



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

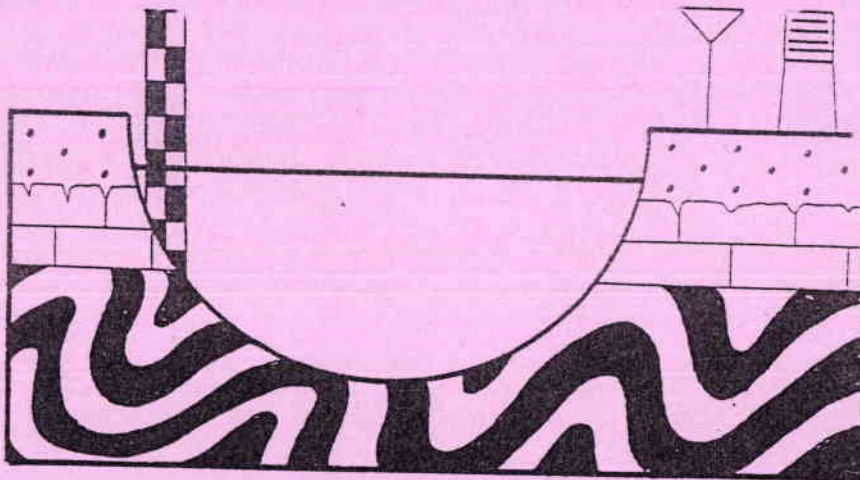
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU (PLATEAU CENTRAL MAROCAIN) ETUDE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE

*Thèse de Doctorat de l'Université de Metz
(Mention Géographie) présentée par
CHERRAD Brahim*



jury:

- J. Corbonnois : MCF-HDR à l'Université de Metz - Directeur de Thèse
- J.C. BONNEFONT: Professeur à l'Université de Nancy - Rapporteur
- B. Akdim : Professeur à l'Université de Fès - Rapporteur
- A. Marre : Professeur à l'Université de Reims - Examinateur
- E. Gille : MCF à l'Université de Metz - Examinateur

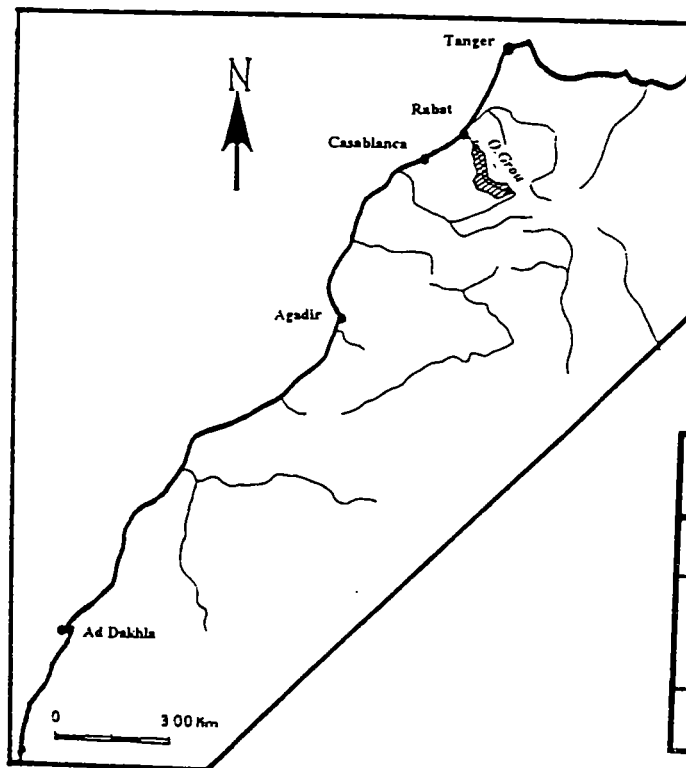
BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE DE METZ



031 169593 9

LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU (PLATEAU CENTRAL MAROCAIN) ETUDE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE

Thèse de Doctorat de l'Université de Metz
(Mention Géographie) présentée par
CHERRAD Brahim



jury:

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE LETTRES - METZ -	
N° inv.	1997024L
Cote	LM3 97/4
Loc.	Magasin

- J. Corbonnois : MCF-HDR à l'Université de Metz - Directeur de Thèse
- J.C. BONNEFONT: Professeur à l'Université de Nancy - Rapporteur
- B. Akdim : Professeur à l'Université de Fès - Rapporteur
- A. Marre : Professeur à l'Université de Reims - Examineur
- E. Gille : MCF à l'Université de Metz - Examineur

AVANT-PROPOS

A l'aube du XXI^{ème} siècle, les besoins en eaux s'accroissent rapidement alors que les ressources sont limitées dans l'espace et variables dans le temps. Le Maroc a pris conscience de cette crise de l'eau, comme le montre très bien l'extrait du discours de S.M. LE ROI HASSAN II prononcé lors du VII^{ème} Congrès Mondial des Ressources en Eau (Rabat, 13 au 18 Mai 1991) :

"...Les quantités d'eau disponibles n'ont pas changé quant à la répartition géographique et saisonnière. Les régions qui en manquaient continuent de souffrir de ce déficit. De plus, le volume d'eau utilisable s'amenuise du fait de la pollution. En revanche, la demande en eau ne cesse de croître. Son volume a doublé au cours des trente dernières années. Ceci est la conséquence d'une démographie galopante, du développement du niveau de vie et de l'accroissement de la consommation individuelle. C'est aussi le résultat du progrès industriel, technologique et agricole, marqué, il est vrai, par les effets néfastes de la pollution."

"...il s'agit d'aboutir à la rationalisation de l'utilisation et à la préservation de l'eau, de gérer ce secteur avec clairvoyance, tant dans l'intérêt des populations actuelles que dans celui des générations à venir..."

L'étude menée sur l'oued Grou est ainsi une contribution modeste et partielle pour une meilleure connaissance des ressources en eau du Maroc, et plus particulièrement dans le domaine du Plateau Central marocain.

Cette étude a pu être menée à bien grâce aux multiples compétences, dans le domaine de l'eau, des chercheurs de Centre d'Etude de Géographie de l'Université de Metz (C.E.G.U.M).

Je tiens, tout d'abord, à rendre un grand hommage à Monsieur le Professeur François REITEL qui a dirigé mon travail de recherche pendant 6 ans et qui est aujourd'hui malheureusement décédé. Je remercie Madame Jeannine CORBONNOIS d'avoir bien voulu prendre la succession de la direction de cette thèse.

Mes remerciements sont également adressés à tous les chercheurs du C.E.G.U.M, et plus particulièrement à ceux du Laboratoire de Géographie Physique (M. SARY, E. GILLE, D. FRANCOIS, P. GAMEZ) qui ont suivi constamment l'évolution de mes recherches. Je tiens également à exprimer ma gratitude à Monsieur J. F. ZUMSTEIN, Ingénieur à l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, pour ses conseils toujours judicieux.

Ce travail n'aurait pas pu être réalisé sans les données fournies par les différents services marocains, (Direction Générale de l'Hydraulique, Direction Générale de la Météorologie, Direction des Eaux et Forêts), je les remercie pour leur aimable contribution.

Enfin, j'exprime mes sentiments de reconnaissance à ma famille et à mes amis de Metz qui ont su m'encourager tout au long de ces années de recherche à l'université de Metz.

INTRODUCTION GENERALE

L'oued Grou, affluent de l'oued Bou-Regreg, est caractéristique du Plateau Central marocain. Ce plateau est le plus important bombement du socle hercynien du Maroc Atlantique, limité au nord par le couloir sud-rifain (Mamora et le Plateau de Meknès), au sud par le Plateau des Phosphates, à l'est par le Moyen Atlas et à l'ouest par la Méséta Côtière (Cf. Fig. I-1).

Le Bou-Regreg est l'un des deux principaux cours d'eau drainant le Plateau Central. Son bassin est de 9700 km², dont 5700 km² pour le bassin versant de l'oued Grou avec son affluent de rive gauche l'oued Korifla. L'autre cours d'eau qui draine le Plateau Central est l'oued Beht qui conflue avec l'oued Sebou au nord.

L'étude est consacrée au bassin versant de l'oued Grou, de sa source jusqu'en amont de la confluence avec l'oued Korifla, soit une superficie de 3820 km². Il est limité au nord par le bassin versant du Bou-Regreg supérieur, à l'ouest par le bassin versant du Korifla, à l'est et au sud par le bassin supérieur de l'oued Oum-er-Rabia. L'oued Grou prend sa source à la limite sud-est du Plateau, au pied du Moyen Atlas qui domine la Dépression Orientale. Il contourne la corne méridionale du Haut-Pays, longe le Palier Intermédiaire au sud, et traverse le Palier Inférieur avant de confluer avec l'oued Korifla, son affluent de rive gauche. Ensuite, l'oued continue son parcours sur une distance de sept kilomètres environ avant de se jeter dans le Bou-Regreg, à une vingtaine de kilomètres de l'embouchure de ce dernier dans l'Océan Atlantique, entre Rabat et Salé.

Actuellement, ces trois cours d'eau confluent dans le grand lac du barrage de Sidi Mohamed ben Abdalah qui a été construit à partir de 1971 et mis en eau en 1974. Sa retenue a une superficie de 32 km² avec une capacité de 500 millions de mètres cubes. Ce barrage, avec d'autres existants ou à construire, doit contribuer aux besoins en eau d'une population côtière, entre Rabat et Casablanca, sans cesse croissante : 5 millions actuellement et 6 millions à l'horizon 2000.

L'apport total moyen annuel des trois cours d'eau au barrage (période 1974-75/1985-86) est de 15 m³/s, 50 % provenant de l'oued Bou-Regreg, 38 % de l'oued Grou et 12 % de l'oued Korifla. Ces bassins inscrits dans un substratum essentiellement imperméable (roches primaires du Plateau Central)

ont cependant des débits spécifiques moyens différenciés : 1.9 l/s/km² pour le bassin de l'oued Bou-Regreg, 1.5 l/s/km² pour celui de l'oued Grou et seulement 1 l/s/km² pour celui de l'oued Korifla. Ces rendements résultent de la variation spatiale de la pluviométrie : ils sont plus importants sur le Haut-Pays qui constitue la majeure partie du bassin de l'oued Bou-Regreg, plus faibles sur le Palier Intermédiaire où se développe surtout le bassin de l'oued Grou et encore plus faibles sur le Palier Inférieur où s'inscrit le bassin de l'oued Korifla.

Cependant, cet apport moyen annuel masque une grande irrégularité annuelle : plus de 50 m³/s en 1978-79, dont 16 m³/s pour l'oued Grou, et moins de 3.5 m³/s en 1982-83 avec moins d'un m³/s pour l'oued Grou. Ce contraste annuel des débits montre également la grande variabilité annuelle des précipitations et le rôle insignifiant des faibles réserves en eau souterraine.

L'oued Grou est donc un cours d'eau représentatif de la partie sud du Plateau Central marocain ; son cours est contrôlé par trois stations hydrométriques.

L'étude sera ainsi menée sur l'ensemble de son bassin et sur les sous-bassins.

Dans la première partie, les paramètres naturels du bassin seront analysés afin de déterminer les processus dominants de la genèse des différents types d'écoulement.

La seconde partie sera consacrée à l'analyse des données climatiques et plus particulièrement à leur variabilité dans le temps et dans l'espace.

Dans la troisième partie, l'étude hydrologique portera d'une part, sur le régime moyen des écoulements de l'oued Grou aux différentes stations et d'autre part, sur les particularités des débits extrêmes (crues et étiages).

L'étude de l'oued Grou répond d'abord aux besoins d'une meilleure connaissance scientifique de l'hydrogéographie du Plateau Central marocain, une comparaison avec les autres oueds de ce plateau pourrait être envisagée ultérieurement. Mais cette étude peut également servir de base pour l'implantation de nouveaux barrages à l'intérieur du bassin versant. Ceux-ci sont nécessaires pour satisfaire les besoins en eau d'une population essentiellement agricole, d'environ 200.000 habitants, qui souffre de l'irrégularité des apports pluvio-hydrologiques caractéristique d'un climat semi-aride.

PREMIERE PARTIE
LE CONTEXTE NATUREL

INTRODUCTION

Le bassin versant de l'oued Grou, à sa confluence avec l'oued Korifla, son affluent principal de rive gauche, couvre une superficie de 3820 km². C'est un bassin très allongé, de forme elliptique, qui contourne par le sud le Haut-Pays qui correspond aux reliefs les plus élevés du Plateau Central marocain (Cf. Fig. I-1).

Les reliefs sont générés par le soulèvement du socle primaire, à l'époque tertiaire, qui a engendré d'abord une série de plans d'érosion étagés qui ont tronqué des séries schisto-quartzitiques fortement plissées et faillées. Ensuite, l'entaille profonde du réseau hydrographique a permis une diversification des formes de relief. Il en résulte une succession de plateaux, entrecoupés de cuvettes et de crêtes appalachiennes et recoupés par des vallées très encaissées.

Le couvert végétal est généralement peu dense, avec des forêts qui ne subsistent qu'en bordure du Haut-Pays. Les autres formations sont caractérisées par des matorrals et des steppes souvent clairsemés. Les zones de culture se limitent aux zones planes des plateaux les moins entaillés.

Le réseau hydrographique est essentiellement intermittent du fait d'un substratum à dominante imperméable et d'un climat à fort contraste pluviométrique. Seul le cours principal de l'oued Grou et quelques affluents ont un écoulement pérenne, mais souvent indigent.

Les différents facteurs naturels seront étudiés dans cette partie pour déterminer leur comportement dans les processus d'écoulement. Cette étude sera menée sur les trois bassins contrôlés par des stations hydrométriques :

- le bassin versant du cours supérieur à la station hydrométrique d'Ouljet Haboub (O H);
- le bassin versant du cours supérieur et moyen à la station hydrométrique de Sidi Jabeur (S J);
- le bassin versant à la station de Ras el Fathia (R F) située sur le

cours inférieur à quelques kilomètres de la confluence avec l'oued Korifla, juste à l'amont de la retenue du barrage de Sidi Mohamed ben Abdalah (S.M.B.A) qui collecte les eaux des oueds Bou-Regreg, Grou et Korifla.

