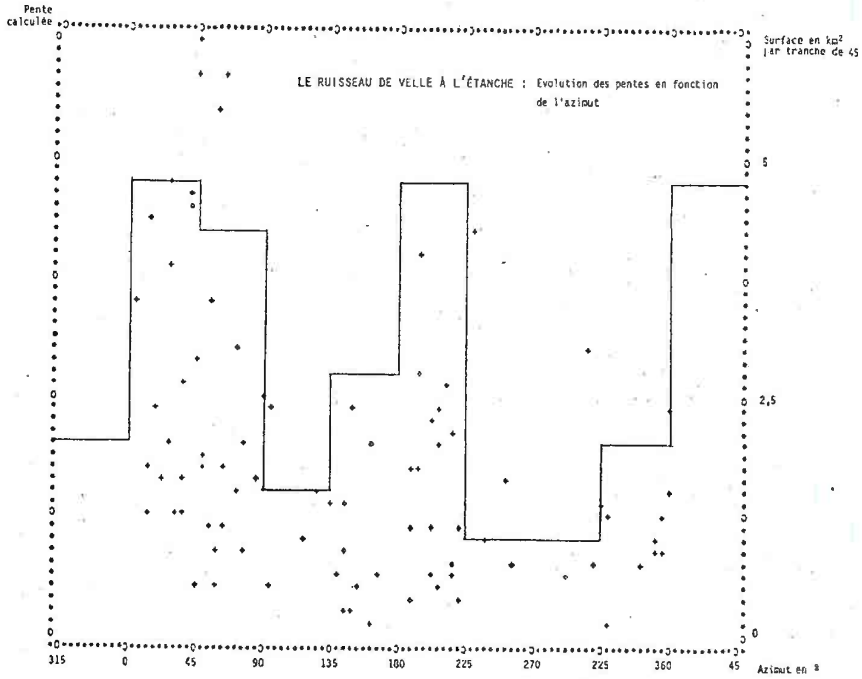


Fréquence des thalwegs d'ordre 1 : $F_1 = 0,648\ km^{-2}$

Densité de drainage : $D_d = 0,926\ km^{-1}$

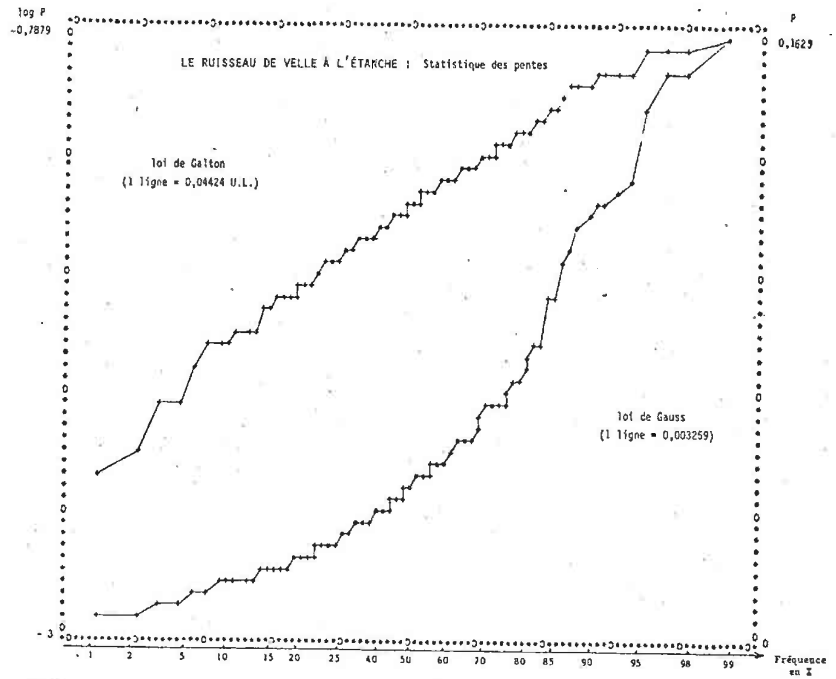
Rapport de confluence : $R_c = 5$

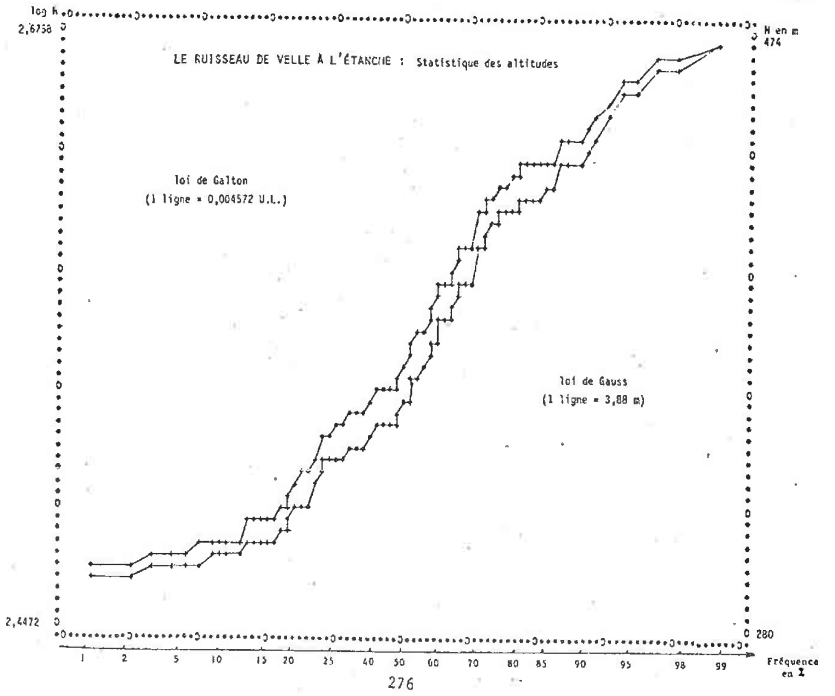
Rapport des longueurs : $R_l = 2,2$

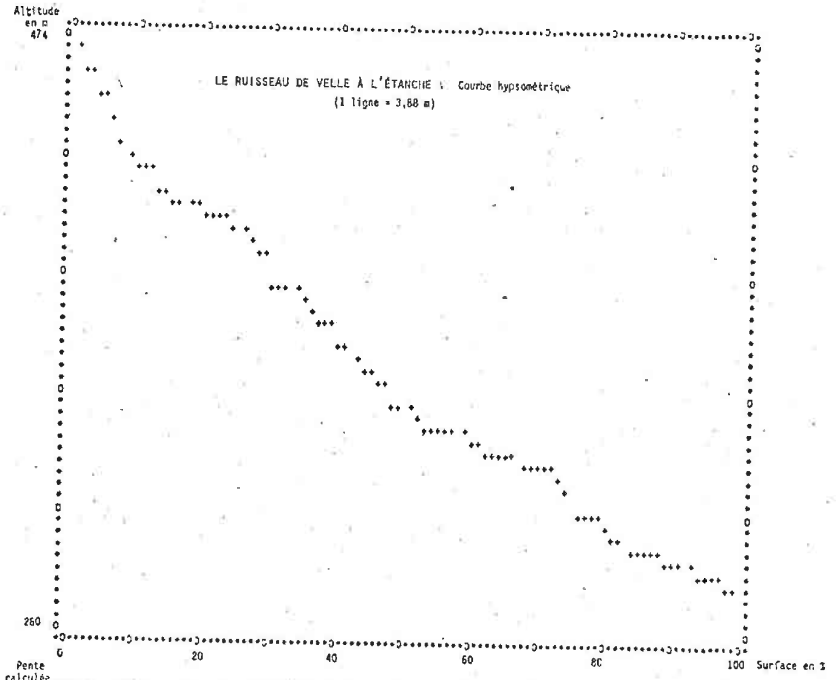


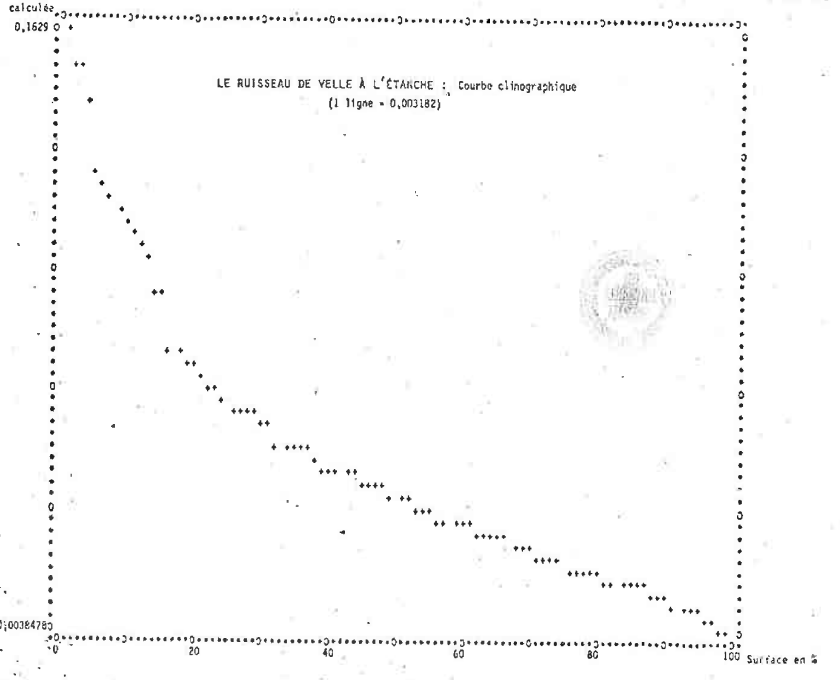
Alluvions récentes et terrasses anciennes	
Bajocien et Aalénien	42 %
Toarcien	36 %
Charmouthien, Sinémurien, Hettangien	22 %
Rhétien supérieur	
Rhétien inférieur	
Keuper et Lettenkohle	
Muschelkalk supérieur	
Muschelkalk moyen et inférieur	
Buntsandstein et Permien	
Socle cristallin et cristallophyllien	

Indice de perméabilité	53 %
Indice de dureté	43 %


log P
-0,7879
P
0,1629
LE RUISSEAU DE VELLE À L'ÉTANCHE : Statistique des pentes
loi de Galton
(1 ligne = 0,04424 U.L.)
loi de Gauss
(1 ligne = 0,003259)
- 3
0
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


log H
2,6758
H en m
474
LE RUISSEAU DE VELLE À L'ÉTANCHE : Statistique des altitudes
loi de Gauss
(1 ligne = 3,88 m)
2,4472
280
1 2 5 10 15 20 25 40 50 60 70 80 85 90 95 98 99
Fréquence en %


Altitude en m
474
LE RUISSEAU DE VELLE À L'ÉTANCHE : Courbe hypsométrique
(1 ligne = 3,88 m)
260
0 20 40 60 80 100
Surface en %


Pente calculée
0,1629
LE RUISSEAU DE VELLE À L'ÉTANCHE : Courbe clinographique
(1 ligne = 0,003182)
0,0038478
0 20 40 60 80 100
Surface en %