L'étude géologique du bassin permet de déterminer les grands ensembles morphostructuraux mais surtout d'apprécier le comportement hydrologique des formations. Les paramètres morphométriques du bassin et du réseau hydrographique sont utilisés pour souligner les processus d'écoulement et le transfert des masses d'eau dans le cours principal de l'oued Grou. Les sols et la végétation constituent un interface entre les apports pluviométriques et les écoulements concentrés qui détermine les possibilités d'infiltration ou de ruissellement.

I - LA GEOLOGIE DU BASSIN

Le bassin versant de l'oued Grou donne une bonne illustration des reliefs de plateaux, crêtes et dépressions liés à une évolution morphologique longue et complexe, où les facteurs lithologiques, tectoniques et bioclimatiques ont joué de manière variable. Les reliefs ont été élaborés surtout en fonction des contrastes lithologiques des formations du Primaire exploités par l'érosion. Bien que variées, ces formations n'offrent guère actuellement de potentialités hydrogéologiques.

A - L'EVOLUTION GEOLOGIQUE ET LES FORMATIONS

Après une longue évolution géologique, où les phases tectoniques ont été nombreuses, le socle et la couverture sédimentaire ont été émergés dès la fin du Secondaire et soumis à des processus érosifs variables selon les conditions bioclimatiques du Tertiaire et du Quaternaire. Il en résulte que les affleurements géologiques du bassin sont essentiellement constitués de roches du Primaire.

1- L'évolution géologique

L'histoire géologique de la région (E. Roche 1950, G. Beaudet 1969) peut se schématiser de la manière suivante :

Au Primaire

Du Cambrien à la fin du Dévonien, la région n'a pas connu de véritables orogénèses mais plutôt des déformations modérées. Cette période

se caractérise par la succession d'épisodes sédimentaires calmes et de pulsations tectoniques limitées dans le temps, l'instabilité tectonique et sédimentaire du Dévonien contraste avec le calme sédimentaire du Silurien.

C'est au Carbonifère, et dans une moindre mesure au Permien, que furent plissées et faillées les assises paléozoïques. Mais la tectonique hercynienne n'apparaît que comme le paroxysme d'une longue suite de pulsations orogéniques différemment ressenties dans les diverses unités structurales de la région.

Au Secondaire

La mer du Trias a vraisemblablement recouvert complètement la surface post-hercynienne. Il est probable que la région ait été soulevée et érodée durant le Jurassique inférieur, ce qui justifie l'absence de sédiments de la mer du Lias dans la région, puisque son rivage était probablement assez proche du Moyen Atlas.

Après cette période, un soulèvement anté-crétacé se place entre le Bathonien moyen et l'Oxfordien inférieur. L'érosion anté-cénomaniennne paraît commencer au début du Jurassique moyen, mais rien n'indique un nouveau soulèvement durant la fin du Jurassique ou le début du Crétacé. L'érosion anté-cénomaniennne a donc exhumé une grande partie du socle hercynien, elle apparaît comme une phase préparatoire à l'élaboration de la surface éocène.

Du Cénomanienn au Lutétien, la mer se tient sur la lisière sud du bassin versant tandis que l'essentiel de la région était émergé.

Au Tertiaire

L'érosion se poursuit sur les surfaces émergées, nivelant des roches aussi différentes que les flyschs carbonifères ou les granites et les quartzites ordoviciens. Cette surface d'érosion s'est peut-être étendue jusqu'à la bordure du bassin sédimentaire crétacé, au sud, abandonnée par la régression fin-éocène. Un soulèvement a vraisemblablement eu lieu durant la période fin-éocène-oligocène.

C'est durant la période post-éocène que se sont mis en place les grands axes hydrographiques de la région. Le changement brutal d'orientation du Grou, près de Sidi Lamine, répond à la disposition des blocs inégalement

soulevés de la surface éocène.

Le Villafranchien est une période de relative stabilité tectonique. Il est caractérisé par des plans d'érosion partielle, parfois par de véritables aplanissements largement étalés. Mais le plus souvent, il est représenté par des glacis et des terrasses.

Au Quaternaire

Un soulèvement apporte la dernière retouche aux formes déjà dessinées à la fin du Tertiaire et au Villafranchien. Les régions traversées par le Grou supérieur et moyen ont été modérément soulevées en blocs. L'encaissement principal des vallées, déjà amorcé à l'Oligo-Miocène, est déclenché par les déformations fin-miocènes, et le modeste exhaussement quaternaire n'a fait que confirmer la tendance à l'incision.

2 - La localisation et la nature des formations géologiques

Les affleurements géologiques s'organisent grossièrement en bandes orientées du sud-ouest au nord-est, suivant les grandes axes structuraux caractéristiques du Plateau Central (Cf. carte, annexe I-1) :

- dans la partie orientale, s'étend un anticlinorium entre Sidi bou Abbad et Askar Tendra, constitué de roches s'étagant du Précambrien au Dévonien;

- vers l'ouest, la gouttière synclinale de Fourhal est allongée entre Oued Zem et le Ment. Les roches datent du Viséen et du Namurien;

- l'anticlinorium Khouribga-Oulmès est l'axe majeure du Paléozoïque. Les roches sont discordantes entre l'Ordovicien, le Silurien et le Carbonifère;

- de Sidi Bettache jusqu'aux environs de Tiflet, s'étale un vaste synclinal essentiellement constitué par les formations du Carbonifère inférieur. Vers le nord, entre Rabat et Tiflet, la structure se relève en un anticlinal ordovicien et silurien, orienté ouest-est.

Les caractéristiques lithologiques des séries affleurantes sont présentées à partir de l'analyse de la carte géologique de Rabat au 1/500.000^{ème} et de l'échelle litho-stratigraphique correspondante. Les séries affleurantes s'étendent du Cambrien inférieur au Miocène supérieur avec des lacunes de sédimentation, notamment celle du Jurassique.

a - Le socle hercynien

Il constitue l'essentiel des affleurements du bassin versant.

Le Cambrien

Le Cambrien moyen et inférieur, épais de plus de 2000 m au total, est constitué de schistes gris légèrement métamorphisés, de passées pyroclastiques, de micro-conglomérats et de lits de dolérites. Vers leur sommet, ces couches comportent un banc de calcaires conglomératiques. Des dépôts volcano-sédimentaires représentent la totalité du Cambrien inférieur. Il est possible que leur base appartienne encore à l'Infra-Cambrien.

Le Cambrien supérieur, puissant de 300 m environ, présente des séries schisteuses comprenant une série grés-quartzitique avec deux barres de quartzites claires et massives (épaisse chacune de 100 m environ), séparées par de minces passées grés-schisteuses.

Cet ensemble affleure dans la partie amont du bassin versant, il représente les formations de Bled el Gada.

L'Ordovicien

Puissante de 1500 m environ, cette série est constituée par des schistes noirs, homogènes et durs, mais très cassants. Leur partie inférieure et moyenne représente l'Ordovicien inférieur (schistes d'Asfar). Ils constituent les affleurements de la Plaine d'Asfar à l'amont du bassin et de la Plaine de Smala dans la partie médiane.

Au nord et au sud du Plateau d'Ezzhiliga, affleure l'Ordovicien Supérieur qui est constitué de quartzites interstratifiés avec des lits de schistes, de grés et de calcaires silicifiés.

Le Silurien

La série silurienne, épaisse de 150 m environ, essentiellement schisto-argileuse, est très altérable. A la base, des schistes gris-sombres contiennent quelques bancs calcaires. Les couches supérieures, toujours aussi fragiles, sont plus claires et montrent sur une cinquantaine de mètres un faciès de flysch, faisant alterner des passées décimétriques grés-quartzitiques avec des bancs schisteux plus épais. Cette série affleure sur les séries ordoviciennes au nord de la Plaine de Smala et au nord du Plateau

d'Ezzhiliga.

Le Dévonien

Une centaine de mètres de schistes à bancs calcaro-gréseux, d'origine marine, représente probablement le Givétien et le Dévonien supérieur. Le sommet de la série est caractérisé par des calcaires noduleux à ciment schisteux et ferrugineux. Le Dévonien n'affleure que dans la partie aval du bassin versant.

Le Carbonifère

Le Carbonifère inférieur débute avec le Tournaisien (ou Dinantien indifférencié). La série épaisse de 250 m environ est représentée par une alternance de schistes et de petits lits gréseux ou calcaires. Cette série affleure dans la partie aval du bassin versant, à la confluence de l'oued Grou avec l'oued Korifla.

Le Carbonifère moyen est caractérisé par les séries viséennes :

- le Viséen moyen et inférieur est représenté par des schistes assez friables séparés par de minces lits gréseux et des altérations rougeâtres de filons de dolérites. Ces schistes n'affleurent qu'à l'extrémité aval du bassin;

- le Viséen supérieur montre un conglomérat de base surmonté par des schistes d'épaisseur variable, puis par une couche de calcaires bleus massifs dont la puissance atteint 80 m. Au-dessus, un second conglomérat transgressif porte les schistes noirs et friables de Sidi Lamine, épais de 500 m environ dans la partie amont du bassin.

Le Carbonifère supérieur comporte deux étages :

- le Namurien qui présente dans la région une résistance particulière, car les bancs gréseux se multiplient alors que les passées schisteuses sont peu épaisses. Cette série représente les affleurements de Koudiat el Louz et de Fourhal dans la partie médiane du bassin. L'ensemble est épais de 1300 m environ;

- le Westphalien, discordant sur les couches du Silurien et de l'Ordovicien, comporte des schistes à lits charbonneux et surtout des conglomérats à éléments peu roulés et assez mal cimentés qui constituent le Plateau d'Ezzhiliga. L'épaisseur de la série atteint 1000 m environ.

Le Permien

Il n'est représenté que par les terrains rouges de l'Autunien de la dépression de Chougrane (partie médiane du bassin). Cette série est constituée d'argiles gréseuses rouges avec quelques passées de grés friable et surtout de conglomérats à galets inégalement roulés, dont certains de quartz. La puissance de la série est de 400 m environ.

b - La couverture sédimentaire

C'est une couverture totalement discordante qui ne couvre qu'une faible partie du bassin versant.

Le Trias

Les affleurements triasiques débutent par un grés quartzeux fin à ciment argileux, avec au dessus une série argilo-gréseuse dans laquelle s'interstratifient par endroit des bancs de sel; des passées basaltiques surmontent cet ensemble. Le Trias se termine par une série argileuse avec des passées salifères à sa base. L'ensemble affleure dans la dépression du Souk el Jemâa dans la partie aval du bassin. L'épaisseur de la série est de 800 m environ.

Le Cénomanién

Il débute par une faible couche marneuse bleu-noir que surmontent des bancs de calcaires marneux. Cette série tabulaire épaisse de 900 m environ, affleure dans la partie sud du bassin où elle constitue l'extrémité nord du Plateau des Phosphates.

Le Miocène supérieur et le Pliocène marin

Leur puissance ne dépasse pas 10 à 15 m, ils sont représentés par un faciès grés-marneux avec des bancs sablo-gréseux gris ou jaunâtres. Ces sédiments sont en discordance sur le Trias et le Carbonifère dans la partie aval du bassin

c - Les formations superficielles

Elle sont relativement peu importantes dans le bassin. On distingue trois types de formations superficielles :

- les alluvions anciennes sont constituées par des argiles et des cailloutis qui représentent les dépôts hérités les plus anciens (Villafranchien);

- les alluvions quaternaires sont constituées de petits graviers et de galets quartzitiques à peine émoussés, mêlés à de l'argile. Elles se situent sur une série de terrasses et de glacis étagés qui témoignent des entailles successives de l'oued Grou dans le substratum géologique;

- les alluvions récentes constituent des épandages fluviaux qui tapissent les thalwegs des cours d'eau. Elles sont constituées soit de galets schisteux ou quartzitiques, soit d'argiles et de limons. Leur épaisseur est très variable en fonction de la morphologie de la vallée principale de l'oued Grou.

Ces formations superficielles du bassin versant ont été étudiées à l'aide de la carte géomorphologique établie par G. Beudet 1969 (Cf. carte, annexe I-2).

Ainsi, le bassin versant de l'oued Grou s'est développé sur un substratum datant essentiellement de l'époque primaire.

D'une manière générale, les affleurements se présentent sous forme de bandes alternées, orientées nord-est sud-ouest. Cette orientation témoigne d'une tectonique de plissements anciens qui ont été, par la suite, largement tronqués (surface post-hercynienne). Les transgressions de l'ère secondaire n'ont été que partielles. La tectonique alpine (Secondaire-Tertiaire) a fait rejouer le socle et la couverture sédimentaire selon la même direction nord-est sud-ouest (plis et failles), avec un basculement général vers le nord-ouest qui oriente l'élaboration d'une nouvelle surface d'érosion recoupant l'ancienne. C'est sur cette surface que vont s'entailler l'oued Grou et ses affluents.

B - LES GRANDS ENSEMBLES MORPHOSTRUCTURAUX

L'oued Grou draine quatre unités morphostructurales (Cf. carte, annexe I-2), la Dépression Orientale, les plateaux et les crêtes du Haut-Pays et du Palier Intermédiaire et les bas plateaux du Palier Inférieur.

1 - La Dépression Orientale

S'étendant entre la bordure sud de la haute plaine de l'Askar Tendra au nord et la cuvette de Sidi Lamine au sud, la partie amont du bassin présente un paysage de plaines drainées par le Grou et ses affluents. La seule

Fig. I-2 : Le bassin-versant de l'oued Grou
coupes géologiques

LEGENDE : Cf. ANNEXE I-1

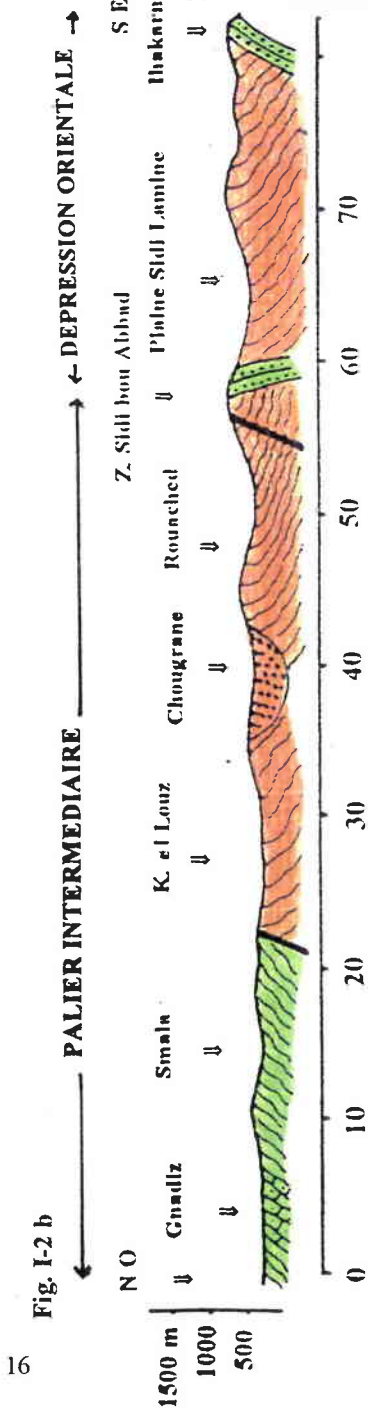
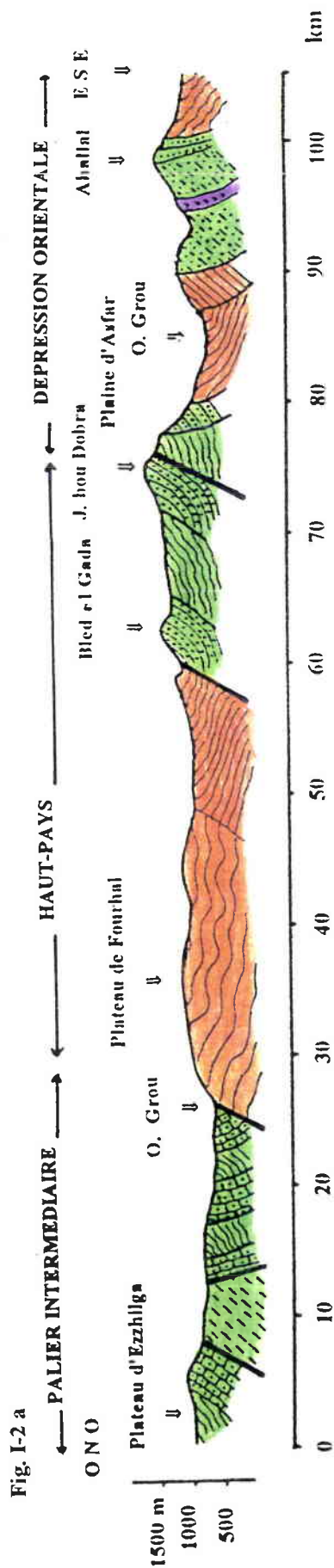


Fig. I-2 c

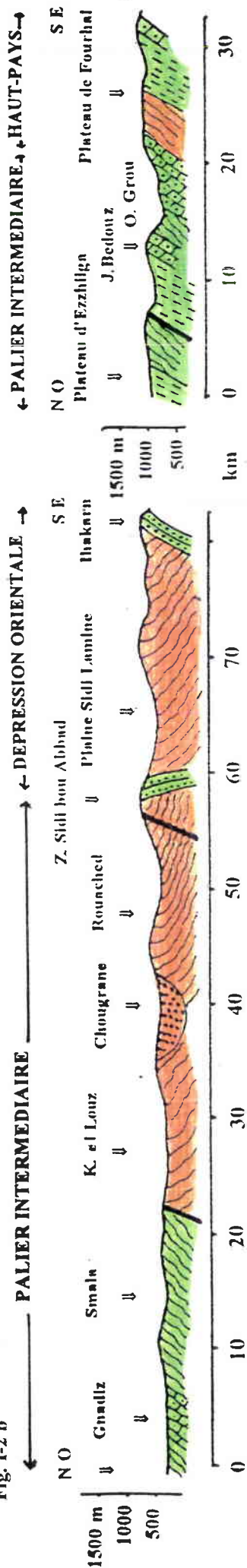


Fig. I-2 d

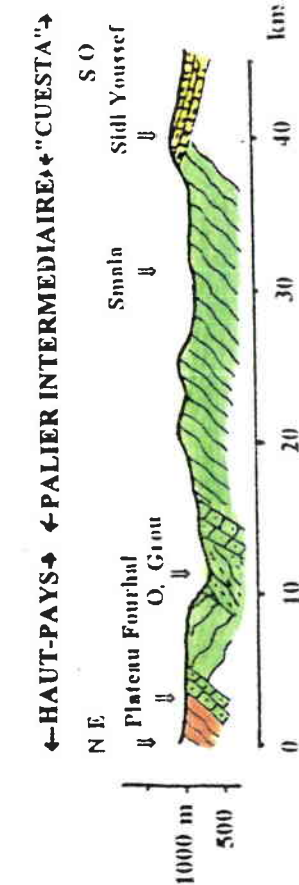
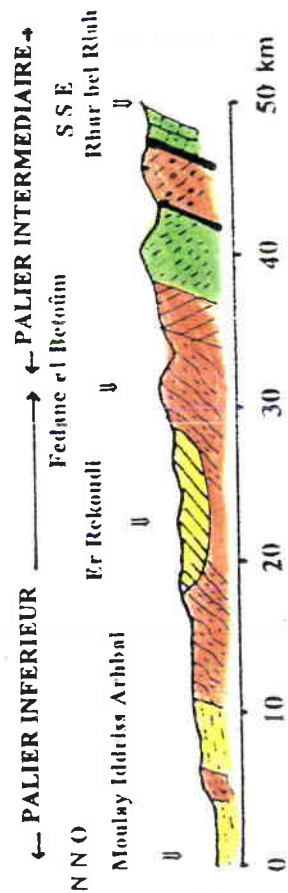


Fig. I-2 e



interruption entre les bassins d'Asfar et de Sidi Lamine est matérialisée par des crêtes quartzitiques isolées (Kehf en Sour) que l'oued Grou traverse en défilé.

La très haute vallée de l'oued Grou, nommé oued Aît Azzouz, est dominée au nord par l'abrupt d'érosion de l'Askar Tendra, à l'ouest par le rebord du synclinal perché d'Aguelmous et les barres du Jebel bou Dobra et à l'est par des conglomérats viséens, des cônes volcaniques et des coulées basaltiques du Jebel Ali et Aïssa.

La plaine d'Asfar (Cf. Fig. I-2 a), large de 10 km, offre un aspect différent. L'altitude est comprise entre 800 et 1000 m. Au nord et à l'ouest, les crêtes quartzitiques la dominent de 300 à 500 m. La brutalité et la rectitude du contact entre les crêtes et la plaine s'expliquent par la présence d'un réseau de failles et de fortes flexures qui juxtaposent les quartzites cambriens et les schistes cambro-ordoviciens d'Asfar. La plaine d'Asfar apparaît ainsi comme une dépression due à l'érosion différentielle, limitée au nord et à l'ouest par d'importants escarpements de lignes de failles, et à l'est et au sud par un encadrement montagneux moins imposant composé de lignes de crêtes discontinues, développées dans les schistes conglomératiques et calcaires du Viséen.

La plus vaste des plaines du Grou s'étend autour de Sidi Lamine et correspond à la partie occidentale des synclinaux schisteux du Viséen en discordance sur les quartzites et les schistes cambriens de l'anticlinorium de Bled el Gada. A l'ouest, la plaine est fermée par l'anticlinal de Zaouia Sidi bou Abbad (Cf. Fig. I-2 b) contre laquelle viennent butter les calcaires bleus du Viséen supérieur. Ce bassin schisteux est bordé de glacis étagés qui se sont développés en fonction de l'entaille de l'oued Grou et de ses affluents. La relative épaisseur du manteau colluvionnaire des glacis a préservé les schistes viséens d'une érosion trop violente.

2 - Le Haut-Pays

Au nord-est, la haute vallée du Grou est surplombée de 400 à 700 m par des crêtes cambriennes. Au sud et à l'ouest, le Grou sépare approximativement le Haut-Pays du Palier Intermédiaire mais la limite devient ici sinueuse, les hauteurs de Zaouia Sidi bou Abbad constituent au sud la terminaison méridionale des crêtes. A l'ouest, des crêtes quartzitiques prolongent un paysage appalachien au dessus des plateaux d'Ezzhiliga.

Les crêtes

A l'est, un ensemble de failles ou de fortes flexures assure le contact entre l'anticlinorium de Bled el Gada et la série schisteuse cambro-ordovicienne de la plaine d'Asfar (Cf. Fig. I-2 a). En direction du nord-est, des plis serrés et des flexures subverticales limitent l'anticlinorium. Le rebord méridional du synclinal perché de la vallée d'Aguelmous et ses crêtes rigides sont des escarpements de lignes de failles. Les crêtes redressés et les barres de quartzites dominant abruptement les schistes cambro-ordoviciens de la Plaine d'Asfar.

La retombée périclinale méridionale de l'anticlinorium est compliquée par des plis faillés. Le plus important est celui de Zaouia Sidi bou Abbad, en rive gauche de l'oued Grou, dont les deux flancs sont fracturés : à l'ouest, une faille fait succéder deux alignements de crêtes quartzitiques tandis qu'à l'est une faille rectiligne accole les quartzites cambriens aux terrains viséens de la plaine Sidi Lamine (Cf. Fig. I-2 b). Entre ces crêtes, nivelés de 1000 à 1070 m d'altitude, existe une sorte de combe annulaire. Un épais massif de dolérites précambriennes, au coeur de Zaouia Sidi bou Abbad, a bien résisté à l'érosion alors que, périphériquement, la série volcano-sédimentaire du Cambrien inférieur a été entaillée par les affluents du Grou.

Dans le flanc occidental de l'anticlinorium, une faille, orientée sud-ouest nord-est, dédouble l'enveloppe quartzitique en deux alignements de crêtes. Celle au contact des flyschs viséens du synclinatorium de Fourhal reste la plus importante (Cf. Fig. I-2 a). Le pendage est assez modéré et l'altitude est comprise entre 1000 et 1400 m.

Les dépressions

Entre ces crêtes, des dépressions perchées ont été formées grâce aux contrastes lithologiques. L'alignement des sommets est de direction sud-ouest nord-est mais les complications tectoniques font qu'ils sont morcelés. Deux ensembles de roches résistantes arment la plupart des crêtes : les quartzites de l'Ordovicien, les plus épais et les plus divers, et les quartzites du Silurien, minces et lenticulaires.

Dans le sud-ouest, un accident majeur, orienté sud-ouest nord-est affecte la région de Smala. En face de cet accident, les assises carbonifères du synclinatorium de Fourhal (Cf. Fig. I-2 a) constituent une sorte d'amygdale

avancée vers l'ouest.

Vers le nord, en rive droite de l'oued Grou, des synclinaux replissés font affleurer à nouveau les quartzites ordoviciens qui constituent plusieurs alignements de direction nord-est sud-ouest les altitudes n'y dépassent guère les 1000 m. En revanche, sur l'autre rive du Grou, un synclinal étroit fait apparaître les quartzites siluriens sous forme de barres minces mais aiguës, avec des altitudes comprises entre 850 et 1050 m.

3 - Le Palier Intermédiaire

En fonction des grands traits morphostructuraux hérités du Tertiaire et du Villafranchien et compte tenu de l'inégale entaille, il convient de distinguer deux régions.

a - de Rouached au Koudiat el Louz

Dans cette région, les différences lithologiques ont été exploitées par l'érosion (Cf. Fig. I-2 b). Les croupes alignées de Rouached et de Koudiat el Louz cernent la Plaine de Chougrane. L'ensemble est dominé au sud par la "cuesta" crétacée.

Les croupes alignées

Dans le Rouached et autour de Koudiat el Louz, les faciès des flyschs viséens sont modelés en croupes alignées entre 800 et 900 m, dominant de presque 200 m l'immense glacis villafranchien développé dans les couches autuniennes de Chougrane. Les larges croupes allongées du sud-ouest au nord-est dominant abruptement les vallées et constituent parfois des lanières de plateaux comme Koudiat el Louz (904 m). Elles s'abaissent lentement en direction du nord-ouest. La vallée à méandres du Grou, encaissée de 350 m environ dans les croupes, a souvent l'allure d'une gorge au fond de laquelle de minces terrasses sont installées sur les rives convexes.

La plaine

Entre le Rouached et le Koudiat el Louz, la Plaine de Chougrane est modelée dans les terrains peu résistants de l'Autunien. Les bancs alternés d'argiles rouges et de grés tendres, s'orientent en direction sud-est, là où une faille orientée sud-ouest nord-est les met en contact avec le Viséen supérieur de Rouached. Les terrains tendres de ce fossé permien sont nivelés par un

immense plan d'érosion dont l'altitude passe de 750 au sud-sud-ouest à 600 m au nord-nord-est.

La "cuesta"

Située au sud du bassin, le sommet de la pseudo cuesta atteint environ 1000 m (Cf. Fig. I-2 d). Le tracé du talus crétacé constitue un escarpement continu d'est en ouest, sur 50 km environ. Ce talus est façonné dans les terrains calcaires du Crétacé qui forment le sommet de l'escarpement et qui reposent en discordance sur les formations paléozoïques résistantes. Le pendage général du Crétacé est orienté vers le sud. Le talus fait effectivement figure de cuesta, au sud de Chougrane, là où les calcaires turoniens surmontent les marnes cénomaniennes et les assises tendres du Permien.

b - de Smala à Ezzhiliga

Dans cette région, les aplanissements anciens marquent plus le paysage. On peut distinguer deux grandes unités : la Plaine de Smala et le Plateau d'Ezzhiliga.

La plaine

La Plaine de Smala (600 à 800 m) est façonnée dans les séries essentiellement schisteuses de l'Ordovicien inférieur et moyen. A l'est, la faille principale de la région, orientée sud-ouest nord-est, les met directement au contact des flyschs namuriens et des schistes gréseux de Koudiat el Louz. Dans la plaine, quelques crêtes d'origines structurales, armées par les quartzites de l'Ordovicien supérieur s'élèvent à plus de 900 m. Ces crêtes cloisonnent la plaine en sous-unités plus ou moins indépendantes.

Les plateaux

Sur la rive gauche de l'oued Grou, les plateaux d'Ezzhiliga (Cf. Fig. I-2 c) se situent aux environs de 800 m. Ils représentent des témoins de la surface miocène qui constitue la zone de partage des eaux entre l'oued Grou et l'oued Korifla. Le plus rigide de ces plateaux domine vers l'est l'entaille du Grou. Le conglomérat discordant du Westphalien protège les schistes du Silurien sous-jacent et fait obstacle à l'érosion régressive des affluents du Grou. Mais le paysage est dominé par des crêtes quartzitiques de l'Ordovicien supérieur, comme le Jebel Bedouz (1020 m), qui sont recoupées par la vallée du Grou.

Plus au nord d'Ezzhiliga, quelques témoins de la surface d'érosion de la fin du Tertiaire sont conservés en position d'interfluve sur les conglomérats westphaliens et sur les schistes siluriens. Cette surface est cependant largement démantelée par l'incision des affluents du Grou tout proche.

Sur la rive droite, le plateau de Fourhal (Cf. Fig. I-2 c) se réduit en fait à des interfluvés convexes et larges de quelques centaines de mètres. C'est au sud-est qu'il culmine à 1100 m tandis que les altitudes diminuent vers le nord-ouest et l'ouest.

4 - Le Palier Inférieur

Au nord-est d'Ezzhiliga, les croupes et les crêtes constituent une nette limite entre les Paliers Intermédiaire et Inférieur. Ces formes sont façonnées dans les roches contrastées de l'Ordovicien et du Silurien (Cf. Fig. I-2 e).

Vers le nord-ouest, s'ouvre le large couloir de Souk el Jemâa excavé par l'oued Grou dans le synclinal triasique. Il est large de 8 à 9 km et profond de 300 m environ. Les plateaux argileux du Trias culminent vers 500 m d'altitude. Ils sont découpés par des vallées profondes aux pentes abruptes. Dans cette région, le cours de l'oued Grou est conforme à l'inclinaison générale de la topographie villafranchienne en direction nord-ouest et aucune déformation locale ne paraît avoir guidé l'incision. Le Trias est ici relativement peu épais et l'oued Grou l'entaille facilement pour atteindre les formations du Carbonifère sous-jacentes. En rive gauche, l'oued Mouilha entaille le plateau argileux triasique de plus de 150 m en deux grandes parties alors qu'en rive droite, les petits affluents l'entaillent en larges croupes qui dominent abruptement les vallées.

Vers l'aval, la même surface constitue des replats étagés de 50 à 100 m environ au-dessus des deux rives du Grou. En rive gauche, les plateaux schisteux du Viséen sont fragmentés en blocs et dénivelés par des failles anté-miocènes, orientées sud-ouest nord-est. En rive droite, sur les mêmes plateaux schisteux, subsiste un recouvrement sableux du Mio-Pliocène. Ces replats étagés sont découpés par un réseau dense de petits vallées aux versants convexes, qui se raccordent directement à la vallée de l'oued Grou.

Ainsi, d'une manière générale, le bassin versant de l'oued Grou s'inscrit sur une surface d'érosion polygénique, orientée vers le nord-ouest, qui tronque essentiellement les couches du Primaire. Cependant, l'analyse

morphostructurale a permis de dégager quatre grands ensembles de reliefs : le Hauts Pays, la Dépression Orientale, le Palier Intermédiaire, et le Palier Inférieur. Chaque ensemble offre une grande variété de formes de relief, liée à des conditions structurales complexes mises en valeur par l'érosion différentielle et les entailles successives de l'oued Grou et ses affluents.

C - LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES

Du fait d'un substratum primaire à dominante schisteuse, le bassin du Grou est essentiellement imperméable. Cependant l'existence de strates gréseuses ou conglomératiques, parfois épaisses et peu cimentées, permet le développement de nappes locales qui alimentent quelques sources généralement non pérennes. La couverture sédimentaire, calcaire ou sableuse, offre plus de potentialité aquifère mais elle n'occupe qu'une faible superficie du bassin.

1 - La méthode utilisée

Les ensembles lithologiques du substratum et des formations superficielles ont été classés en fonction de leurs types de perméabilité à l'infiltration et de leurs caractéristiques hydrodynamiques. La méthode utilisée est celle de l'Atlas de la lithologie et de la perméabilité du bassin Rhin-Meuse (J.F. Zumstein, E. Gille, J.P. Decloux et P. Paris, 1989).

Le principe de classification retient 3 grands types de perméabilité des roches, notées P, et des formations superficielles, notées S :

- 1 : perméable
- 2 : peu perméable
- 3 : imperméable

Les types de porosité et de dynamique de l'eau dans la roche, sont codifiés de la façon suivante :

- 0 : porosité d'interstice et aquifère drainant
- 1 : porosité d'interstice et aquifère drainée
- 2 : porosité de fissure et réseau souterrain

- 3 : porosité d'interstice et / ou de fissure et aquifère discontinu
- 4 : zone urbanisée et réseau anthropique.

Pour le bassin Rhin-Meuse, sur le territoire français, le croisement de ces critères a permis de codifier des classes de perméabilité comme indiqué dans le tableau I-1.

2 - L'application aux formations géologiques du bassin versant

Les différents affleurements lithologiques du bassin versant de l'oued Grou ont été classés de la manière suivante (Cf. carte, annexe I-3).

a - Les ensembles lithologiques imperméables

Ils sont représentés par deux classes :

- P31 (marnes et argiles). Elle correspond à l'ensemble du Trias argileux. Ces formations affleurent dans la dépression du Souk el Jemâa située au nord-ouest du bassin versant. Elles contiennent quelques intercalations de grès quartzeux et des passées basaltiques qui ne modifient guère l'imperméabilité de l'ensemble.

- P32 (roches compactes et compactées). Elle regroupe l'ensemble des séries essentiellement schisteuses du Cambrien au Carbonifère moyen et inférieur. En général, ces roches compactes sont imperméables mais peuvent présenter localement des fissures qui favorisent une faible infiltration. Ces terrains affleurent dans la partie supérieure et médiane du bassin.

b - Les ensembles lithologiques semi-perméables

Deux classes sont représentées :

- P21 (roches à perméabilité d'interstice affaiblie par une fraction fine). Cette classe représente les séries du Permien affleurant dans la partie moyenne du bassin versant (Dépression de Chougrane). Ces terrains sont constitués par des argiles gréseuses rouges avec des strates de grès friable et des conglomérats.

- P22 (alternance d'une roche à perméabilité de fissure dominante avec une roche imperméable). Dans le bassin versant de l'oued Grou on a essentiellement deux séries :

Tableau I-1 : Classification des perméabilités

	DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LA ROCHE				
TYPE D'AQUIFÈRE	Aquifère drainant	Aquifère drainé	Réseau souterrain	Aquifère discontinu	Réseau anthropique
POROSITÉ	Interstice	Interstice	Fissure	Interstice et / ou fissure	Zone Urbanisée
CODIFICATION	0	1	2	3	4
PERMÉABILITÉ					
<u>Roches</u> :					
perméables					
P1	P10	P11	P12	--	--
peu perméables					
P2	--	P21	P22	P23	--
imperméable					
P3	--	P31	P32	P33	P34
<u>Formations superficielles</u> :					
perméables					
S2	S10	S11	--	--	--
peu perméables					
S2	--	--	--	--	--

Source : Atlas de la lithologie et de la perméabilité du bassin Rhin-Meuse (1989)

- la série gréso-schisteuse du Carbonifère supérieur. Ces formations sont représentées par des bancs gréseux avec des passées schisteuses du Namurien affleurant dans la partie médiane du bassin;

- les calcaires marneux cénomaniens de la côte située au sud de la partie moyenne du bassin versant. Les faciès sont calco-marneux et les couches marneuses forment la base de la côte.

c - Les ensembles lithologiques perméables

Une seule classe est ici représentée :

- P11 (roche à perméabilité d'interstice dominante). Elle est représentée par deux séries :

- la série sablo-marneuse et sablo-gréseuse du Miocène supérieur et du Pliocène marin, affleurante dans la partie aval du bassin versant. Cependant, sa puissance, de 10 à 15 m environ, ne permet pas de constituer un important réservoir;

- la série du Westphalien du plateau d'Ezzhiliga qui comporte surtout des conglomérats à éléments peu roulés et assez mal cimentés. Ceux-ci permettent l'existence d'une nappe mais à faible rendement.

d - Les formations superficielles

Les formations superficielles sont du Villafranchien et du Quaternaire. Elles sont représentées par deux classes :

- S1 (sables, graviers et galets). Ce sont des alluvions anciennes et moyennes constituées de cailloutis avec des galets schisteux et quartzitiques mal roulés qui constituent des réservoirs de faible capacité, notamment au contact des roches imperméables. Elles sont bien conservées uniquement dans la Dépression Orientale.

- S2 (formations argilo-limoneuses dominantes). Ces formations récentes sont peu perméables dans l'ensemble du bassin versant. Elles s'étendent dans les fonds des vallées du Grou et de ses affluents. Ce sont des alluvions argilo-limoneuses, renfermant une nappe phréatique de très faible capacité, qui n'ont pas été cartographiées du fait de leur faible extension.

Ainsi, le substratum du bassin du Grou essentiellement imperméable, favorise plus l'écoulement de surface que la constitution de nappes aquifères. Cependant les formations perméables et semi-perméables, qui occupent une superficie de moindre importance, peuvent comporter quelques niveaux aquifères.

3 - Les nappes souterraines

La perméabilité des roches, définie précédemment, explique l'existence peu importante des nappes souterraines dans le bassin. Seuls les affleurements perméables et semi-perméables peuvent receler des nappes. Les niveaux aquifères déterminants sont les suivants :

a - Les nappes des affleurements perméables :

- la nappe de la série du Miocène et du Pliocène : essentiellement sablo-marneux et sablo-gréseux, les sédiments mio-pliocènes, situés au dessus de la série schisteuse du Viséen, contiennent des nappes d'importance diverse (partie aval du bassin versant). Mais du fait de leur position structurale, ces nappes perchées ont tendance à tarir rapidement au cours de l'été;

- la nappe de la série westphalienne : les conglomérats mal cimentés de cette série, de faible extension à l'affleurement, reposent sur la série schisto-marneuse du Silurien qui constitue le mur de cette nappe. Celle-ci est à l'origine de quelques sources qui alimentent les affluents de rive gauche du Grou moyen (Plateau d'Ezzhiliga). Mais, pour des raisons tectoniques (failles, pendage multiple), cette série ne représente qu'un réservoir de faible importance.

b - Les nappes des affleurements semi-perméables :

- la nappe des calcaires marneux cénomaniens : sa constitution est favorisée par le contact des faciès semi-perméables du Cénomaniens et des faciès imperméables du Namurien et du Viséen sous-jacents. Mais cette strate calcaire ne représente pas un réservoir pour le bassin du Grou car la majeure partie des eaux souterraines est déviée vers le bassin de l'Oum er Rabia pour des raisons tectoniques (pendage des couches vers le sud). De ce fait, l'entaille des affluents de rive gauche du Grou dans le front de la côte est faible (sources de faible importance);

- la nappe de la série permienne : par leur nature argilo-gréseuse avec des passées gréseuses ou conglomératiques, la nappe de cette série est de faible importance et l'eau qu'elle peut contenir est toujours salée;

- la nappe de la série du Carbonifère supérieur : dans les séries grésoschisteuses du Namurien, une perméabilité de fissures existe dans les bancs de grés qui jouent le rôle de drains par rapport aux schistes environnants. Ces formations sont le siège de petites sources au contact des schistes plus compacts à leur base.

Enfin, pour des raisons tectoniques locales, on note l'existence de quelques sources dans la partie amont de l'oued Aït Azouz, dans les séries schisto-marneuses du Silurien au pied de l'Askar Tendra.

Mais ces formations aquifères ne constituent pas des réservoirs importants. Du fait de la tectonique (failles multiples, pendage des séries cénomaniennes vers le sud,...) et de la faible extension des séries perméables, les nappes souterraines se vidangent rapidement et n'alimentent guère les cours d'eau en période de basse eaux. La quasi totalité des affluents, qui débutent par une source, ne sont que des oueds temporaires.

c - Les nappes des formations superficielles :

Les remblaiements alluviaux sont bien développés dans la partie amont du bassin (plaines d'Asfar et de Sidi Lamine). Ils constituent dans cette région, un réservoir aquifère aux potentialités non négligeables. Cependant, du fait de la faible épaisseur de ces formations superficielles, les réserves sont limitées et dépendent fortement des fluctuations climatiques d'une année à l'autre (alimentation et vidange rapide).

Dans les parties moyenne et aval du bassin, les vallées de l'oued Grou et de ses affluents ne comportent guère de formations alluviales susceptibles de constituer des réservoirs permanents (formations peu étendues, peu épaisses et de faible perméabilité).

4 - Comparaison des bassins versants aux stations hydrométriques

Le tableau I-2 donne la répartition des formations lithologiques, en fonction de leur perméabilité, pour les bassins versants aux trois stations hydrométriques.

a - Le bassin versant à la station Ouljet Haboub

La station, située à la limite de la dépression de Chougrane et des collines du Koudiat el Louz, délimite le bassin amont du Grou qui comporte la totalité de la Dépression Orientale, la majeure partie du Haut-Pays et une petite partie du Palier intermédiaire.

Le substratum est essentiellement imperméable (75 %), avec quelques affleurements semi-perméables (17 %) au niveau du Palier Intermédiaire. Seuls les grès et conglomérats du Permien (dépression de Chougrane) constituent des petits aquifères qui alimentent des sources à faible débit. Cependant, lors des années humides, les remblaiements alluviaux de la Dépression Orientale peuvent contribuer au soutien des écoulements de surface au début de la période estivale.

Tableau : I-2 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU :
Répartition des roches du substratum, en fonction de leur perméabilité, dans
les bassins versants aux stations hydrométriques

Substratum	Classes	Formations	B.V O H	B.V S J	B.V R F
Imperméable	P31	Trias	0 %	0 %	5 %
	P32	Viséen Dévonien Silurien Ordovicien Cambrien	75 %	66 %	61 %
Semi-perméable	P21	Permien	6 %	4 %	3 %
	P22	Cénomanién Namurien	11 %	20 %	18 %
Perméable	P11	Miocène Sup. et Pliocène marin Westphalien	0 %	6 %	9 %
Formations superficielles	S1	Quaternaire	8 %	4 %	4 %

B.V O H : bassin versant Ouljet Haboub (1627 km²),

B.V S J : bassin versant Sidi Jabeur (3067 km²)

et B.V R F : bassin versant Ras el Fathia (3540 km²)

b - Le bassin versant à la station Sidi Jabeur

La station délimite l'essentiel du bassin représentatif du Plateau Central élevé. Le bassin englobe la Dépression Orientale, le Haut-Pays et le Palier Intermédiaire, la station se situant à la limite aval de ce palier.

Le substratum est un peu moins imperméable (66 %). Les affleurements semi-perméables et perméables du Palier Intermédiaire couvrent donc une plus grande superficie (30 %). On pourrait en déduire une meilleure alimentation des écoulements de surface par les nappes souterraines, cependant seuls les conglomérats westphaliens du Plateau d'Ezzhiliga contiennent une nappe à faible rendement qui alimente l'oued Felouat, un affluent de rive gauche de l'oued Grou.

c - Le bassin versant à la station Ras el Fathia

La station, située à quelques kilomètres du lac du barrage de Sidi Mohamed ben Abdalah, est représentative de l'ensemble du bassin de l'oued Grou, en amont de la confluence avec l'oued Korifla. Le bassin englobe les grands ensembles morphostructuraux précédents auxquels s'ajoute le Palier Inférieur. Ce palier comporte un substratum imperméable essentiellement schisteux (Carbonifère inférieur) sur lequel reposent en discordance les argiles gréseuses triasiques surmontées par les sables et grès mio-pliocènes. Ces dernières formations perméables accroissent légèrement la perméabilité de l'ensemble du bassin qui reste toutefois essentiellement imperméable (61 %). Dans ces niveaux gréseux et sableux, des nappes perchées alimentent quelques sources le long de l'oued Grou et de l'oued Mouilha, son affluent de rive gauche. Ses sources ont cependant un faible débit et ont tendance à tarir rapidement en période estivale.

Ainsi, globalement le bassin de l'oued Grou et les sous-bassins aux stations hydrométriques sont imperméables. Les formations semi-perméables et perméables ne constituent pas des aquifères de grande capacité susceptibles de soutenir de manière importante les écoulements des oueds en période de basses-eaux. La vidange de ces aquifères est d'autant plus rapide que les formations géologiques sont généralement très fracturées, avec des pendages accentués. Le régime hydrologique devrait donc être similaire aux différentes stations hydrométriques.

II - LES PARAMETRES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN ET DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Si la nature du substratum géologique est fondamentale pour apprécier la transformation des précipitations en ruissellement de surface ou en infiltration souterraine, d'autres paramètres du bassin versant peuvent contribuer à expliquer le régime des écoulements moyens et extrêmes, étudiés par la suite aux différentes stations hydrométriques situées sur l'oued Grou. C'est le cas des caractéristiques morphométriques du bassin et du réseau hydrographique.

A - LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN

Les caractéristiques étudiées sont la forme du bassin qui a une incidence sur la concentration des eaux dans la rivière principale et le relief qui peut expliquer la répartition des précipitations (effet d'altitude) et contribuer à l'accentuation du ruissellement (effet de pente).

1 - La forme du bassin versant

Le bassin versant de l'oued Grou a une forme assez complexe du fait du tracé particulier de la vallée qui recoupe les différents ensembles morphostructuraux étudiés précédemment.

La forme d'un bassin versant est généralement traduite par les indices classiques suivants :

- l'indice de compacité de Gravélius (K_c) qui permet de comparer le périmètre stylisé du bassin (P , en km) à celui d'un cercle qui aurait la même surface que le bassin (A , en km^2) :

$$K_c = \frac{0.28 \times P}{\sqrt{A}}$$

- l'indice d'allongement d'Horton (I_H) qui est le rapport entre la plus grande longueur interne du bassin (L_h , en km), déterminée à partir de l'exutoire, et la plus grande largeur du bassin (l_h , en km) perpendiculaire à L_h :

$$I_H = \frac{L_h}{l_h}$$

Pour cet indice, la forme en arc du bassin du Grou ne permet pas de tracer en une seule droite la plus grande longueur interne du bassin sans recouper la limite de ce bassin versant. De ce fait, il a fallu adapter la méthode en déterminant des segments de droite qui respecte au mieux les principaux changements de direction de la vallée principale (Cf. annexe I-4) :

-LA, de l'extrémité amont du bassin à la confluence des oueds Grou et Sidi Lamine;

-LB, de la confluence précédente à la station hydrométrique de Ouljet Haboub;

-LC, de cette station au changement de direction vers le nord de l'oued Grou;

-LD, de ce coude de l'oued Grou à la station hydrométrique de Sidi Jabeur;

-LE, de cette station à la station hydrométrique de Ras el Fathia;

-LF, de cette dernière station à la confluence de l'oued Grou avec l'oued Korifla (exutoire du bassin étudié).

Pour chaque segment de droite, la plus grande largeur du bassin, perpendiculaire à ce segment, a été mesurée (1A, 1B, ...).

A partir de ces données, les valeurs de Lh et lh ont été calculées pour les bassins aux stations hydrométriques et pour le bassin global à la confluence avec l'oued Korifla :

- Lh = somme des segments de droite inclus dans le bassin,

- lh = moyenne des plus grandes largeurs du bassin correspondantes aux segments de droite.

Les valeurs des paramètres utilisés et des indices de forme calculés sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau I-3 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU :
Les indices de formes des bassin versants

Bassins versants	Ouljet Haboub	Sidi Jabeur	Ras el Fathia	Bassin total
Périmètre réel (km)	247	395	467	545
Périmètre stylisé (km)	218	313	382	416
Surface (km ²)	1627	3067	3540	3820
$Kc = \frac{0.28 \times P}{\sqrt{A}}$	1.5	1.6	1.8	1.9
Lh	77	127	162	182
lh	27	31	29	26
$IH = \frac{Lh}{lh}$	2.8	4.1	5.6	7

Les valeurs des indices montrent que le bassin de l'oued Grou a déjà une forme allongée à la première station hydrométrique (Ouljet Haboub).

Cet allongement s'accroît progressivement aux stations suivantes (Sidi Jabeur et Ras el Fathia) jusqu'à l'exutoire aval (confluence avec l'oued Korifla). Le coefficient de compacité de Gravélius (Kc) est pratiquement égale à 2 pour l'ensemble du bassin, ce qui est une valeur très élevée. Mais c'est l'indice d'allongement d'Horton modifié (IH) qui visualise le mieux la forme du bassin. En effet, pour la globalité du bassin, on a un indice de 7, ce qui signifie que la forme du bassin est sept fois plus longue que large, et c'est ce qui apparaît visuellement à la première observation.

Cet allongement est essentiellement lié au fait que l'oued Grou n'a pas d'affluent important. En rive droite, de petits affluents entaillent le Haut-Pays (Aguelmous, Bled el Gada, Fourhal), mais l'essentiel des écoulements est dirigé vers le nord où ils alimentent l'oued Bou-Regreg. Sur cette rive, vers l'aval, des affluents très courts entaillent le Palier Inférieur. En rive gauche, le réseau affluent est un peu plus développé. C'est le cas de l'oued Sidi Lamine dans la Dépression Orientale. Dans le Palier Intermédiaire, des affluents non pérennes ont pu se développer dans les dépressions de Chougrane et de Smala, le seul affluent pérenne est l'oued Felouat qui

s'inscrit dans le plateau d'Ezzhiliga. Dans le Palier Inférieur, seul l'oued Mouilha a une certaine importance. Cependant, ces affluents de rive gauche ne contribuent guère à l'extension latérale du bassin car ils ont un tracé le plus souvent parallèle au tracé de l'oued Grou. Ils ne peuvent guère s'étendre vers le sud dans le Plateau des Phosphates où s'inscrit le réseau affluent de l'oued Oum er Rabia et vers l'ouest où le réseau affluent de l'oued Korifla est mieux développé.

Le bassin versant de l'oued Grou est donc original par sa forme très allongée qui induit un comportement hydrologique spécifique. Ainsi, il est prévisible que le temps de concentration des eaux de ruissellement doit être de plus en plus important au fur et à mesure de la progression vers l'aval. C'est le cas en particulier pour les écoulements de crue qui seront étudiés par la suite.

2 - Le relief

L'oued Grou et ses affluents entaillent de manière plus ou moins importante les différents ensembles morphostructuraux du Plateau Central marocain. Les reliefs qui en résultent peuvent être visualisés directement par la répartition des altitudes (carte et courbe hypsométriques) et indirectement par des indices globaux (indices de relief).

a - L'hypsométrie

La carte hypsométrique (Cf. annexe I-5) a été établie par tranche d'altitude de 200 m, allant de 0 à 1600 m. A partir de cette carte, le calcul des surfaces par tranche d'altitude a permis de réaliser les histogrammes et les courbes hypsométriques des bassins versants aux stations hydrométriques et du bassin versant global de l'oued Grou, à la confluence avec l'oued Korifla.

La carte hypsométrique fait apparaître trois ensembles de reliefs :

- un premier ensemble, supérieur à 1000 m correspondant aux lignes de crêtes qui cernent la Dépression Orientale et qui représentent, en partie, la retombée méridionale du Haut Pays;

- un deuxième ensemble, compris entre 600 et 1000 m, qui couvre une large surface englobant la Dépression Orientale et le Palier Intermédiaire. Entre 800 et 1000 m, se situent la plaine d'Asfar, le talus crétacé, les plateaux de Fourhal et d'Ezzhiliga et les croupes de Rouached et de Koudiat el Louz.

Entre 600 et 800 m, sont comprises les plaines de Sidi Lamine, de Chougrane, de Smala et la vallée de l'oued Felouat qui entaille le plateau d'Ezzhiliga;

- le dernier ensemble, inférieur à 600 m, représente les plateaux du Palier Inférieur et les vallées de l'oued Grou et de ses affluents qui entaillent ces plateaux et les reliefs du Palier Intermédiaire.

Cette répartition des reliefs correspond donc assez bien aux ensembles géomorphologiques analysés précédemment (Cf. croquis géomorphologique, annexe I-2).

Les histogrammes et les courbes hypsométriques (Cf. annexe I-6) montrent une évolution progressive de la répartition des altitudes, de l'amont vers l'aval du bassin versant :

- à la station hydrométrique d'Ouljet Haboub, le bassin versant amont a une superficie de 1627 km² (43 % de la surface totale). Les altitudes sont toujours supérieures à 600 m, avec une concentration importante entre 600 et 1000 m (83 %) qui correspond aux plateaux et aux hautes plaines de la Dépression Orientale et de la partie amont du Palier Intermédiaire. Les altitudes supérieures à 1000 m, qui représentent les lignes de crêtes, ne couvrent que 17 % de la superficie de ce bassin;

- à la station de Sidi Jabeur, le bassin intermédiaire a une superficie de 3067 km² (80 % de la surface totale). La station, située à la limite aval du Palier Intermédiaire, détermine un bassin qui prend en compte la totalité des reliefs de ce palier (plateaux, croupes, hautes-plaines et entaille de la vallée de l'oued Grou) et ceux de la Dépression Orientale (hautes-plaines et lignes de crêtes). La tranche d'altitude entre 600 et 1000 m est ici encore très importante (78 %), elle montre bien l'influence dominante des reliefs de plateaux et de hautes-plaines de la Dépression Orientale et du Palier Intermédiaire.

- la station de Ras el Fathia est pratiquement à l'exutoire de l'ensemble du bassin versant de l'oued Grou à la confluence avec l'oued Korifla. Ce bassin de 3540 km² couvre 93 % de la surface totale du bassin global (3820 km²). La répartition des altitudes n'est donc guère différente entre le bassin à la station hydrométrique et le bassin global comme le montrent les histogrammes et les courbes hypsométriques. Les altitudes entre

600 et 1000 m sont toujours dominantes (71 % à la station et 67 % pour le bassin global). Par rapport aux bassins précédents, ce sont les altitudes inférieures à 600 m qui prennent un peu plus d'importance (22 % et 27 %). Celles-ci sont représentatives des plateaux du Palier Inférieur et des vallées qui entaillent ce palier et les reliefs du palier précédent (Palier Intermédiaire).

Ainsi, tous les bassins sont dominés par les reliefs de hauts-plateaux et de hautes-plaines (600 à 1000 m) qui caractérisent le Palier Intermédiaire et la Dépression Orientale. Vers l'amont, les lignes de crêtes, peu importantes en superficie, forment un contraste avec les hautes-plaines de la Dépression Orientale. Vers l'aval, les bas-plateaux du Palier Inférieur et l'élargissement des vallées (oueds bou Regreg, Grou et Korifla) apportent une nuance au relief général du Plateau Central marocain qui est caractérisé par une série de surfaces d'érosion. Celles-ci, souvent polygéniques, ont été soulevées tardivement (Mio-Pliocène) et n'ont pas donné lieu à une grande différenciation dans l'amplitude des formes de relief du fait du faible contraste lithologique des formations du Primaire.

b - Les indices de relief

On peut déterminer pour chaque bassin des indices de relief qui facilitent leur comparaison.

Pour calculer ces indices, on utilise les paramètres suivants :

- la dénivelée théorique (Dt) qui est la différence entre l'altitude maximale et l'altitude minimale du bassin, celle-ci correspondant généralement à l'altitude de la rivière à l'exutoire du bassin versant :

$$Dt = H. \text{ max} - H. \text{ min (en m)}$$

- la dénivelée utile (Du) qui ne tient pas compte des altitudes extrêmes, souvent peu significatives de la répartition des altitudes, comme c'est le cas pour le bassin de l'oued Grou. On utilise ainsi les altitudes à 95 % et à 5 %, déterminées à partir de la courbe hypsométrique :

$$Du = H. 95 \% - H. 5 \% \text{ (en m)}$$

- la longueur du rectangle équivalent : chaque bassin peut être rapporté à un rectangle de superficie (A) et de périmètre stylisé (P) équivalents. La longueur (LR) est calculée à partir de la formule suivante :

$$LR = \left[\frac{P}{4} + \sqrt{\left(\frac{P}{4}\right)^2 - A} \right]$$

P en km et A en km²

Avec ces paramètres, on détermine les indices de relief suivant :

- la pente moyenne (Pm) qui est le rapport de la dénivelée théorique (Dt) et la longueur du rectangle équivalent (LR) :

$$Pm = \frac{Dt}{LR}$$

- l'indice de pente globale (Ig) qui prend en compte la dénivelée utile (Du) et la longueur du rectangle équivalent (LR) :

$$Ig = \frac{Du}{LR}$$

- la dénivelée spécifique (Ds) qui est un indice de relief qui permet de s'affranchir de l'effet de surface A du bassin,

$$Ds = Ig \times \sqrt{A}$$

Les résultats obtenus (Cf. tableau I-4) permettent d'affiner la comparaison des bassins versants effectuée avec l'hypsométrie.

Pour les paramètres, on note une nette différence entre la dénivelée théorique et la dénivelée utile. Les valeurs de cette dernière sont inférieures de moitié aux premières. En effet, les altitudes supérieures à 95 % (à partir de 1100 m environ) ne sont pas prises en compte dans la dénivelée utile. On élimine ainsi une grande partie des reliefs de crêtes dans la partie amont du bassin qui couvrent une faible superficie. Il en est de même pour les altitudes inférieures à 5 % qui réduisent considérablement le poids des altitudes minimales qui ne sont significatives généralement que de l'entaille profonde et étroite des vallées de l'oued Grou et de ses affluents.

La longueur du rectangle équivalent, bien que théorique, est assez représentative des longueurs de bassin versant. En effet, les valeurs obtenues sont sensiblement égales à celles des plus grandes longueurs de bassin (Lh) déterminées précédemment pour le calcul de l'indice d'allongement d'Horton (Cf. tableau I-3) .

Tableau I-4 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Les indices relatifs au relief des bassins versants

Bassins versants	Ouljet Haboub	Sidi Jabeur	Ras el Fathia	Bassin total
Surface (Km ²)	1627	3067	3540	3820
P. stylisé (km)	218	313	382	416
H. max (m)	1604	1604	1604	1604
H. min (m)	540	190	95	40
H. 95 % (m)	1124	1116	1105	1098
H. 50 % (m)	851	782	748	729
H. 5 % (m)	620	427	310	220
H. moyenne (m)	865	787	737	707
LR (km)	91	133	170	188
Dt	1064	1414	1509	1564
Du	504	689	795	878
Pm	11,7	10,6	8,9	8,3
Ig	5,5	5,2	4,7	4,7
Ds	222	288	280	290

La classification établie selon l'O.R.S.T.O.M. est la suivante :

Ds (0-10 m) : relief très faible,

Ds (10-25 m) : relief faible,

Ds (25-50 m) : relief assez faible,

Ds (50-100 m) : relief modéré,

Ds (100-250 m) : relief assez fort,

Ds (250-500m) : relief fort

et Ds (sup. à 500 m) : relief très fort.

On peut donc considérer que les indices, calculés à l'aide de ces paramètres, représentent assez bien l'aspect global du relief des différents bassins.

Pour les indices de pente, P_m et I_g , on retrouve logiquement la même différence qu'entre les dénivelées théorique et utile, c'est à dire des valeurs du simple au double (de 5 à 10 en moyenne). La pente moyenne (P_m) est importante du fait de la prise en compte des altitudes extrêmes qui caractérisent les reliefs de crêtes et les fonds de vallée. Par contre, les valeurs de l'indice de pente globale (I_g), plus modérées, sont plus significatives des formes dominantes des reliefs qui constituent la majeure partie du bassin versant global (plateaux et hautes-plaines). De l'amont vers l'aval, la dénivelée utile (D_u) s'accroît régulièrement, de 500 à 900 m environ, mais cet accroissement se fait dans les mêmes proportions que celui du rectangle équivalent (LR entre 90 et 190 m km). Il en résulte des valeurs de l'indice de pente globale (I_g) à peu près identiques (de 5,5 à 4,7) pour tous les bassins versants étudiés.

La dénivelée spécifique permet de nuancer cet indice de pente globale en prenant en compte la surface du bassin versant ($D_s = I_g \times \sqrt{A}$). Les valeurs obtenues sont similaires (280 à 290) pour le bassin global et les bassins aux stations aval (Ras el Fathia et Sidi Jabeur), elles caractérisent un relief fort (R6) selon la classification de l'O.R.S.T.O.M. La valeur déterminée à la station amont (Ouljet Haboub), un peu moins élevée (222), caractérise un relief assez fort (R5) selon la même classification.

Ces indices, quoique simplificateurs, définissent assez bien l'homogénéité des bassins versants aux différentes stations hydrométriques et pour l'ensemble du bassin.

Ainsi, les caractéristiques morphométriques du bassin versant font apparaître, de l'amont vers l'aval, une double évolution :

- un allongement progressif de la forme du bassin versant (Cf. indices de forme, Tableau I-3),
- un accroissement de l'amplitude du relief (Cf. dénivelées, Tableau I-4).

L'évolution parallèle de ces paramètres détermine des rapports entre eux quasi constants qui constituent les indices de relief (pentes et dénivelées spécifiques). Il y a donc une homogénéité du relief entre les différents bassins versants, liée à la prédominance des formes élevées, entre 600 et 1000 m, qui caractérisent le Plateau Central marocain (plateaux et hautes-plaines). Le relief n'apparaît donc pas à priori comme un facteur déterminant dans une éventuelle différenciation du régime des écoulements aux différentes stations hydrométriques.

B - LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

La forme originale du bassin versant de l'oued Grou est liée au développement particulier de son réseau hydrographique dans les différents compartiments du Plateau Central marocain.

1 - L'implantation du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du Plateau Central s'est organisé dès l'époque tertiaire sur les surfaces d'aplanissement consécutives aux différentes phases de soulèvement qui ont été plus prononcées dans la partie sud du massif que dans la partie nord. Ces surfaces recoupent les différentes formations déformées du Primaire selon une direction générale vers le nord-ouest. Globalement, le réseau hydrographique du Plateau Central va conserver cette direction générale, malgré les nombreux mouvements tectoniques qui vont se manifester encore à la fin du Tertiaire et au Quaternaire.

Cependant, pour ces dernières périodes, les tendances orogéniques du Tertiaire vont s'inverser : "La partie nord du massif ancien s'exhausse et se fracture, alors que le retombée méridionale se soulève modérément et en bloc, le nord du Haut-Pays, à peine relevé depuis l'Eocène, constitue un horst de plusieurs centaines de mètres de rejet au Pléistocène" (G. Beaudet, 1969). Il semblerait que ce soulèvement différencié du Plateau Central soit à l'origine du décalage partiel vers le sud du tracé de l'oued Grou.

En effet, l'oued Grou contourne progressivement la partie méridionale du Haut-Pays, tandis qu'au nord, l'oued Bou Regreg conserve un tracé général vers le nord-ouest (Cf. Fig. I-1). Dans la partie amont du bassin (Dépression Orientale), l'oued Grou se développe en direction du sud-ouest

conformément à l'orientation générale de la tectonique hercynienne (Cf. annexe I-1). A partir de Sidi Lamine, il remonte vers le nord-ouest au contact du Haut-Pays et du Palier Intermédiaire, puis prend une direction nord à partir de la Plaine de Smala pour recouper l'anticlinorium de Khouribga-Oulmès (Palier Intermédiaire). Il retrouve une direction vers le nord-ouest dans la partie aval du bassin versant, au niveau du Palier Inférieur. L'adaptation à l'incision générale dans des surfaces d'aplanissement tertiaires a donc été partiellement perturbée par les mouvements tectoniques postérieurs qui ont fait rejouer de manière différente les ensembles morphostructuraux.

Ainsi, l'évolution tectonique de la fin de l'époque tertiaire explique en grande partie l'allure générale de la vallée de l'oued Grou. A l'amont du bassin, le déblaiement de la Dépression Orientale résulte d'une entaille précoce déclenchée par le soulèvement fini-miocène. L'existence de matériaux schisteux a favorisé l'élaboration des larges plaines d'Asfar et de Sidi Lamine (Cf. annexe I-2). Par contre, dans la partie moyenne du bassin l'entaille en gorge étroite du Palier Intermédiaire résulte de la combinaison d'une tectonique post-villafranchienne active et de la nature plus résistante du substratum (schistes gréseux, conglomératiques ou quartzitiques). Dans la partie aval du bassin, le Palier Inférieur est également caractérisé par une entaille en gorge étroite mais moins profonde du fait d'un soulèvement plus atténué. Un élargissement de la vallée apparaît toutefois dans la région de Souk el Jemâa, là où l'oued Grou entaille les argiles gréseuses et salifères du Trias en position synclinale (Cf. annexe I-2).

Cette combinaison entre l'évolution tectonique différente des compartiments géologiques et la nature lithologique du substratum a donc déterminé le tracé particulier de l'oued Grou et les formes contrastées de sa vallée. Dans les zones d'élargissement (Plaine d'Asfar, Sidi Lamine et Souk el Jemâa), les différents niveaux d'entaille du Villafranchien et du Quaternaire sont matérialisés par l'extension des glacis et des terrasses, avec des formations superficielles relativement épaisses. Par contre, dans les zones d'entaille en gorge (Paliers Intermédiaire et Inférieur), ces niveaux ont été le plus souvent démantelés, seuls subsistent localement quelques dépôts superficiels de faible épaisseur.

La forme très allongée du bassin versant de l'oued Grou, avant la confluence avec l'oued Korifla, est déterminée par l'absence d'un réseau

affluent d'envergure. Il existe une multitude d'affluents, de faible longueur, raccordés directement au cours d'eau principal. Celui-ci, du fait de son entaille récente et profonde, a déterminé sur les versants abrupts des incisions latérales courtes, séparées de quelques kilomètres seulement. Une dissymétrie apparaît toutefois entre les affluents des deux rives de l'oued Grou. En rive droite, ils sont peu hiérarchisés. Il n'entament que faiblement la retombée méridionale du Haut-Pays qui est largement exploité au nord par le réseau de l'oued Bou Regreg, plus développé et plus hiérarchisé. En rive gauche, les affluents sont plus longs, 10 à 20 kilomètres, avec un réseau plus hiérarchisé. Sur cette rive, les affluents ont bénéficié de conditions plus propices à leur développement. L'érosion progressive de la couverture sédimentaire du Secondaire et du Tertiaire a libéré un substratum sous-jacent à la lithologie plus contrastée. Les affleurements schisteux et argileux plus tendres ont permis un développement plus important de certains réseaux hydrographiques affluents : l'oued Sidi Lamine dans les schistes du Viséen (Plaine de Sidi Lamine), l'oued Mezguida dans les argiles gréseuses du Permien (Dépression de Chougrane), l'oued Dalia dans les schistes d'Asfar (Plaine de Smala), l'oued Felouat dans les schistes conglomératiques de la surface miocène (Plateau d'Ezzhiliga) et l'oued Mouilha dans les argiles du Trias (synclinal du Palier Inférieur).

Ainsi, l'implantation du réseau hydrographique de l'oued Grou dépend étroitement de l'évolution tectonique récente et de la lithologie plus au moins contrastée du substratum primaire. L'existence de ce réseau reste cependant tributaire de la concurrence des réseaux voisins qui ont été plus actifs : au nord, celui de l'oued Bou Regreg, au sud, celui de l'oued Oum er Rabia et à l'ouest, celui de son affluent, l'oued Korifla.

2 - Les profils en long

Les profils en long du cours d'eau de l'oued Grou et du thalweg de sa vallée (Cf. annexe I-7) permettent d'apporter des éléments d'explication pour l'analyse hydrologique et notamment, pour les vitesses d'écoulement et le temps de transfert des masses d'eau.

Ces profils ont été réalisés à partir des cartes à l'échelle du 1/100.000^{ème}. Des tronçons ont été déterminés, de l'amont vers l'aval (1 à 15), en fonction des variations de la pente du cours de l'oued Grou. Pour ces mêmes tronçons, les pentes ont été calculées sur le profil du thalweg. Pour chaque tronçon, la comparaison de la longueur du cours d'eau (Lc, en km) et

celle du thalweg (L_t , en km) permet de définir un coefficient de sinuosité (C_s , en %) :

$$C_s = \left[\frac{(L_c - L_t)}{L_t} \right] \times 100$$

A partir de ces différentes données (Tableau I-5), on peut analyser les profils en long en les replaçant dans leur contexte morphostructural. En effet, les tronçons peuvent être regroupés en trois grands secteurs qui correspondent aux ensembles morphostructuraux définis précédemment.

Le secteur A

Il représente la vallée supérieure de l'oued Grou, dans la Dépression Orientale.

A l'extrémité amont, les tronçons 1 et 2 matérialisent l'entaille de l'oued Aît Azzouz dans les schistes grésos-quartzitiques des crêtes d'Aguelmous. La pente des profils est forte (supérieur à 3 %) et le coefficient de sinuosité est faible (8 %). La vallée étroite est dominée par des versants au dénivelé important, pouvant atteindre 500 m.

Ensuite la vallée s'élargit progressivement au contact des schistes d'Asfar (tronçon 3) pour former une large plaine de remblaiement (tronçon 4). Les dépôts quaternaires sont représentés par un étagement de longs glacis et de larges terrasses alluviales. La pente des profils diminue rapidement pour atteindre 0.5 % et le coefficient de sinuosité augmente de manière corrélative (15 %).

Le tronçon 5 est marqué par un fort rétrécissement de la vallée correspondant à l'entaille des crêtes grésos-quartzitiques de Kehf en Sour. La pente des profils reste moyenne (0.5 %), mais le coefficient de sinuosité continue de s'accroître (19 %).

A la sortie de cette vallée étroite (tronçon 6), l'entaille des schistes du Viséen permet le développement d'une nouvelle plaine, la plaine de Sidi Lamine où on retrouve une large extension des dépôts quaternaires sous forme de glacis et de terrasses. La pente des profils diminue (0.4 %) ainsi que le coefficient de sinuosité (12 %).

Tableau I-5 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU :

Pente et sinuosité de l'oued Grou

Secteur	Tronçon	Longueur du cours d'eau (km)	Longueur du thalweg (km)	Pente du chenal (%)	Pente du thalweg (%)	Coefficient de sinuosité (%)
A	1	2.7	2.5	7.5	8.1	8
A	2	3.9	3.6	3.1	3.36	8.3
A	3	9.4	8.2	0.95	1.1	14.6
A	4	16.3	14.1	0.55	0.64	15.6
A	5	5.6	4.7	0.49	0.58	19.1
A	6	15.5	13.8	0.38	0.43	12.3
B	7	12.5	10.9	0.42	0.48	14.7
B	8	28.6	22.6	0.35	0.44	26.5
B	9	13.9	11.3	0.31	0.38	23
B	10	17.3	14.4	0.39	0.47	20.1
B	11	21.2	17.3	0.52	0.64	22.5
C	12	19.9	17.1	0.33	0.38	16.4
C	13	7.4	6.1	0.21	0.25	21.3
C	14	14.8	12.4	0.27	0.32	19.4
C	15	12.5	10.2	0.19	0.23	22.5

Secteur (A) : le cours supérieur de l'oued Grou dans la Dépression Orientale

Secteur (B) : le cours moyen de l'oued Grou dans le Palier Intermédiaire

Secteur (C) : le cours inférieur de l'oued Grou dans le Palier Inférieur

Ainsi le secteur A est caractérisé par les deux larges plaines d'altitude, d'Asfar et de Sidi Lamine, séparées par une courte vallée étroite

dans les crêtes de Kehf en Sour. La diminution progressive de la pente n'induit pas nécessairement une augmentation du coefficient de sinuosité. Il est plus important dans la plaine d'Asfar que dans celle de Sidi Lamine, alors que la pente des profils y est plus élevée.

Le secteur B

Il correspond à l'entaille étroite de l'oued Grou dans le Palier Intermédiaire, au contact du Haut-Pays.

La première moitié de ce secteur (tronçons 7, 8 et 9) est caractérisée par une vallée très étroite avec des versants très raides à la dénivelée importante (400 à 500 m). La pente des profils diminue progressivement de 0.4 % à 0.3 %, alors que le coefficient de sinuosité devient très important, supérieur à 20 % sur les tronçons 8 et 9. Ainsi, malgré un fond alluvial rétréci, l'oued Grou développe dans cette zone de nombreux méandres qui prennent souvent la forme de boucles. Cette forte sinuosité de l'oued correspond à une sinuosité déjà très prononcée de la vallée elle-même qui s'est développée dans un substratum à la lithologie contrastée (schistes gréseux à passées conglomératiques ou calcaires du Carbonifère).

La deuxième partie de ce secteur (tronçons 10 et 11) est représentative de l'entaille de l'oued Grou dans les quartzites schisteuses ou gréseuses et les schistes argileux et conglomératiques de l'anticlinorium très faillé de Khouribga-Oulmès. Dans cette zone, la pente des profils s'accroît de nouveau (0.4 à 0.5 %) avec des ruptures de pente bien marquées au droit des bancs résistants et des zones de fractures. Le coefficient de sinuosité de l'oued reste élevé (supérieur à 20 %) et correspond à un léger élargissement du fond alluvial de la vallée.

Le secteur B représente donc la vallée moyenne de l'oued Grou qui est étroite, profonde et très sinueuse. Le tracé de l'oued y est encore plus sinueux malgré la faible extension du fond alluvial.

Le secteur C

Ce dernier secteur s'inscrit dans le Palier Inférieur, de la sortie de l'anticlinorium Khouribga-Oulmès à la confluence des oueds Grou et Korifla.

Les deux tronçons amont (12 et 13) correspondent au synclinal triasique de Souk el Jemâa. L'entaille de l'oued Grou dans les argiles

gréseuses et salifères a permis le développement d'une vallée très large avec des versants d'une dénivelée de l'ordre de 200 m. La pente des profils diminue progressivement (0.3 à 0.2 %) mais le coefficient de sinuosité ne s'accroît pas, il est même légèrement inférieur à ceux des tronçons du secteur B précédent qui est caractérisé par une vallée étroite.

Les deux derniers tronçons (14 et 15) matérialisent de nouveau une vallée étroite qui s'est formé dans les schistes gréseux du Carbonifère inférieur (Tournaisien). Les versants raides, de 200 à 300 m de dénivelée, sont entaillés par de petits affluents. La pente des profils s'accroît légèrement lorsque les schistes sont armés par une série de bancs gréseux (0.27 % dans le tronçon 14) mais elle diminue rapidement lorsque les schistes sont sableux (0.19 % dans le tronçon 15) et le coefficient de sinuosité est plus élevé dans le second tronçon (22 %) que dans le premier (19 %).

Ce secteur caractérisé par une diminution globale de la pente des profils en long, présente ainsi deux parties bien différenciées, l'une dans la cuvette argileuse triasique et l'autre dans le bas plateau schisto-gréseux du Tournaisien.

Ainsi, sur un parcours de 200 km environ, l'oued Grou offre une variation de la pente des profils en long qui est en étroite relation avec la résistance différenciée du substratum lithologique. Il en est de même pour l'élargissement du fond de la vallée qui se fait dans le substratum essentiellement schisteux alors que le rétrécissement apparaît dans les séries gréso-quartzitiques qui présentent des bancs fortement redressés et plus au moins fracturés. Par contre, il n'y a pas de corrélation directe entre le coefficient de sinuosité, la pente des profils en long et l'ampleur de la vallée. Il y a au contraire une tendance à l'accroissement de ce coefficient lorsque la vallée devient plus étroite et que la pente des profils en long augmente. L'accentuation de la sinuosité de l'oued correspond aux tronçons les plus sinueux de la vallée, et plus particulièrement dans le Palier Intermédiaire (secteur B). Il y a donc une amplification de la sinuosité de l'oued Grou dans les zones où les contrastes lithologiques sont bien marqués (alternance de strates schisteuses et de quartzites ou bancs gréseux). La lithologie et la tectonique sont donc les facteurs déterminants dans l'explication des différentes caractéristiques morphométriques de l'oued Grou et de sa vallée.

3 - La hiérarchisation du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est très dense (Cf. annexe I-8) mais il est essentiellement intermittent ; seul l'oued Grou est pérenne tout au long de son cours. Quelques affluents ont également un écoulement pérenne, l'oued Sidi Lamine dans la Dépression Orientale, les oueds El Hejar, Sidi bou Lanouar, Felouat dans le Palier Intermédiaire et l'oued Mouilha dans le Palier Inférieur. De manière générale, les affluents de rive droite ont un réseau moins développé que ceux de rive gauche.

a - Méthodes utilisées

Le réseau a été établi à partir des cartes topographiques au 1/100.000^{ème} qui ne reflètent pas la réalité du chevelu hydrographique. En effet, sur les cartes au 1/50.000^{ème} le chevelu est plus dense, mais les tests effectués pour certains sous bassins montrent que la sous-estimation est du même ordre de grandeur dans tout le bassin versant. On peut donc considérer que les valeurs déterminées à partir du réseau des cartes au 1/100.000^{ème} permettent de comparer les différents bassins.

La hiérarchisation du réseau hydrographique nécessite une classification ordonnée des rivières, la détermination du nombre de rivières par ordre et la mesure des longueurs correspondantes.

La classification utilisée est celle de S.A. SCHUMM (1956) qui attribue l'ordre 1 au drain élémentaire sans affluent. La confluence de deux drains d'ordre 1 donne un drain d'ordre 2. Le drain d'ordre 3 se forme à la confluence de deux drains d'ordre 2, et ainsi de suite. Un drain d'ordre X est donc obtenu à la confluence de deux drains d'ordre X-1.

Après avoir défini l'ordre de tous les drains du réseau hydrographique, on applique les lois de R.E. HORTON (1945):

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

- les longueurs moyennes des rivières de chaque ordre (l_x), dans un bassin déterminé, forment une série géométrique directe dont le premier terme est la longueur moyenne des rivières élémentaires du bassin, la raison est le rapport de la longueur moyenne des rivières de l'ordre immédiatement inférieur ($X-1$).

Pour appliquer ces lois, on porte sur un papier semi-logarithmique les valeurs obtenues (Cf. annexe I-9) en prenant l'échelle arithmétique pour l'ordre X et l'échelle logarithmique pour le nombre de rivières (N_x) et la longueur moyenne des rivières (l_x) par ordre. Quand la hiérarchisation est bien réalisée, pour chaque série de données, les points s'alignent correctement suivant une droite. Les valeurs obtenues sont reportées dans les tableaux suivants.

Tableau : I-6 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Réseau hydrographique global (pérenne et intermittent), nombre, longueur et fréquences des rivières par ordre

I-6 a Bassin versant Ouljet Haboub (1627 km²)

Ordre	Nombre (N_x)	Longueur totale (L_x)	Longueur moyenne (l_x)	$F = N(x)/A$
1	2482	2432	0.98	1.53
2	807	1695	2.10	0.50
3	205	862	4.20	0.13
4	77	414	5.38	0.047
5	17	217	12.76	0.010
6	4	121	30.25	0.0025
7	1	66	66	0.0006
Total	3593	5807	1.62	2.21

I-6 b Bassin versant Sidi Jabeur (3067 km²)

Ordre	Nombre (N_x)	Longueur totale (L_x)	Longueur moyenne (l_x)	$F = N(x)/A$
1	5089	5446	1.07	1.66
2	1877	3744	1.99	0.61
3	616	1985	3.22	0.20
4	174	986	5.67	0.057
5	44	570	12.95	0.014
6	13	308	23.69	0.0042
7	4	165	51.25	0.0013
8	1	52	52	0.0003
Total	7644	13256	1.73	2.49

I-6 c Bassin versant Ras el Fathia (3540 km²)

Ordre	Nombre (Nx)	Longueur totale (Lx)	Longueur moyenne (l x)	F = N (x)/A
1	5821	6106	1.05	1.64
2	2140	4206	1.97	0.60
3	698	2258	3.23	0.20
4	196	1100	5.61	0.055
5	53	638	12.05	0.015
6	16	356	22.25	0.0045
7	5	196	39.14	0.0014
8	1	76	76	0.0003
Total	8930	14936	1.67	2.52

I-6 d Bassin versant global (3820 km²)

Ordre	Nombre (Nx)	Longueur totale (Lx)	Longueur moyenne (l x)	F = N (x)/A
1	5968	6481	1.09	1.56
2	2273	4323	1.90	0.59
3	736	2371	3.22	0.19
4	211	1160	5.50	0.055
5	53	657	12.41	0.014
6	16	356	22.25	0.0042
7	5	196	39.14	0.0013
8	1	103	103	0.0003
Total	9263	15647	1.69	2.42

A partir de ces données, ont été calculées pour les bassins versants délimitées aux stations hydrométriques (Cf. tableau I-7) :

- la densité de drainage (Dd) qui correspond au rapport de la longueur totale des rivières (ΣLx) et de la surface du bassin (A) :

$$Dd = \frac{\Sigma Lx}{A}$$

- le coefficient de torrentialité (Ct) qui est le produit de la densité de drainage (Dd) par la fréquence du nombre de rivières du premier ordre (N₁) par unité de surface du bassin (A) :

$$Ct = \left[Dd \times \frac{N_1}{A} \right]$$

Les densités de drainage ont été effectuées pour le réseau pérenne et pour le réseau maximal (pérenne et intermittent). Les coefficients de torrentialité n'ont été calculés logiquement que pour le réseau maximal.

b - Commentaire des résultats

Le réseau hydrographique maximal est assez bien hiérarchisé quelque soit le bassin versant étudié. En effet, les lois d'Horton (Cf. annexe I-9) s'appliquent correctement aussi bien pour le nombre de rivières que pour la longueur moyenne des rivières par ordre. Ceci montre une certaine homogénéité de l'entaille du réseau hydrographique qui est liée à une genèse assez longue (depuis l'époque tertiaire) dans des milieux morphostructuraux insuffisamment contrastés du point de vue lithologique.

Le réseau maximal se hiérarchise très rapidement dans les hautes plaines de la Dépression Orientale, l'ordre 7 est déjà réalisé. A la sortie de celle-ci, après la confluence avec l'oued Sidi Lamine l'oued Grou garde le même ordre. L'ordre 8 est atteint à l'oued Dalia qui draine la plaine de Smala en rive gauche (juste avant sa confluence avec l'oued Grou). Ensuite, l'oued Grou garde le même ordre jusqu'à l'aval du bassin (à sa confluence avec l'oued Korifla). Ceci montre bien l'insuffisance du développement des réseaux hydrographiques affluents. Ils sont toutefois mieux développés en rive gauche où ils atteignent souvent l'ordre 6 ou 7, alors qu'en rive droite, ils atteignent rarement l'ordre 6, ce qui confirme la dissymétrie que nous avons analysée précédemment. La forme allongée du bassin versant résulte également du développement insuffisant de ces réseaux affluents.

Globalement, la longueur totale du réseau maximal s'accroît de manière corrélative avec le nombre de drains. Mais cet accroissement est surtout lié à l'importance du nombre de drains élémentaires (ordres 1 et 2). Pour une cartographie au 100.000^{ème}, la fréquence moyenne du nombre total de drains est élevée ($F = 2.5 / \text{km}^2$) et par conséquent la longueur moyenne de ces drains est assez faible ($l_x = 1.7 \text{ km}$). Ces valeurs ne varient guère pour les différents bassins versants aux stations hydrométriques. Elles sont un peu plus faibles pour le bassin versant à Ouljet Haboub ($F = 2.2 / \text{km}^2$ et $l_x = 1.6 \text{ km}$) du fait d'un réseau légèrement moins développé à l'amont, dans les hautes plaines de la Dépression Orientale. L'homogénéité et la forte densité de ce réseau maximal induit nécessairement une grande aptitude au ruissellement sur l'ensemble du bassin.

Cette analyse est confirmée par les valeurs de la densité de drainage et du coefficient de torrentialité qui sont reportées dans le tableau suivant.

Tableau I-7 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU :Densité de drainage et coefficient de torrentialité par bassin

Bassins versants	Surface (A) en km ²	Dd (km / km ²) Réseau pérenne	Dd (km / km ²) Réseau maximal	$Ct = \left[Dd \times \frac{N_1}{A} \right]$
Ouljet Haboub	1627	0.08	3,57	5.46
Sidi Jabeur	3067	0,07	4,32	7.17
Ras el Fathia	3540	0,08	4.22	6.92
Bassin total	3820	0,08	4,10	6.39

Le bassin versant de l'oued Grou présente un très fort contraste entre la longueur du réseau pérenne (306 km, dont 200 km environ pour le drain principal) et celle du réseau maximal (plus de 15 000 km). L'écart des valeurs de la densité de drainage entre ces deux réseaux est de ce fait très important, il est en moyenne de 1 à 50, ce qui montre bien l'extrême faiblesse des réserves en eaux souterraines et l'importante aptitude du bassin au ruissellement. Les valeurs du coefficient de torrentialité sont également importantes (6 à 7), elles caractérisent un milieu où l'érosion par ruissellement est très active et quasi générale.

Seul le bassin versant amont (Ouljet Haboub) a des valeurs un peu plus faible qui sont liées à la présence des hautes plaines de la Dépression Orientale. Celles-ci offrent des reliefs un peu moins vigoureux, matérialisés par des glacis et des terrasses. A l'aval de la confluence des oueds Grou et Sidi Lamine, l'entaille en gorge de l'oued Grou a conditionné les nombreuses entailles des affluents donnant des vallées étroites aux versants raides.

Ainsi, la forte densité du réseau hydrographique, essentiellement intermittent, aura pour conséquence une concentration rapide des écoulements de surface en période pluvieuse.

Les caractéristiques morphométriques du réseau hydrographique sont donc bien représentatives du contexte morphostructurale du bassin de l'oued Grou qui a déterminé l'implantation particulière de ce réseau. L'entaille profonde de l'oued Grou, amorcée lors du soulèvement du Plateau Central marocain au Tertiaire, s'est répercutée sur tous les affluents qui ont développé

un réseau court mais dense dans un substratum essentiellement imperméable. Cette forte densité et les pentes relativement élevées des profils en long des cours d'eau favorisent nécessairement la concentration et le transfert rapide des eaux de ruissellement comme nous le verrons par la suite dans l'analyse hydrologique.

III - LES SOLS ET LA VEGETATION

Parmi les facteurs naturels, les sols et la végétation jouent conjointement un rôle déterminant pour le bilan infiltration-ruissellement. Un couvert végétal dense et un sol profond et poreux favorise l'infiltration superficielle des eaux pluviales qui peuvent alimenter des nappes si le substratum est perméable. A l'inverse, un sol d'érosion, avec une végétation clairsemée, est plus sensible à l'intensité des précipitations et le ruissellement est alors quasi instantané, même si le substratum est perméable. Dans le cas du bassin versant de l'oued Grou, le bilan est nettement plus favorable au ruissellement.

A - LES SOLS

Dans le bassin versant de l'oued Grou, la pédogenèse est généralement faible du fait des conditions physiques qui favorisent essentiellement les processus de la morphogenèse.

La nature essentiellement imperméable du substratum, le relief souvent à forte pente et l'intensité des précipitations induisent une prédominance du ruissellement qui entravent les processus pédogénétiques. Celui-ci entraîne les matériaux fins et la matière organique qui sont rapidement évacués par les écoulements du réseau hydrographique (forte teneur des éléments en suspension). Les matériaux grossiers peuvent être également érodés lors des violentes averses, créant des écoulements concentrés qui incisent les formations superficielles et le substratum lui-même. Ainsi, là où domine le ruissellement les sols sont peu ou non évolués.

Les sols évolués subsistent sur les formes planes de certains reliefs (plaines, dépressions et plateaux) mais ils sont généralement de faible épaisseur. Ce sont des sols hérités, rouges ou bruns méditerranéens, où la pédogenèse peut être encore active dans la mesure où le couvert végétal est assez dense.

1 - Les sols peu ou non évolués

Ce sont des sols sur matériaux récents ou sur roches affleurantes, dont l'évolution est empêchée par les phénomènes d'érosion ou d'apport qui dépendent des formes de relief. Il convient d'opposer les sols d'érosion, résultant du décapage des versants à forte pente, aux sols d'apport, caractérisés par des dépôts de matériau récent. Ceux-ci sont des sols alluviaux dans le lit majeur des oueds et des sols colluviaux dans la partie aval des versants.

Les sols d'érosion

Ces sols sont très superficiels et très pauvres en matière organique. Un horizon peu épais peut exister localement sur des replats mais il est totalement absent sur les pentes fortes. On a essentiellement un horizon C, meuble et caillouteux, constitué de débris de roche mère. Parmi les sols d'érosion, on distingue les lithosols qui sont façonnés sur des roches dures et les régosols développés sur des roches tendres.

Ces sols sont localisés sur des affleurements rocheux ou bien sur des dépôts de versants peu épais constitués d'éléments grossiers sous forme de plaquettes de schistes et de cailloux de quartzite inégalement émoussés, enrobés dans une matrice sableuse plus ou moins argileuse. Une circulation d'eau à faible profondeur peut s'y développer mais il s'agit plus d'un transit rapide que d'une rétention. Le plus souvent, ces sols sont soumis au ruissellement lors des averses de forte intensité.

Les sols d'apport

Les sols colluviaux sont situés uniquement sur les bas de pente. Ils sont tantôt constitués d'un mélange de pierres, de graviers et d'éléments fins (colluvion grossière) tantôt formés seulement d'éléments fins (colluvion fine). L'eau circule dans les pores grossiers et moyens, le plus souvent verticalement et parfois obliquement si la pente est suffisante. La perméabilité de ces sols diminue rapidement en profondeur.

Les sols alluviaux sur alluvions récentes, caractérisent les lits majeurs des oueds, où ils sont souvent rajeunis par de nouveaux dépôts de matériaux en période d'inondation. Ils ont une nappe phréatique plus ou moins profonde qui subit des oscillations marquées suivant les saisons. Les sols alluviaux sur les alluvions anciennes des terrasses sont par contre dépourvus de nappes.

2 - Les sols évolués

Ce sont des sols qui caractérisent une certaine stabilité morphologique du milieu. Ils sont conservés sur les reliefs plats ou à faible pente et leur développement est en grande partie hérité de périodes climatiques plus humides, avec toutefois une évolution parfois encore active.

Les sols bruns

Les sols bruns forestiers sont les plus épais, souvent supérieurs à 50 cm, avec un profil bien différencié qui détermine une percolation de l'eau assez importante. Ces sols se développent dans les milieux les plus humides, en altitude, sous couvert forestier et sur substratum plus ou moins perméable (schistes gréseux). Les sols bruns méditerranéens par contre, s'élaborent sur des roches plus imperméables et dans des milieux moins humides (matorral). Le profil est peu différencié, la percolation de l'eau étant nettement réduite du fait d'un matériau plus argileux et l'épaisseur du sol atteint rarement 50 cm. Les sols bruns calcaires sont peu développés dans l'ensemble du bassin de l'oued Grou du fait des faibles teneurs en carbonates des roches primaires.

Les sols rouges

Ils sont également peu présents dans le bassin. Ils correspondent à une roche-mère plus perméable, soit des argiles gréseuses et caillouteuses (débris conglomératiques), soit des sables plus ou moins argileux et gréseux. Ces sols peuvent être profonds et donner lieu à l'existence d'une nappe superficielle temporaire.

Les sols hydromorphes

Elaborés dans des formations essentiellement argileuses (schistes argileux, argiles sableuses), ces sols se caractérisent par une saturation périodique de l'ensemble du profil (argiles gonflantes). Cette saturation hivernale est relayée par une sécheresse estivale qui provoque un durcissement des argiles qui s'accompagne d'importantes fentes de retrait. Ces sols, et en particulier les tirs (vertisols), sont propices au développement rapide du ruissellement, même sur de faibles pentes, lorsqu'ils sont saturés.

3 - La répartition des sols

Dans le bassin versant de l'oued Grou, la répartition des sols est

Tableau I-8 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU :Répartition des sols

Type de sol	Substratum	Localisation
<u>A - SOLS PEU OU NON EVOLUES</u>		
A1 - Lithosols et régosols	- Schistes gréséo-quartzitiques (Cambrien supérieur) - quartzites schisteuses et gréseuses (Ordovicien supérieur)	- crêtes appalachiennes du Haut-Pays (anticlinal Sidi bou Abbad Aguelmous) - versants de la moitié aval du Palier Intermédiaire : anticlinorium Khouribga-Oulmès
A2 - Régosols sur schistes érodés	- schistes d'Asfar (Ordovicien moyen et inférieur) - schistes conglomératiques (Viséen supérieur)	- plaines d'Asfar dans la Dépression Orientale et de Smala sur le Palier Intermédiaire - Plaine de Sidi Lamine dans La Dépression Orientale
A3 - Association : régosols avec sols peu évolués ou sols tirsifiés	- argiles gréseuses et salifères (Trias)	- versants des vallées des oueds Mouilha et Grou sur le Palier Inférieur (Dépression triasique)
A4 - Association : régosols avec sols résiduels rouges et bruns	- schistes gréseux (Namurien) et conglomératiques (Westphalien) - schistes gréseux (Viséen moyen et inférieur)	- versants et replats de la moitié aval du Palier Intermédiaire - versants de la vallée de l'oued Grou dans le Palier Inférieur
A5 - Sols peu évolués sur apports alluviaux	- alluvions grossières du Quaternaire récent recouvertes de limons de débordement	- plaine aval de l'oued Sidi Lamine (Dépression Orientale) et fonds de vallées
<u>B - SOLS BRUNS</u>		
B1 - Sols bruns forestiers	- schistes conglomératiques et doléritiques (Cambrien moyen et inférieur)	- dépression perchée de Bled el Gada entre les crêtes appalachiennes du Haut-Pays
B2 - Sols bruns méditerranéens peu épais	- schistes conglomératiques et calcaires (Viséen supérieur) - schistes gréseux (Namurien)	- piedmont de la Dépression Orientale et croupes de Rouached (Palier Intermédiaire) - croupes de Koudiat el Louz du Palier Intermédiaire
B3 - Association : des sols bruns calcaires, bruns steppiques, lithosols et quelques sols rouges	- calcaires (Turonien)	- Plateau des Phosphates sur la bordure sud du Palier Intermédiaire
<u>C - SOLS ROUGES</u>		
C1 - sols rouges caillouteux	- argiles gréseuses et conglomératiques (Permien)	- hautes plaines argilo- caillouteuse de Chougrane (Palier Intermédiaire)
C2 - Association : sols rouges et tirs sur matériau rouges	- sables marneux et gréseux (Miocène et Pliocène)	- plateaux du Palier Inférieur (Dépression triasique)
<u>D - SOLS HYDROMORPHES</u>		
D1 - Sols bruns hydromorphes	- schistes argileux (Silurien)	- extrémité amont de la Dépression Orientale, au pied d'Askar Tendra
D2 - Sols hydromorphes à concrétions ferrugineuses	- schistes à passées gréseuses (Viséen moyen et inférieur)	- plateau de l'extrémité aval du bassin (Palier Inférieur)

étroitement liée aux conditions morphostructurales qui déterminent le bilan morphogénèse-pédogénèse (Cf. annexe I-10 et Tableau I-8).

D'une manière générale, le soulèvement plus prononcé du substratum du Primaire inférieur sous forme de grands anticlinaux fracturés (anticlinal de Sidi bou Abbad- Aguelmous et anticlinorium de Khouribga-Oulmès) a mis en affleurement des schistes indurés par des quartzites, des grès quartzitiques et des conglomérats compacts. Ces roches imperméables, portées en altitude, ont été soumises à l'érosion différentielle qui a déterminé un relief où prédominent les crêtes appalachiennes. L'érosion par ruissellement est constamment active et la pédogenèse est faible. Il en résulte des sols minéraux bruts, lithosols et régosols, caractéristiques du Haut-Pays et de la partie aval du Palier Intermédiaire.

On trouve également des régosols sur l'ensemble des versants des vallées profondes, avec quelques sols résiduels rouges ou bruns qui subsistent en sommet de versant, sur des replats structuraux colluvionnés ou sur des lambeaux de terrasses anciennes. Ces sols sont surtout présents sur les schistes gréseux peu consolidés du Primaire supérieur (Paliers Intermédiaire et Inférieur).

Les sols minéraux bruts sont également représentés par des apports colluviaux ou alluviaux mais ils couvrent généralement de faibles superficies, le transit des matériaux se faisant rapidement. Ce n'est que dans la Dépression Orientale que certains sédiments sont piégés sous forme de cônes d'épandage, dans les hautes plaines d'Asfar et de Sidi Lamine.

Les sols évolués, bruns et rouges méditerranéens, ne sont conservés que dans les zones où le relief est moins accentué et sur un substratum moins compact et plus perméable. Ils se situent dans les structures synclinales de la Dépression Orientale et du Palier Intermédiaire où affleurent des roches du Primaire supérieur (schistes gréseux, conglomératiques et calcaires moins consolidés). On les trouve également sur la couverture mio-pliocène du Palier Inférieur où les sédiments sont constitués d'argiles et de marnes plus ou moins sableuses ou gréseuses.

Les sols hydromorphes sont représentés essentiellement à l'extrémité aval du bassin sur les schistes argileux du Silurien.

La répartition des groupements de sols par bassin est présentée dans

le tableau suivant :

Tableau I-9 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU :

Répartition des sols par bassin

Bassin versant	Sols d'apport	Sols d'érosion	Sols évolués
Ouljet Haboub	5.5 %	47 %	47.5 %
Sidi Jabeur	2.9 %	48.3 %	48.8 %
Ras el Fathia	2.5 %	50.1 %	47.4 %
Bassin total	2.3 %	51.4 %	46.3 %

Cette répartition est quasi identique pour tous les bassins. Les sols d'apport, localisés essentiellement dans la Dépression Orientale, déterminent un pourcentage un peu plus élevé pour le bassin amont. Les sols d'érosion s'accroissent de l'amont vers l'aval, mais en faible pourcentage.

Globalement, l'ensemble de ces sols ne favorisent guère la rétention d'eau sous forme de nappe superficielle. Les sols d'érosion, les plus représentés, sont essentiellement soumis au ruissellement. Les sols d'apport, peu étendus, peuvent contenir de petites nappes temporaires. Les sols évolués sont généralement peu épais et retiennent momentanément une certaine quantité des eaux infiltrées qui est assez rapidement soustraite par l'évapotranspiration mais le ruissellement se développe dès que ces sols sont situés sur des reliefs en pente, même faible.

Ainsi, la faible capacité de rétention de ces sols, associée à un substratum essentiellement imperméable, ne permet pas de tempérer un régime hydrologique dépendant essentiellement de la concentration rapide des eaux de ruissellement.

B - LE COUVERT VEGETAL

Du point de vue hydrologique, le couvert végétal intervient à deux niveaux, d'une part dans le bilan infiltration-ruissellement et d'autre part dans le bilan infiltration-évapotranspiration. C'est donc la combinaison du type de végétation et de sa densité qu'il est nécessaire d'étudier pour apprécier les possibilités d'alimentation des écoulements des oueds. Globalement, sur un milieu physique déterminé, un couvert végétal dense favorise l'infiltration

consommée par l'évapotranspiration. Par contre, pour un couvert végétal clairsemé, du type steppique, le ruissellement devient prédominant si les autres paramètres physiques du milieu sont également favorables (imperméabilité du sol et du substratum, forte pente du relief, ...).

D'après G. Beaudet (1969), on peut définir quatre types de formations végétales : la forêt, le matorral, la steppe, les cultures et pâturages (Cf. annexes I-11 et tableau I-10) qui sont déterminés par les conditions physiques des différents milieux et par l'intensité des actions anthropiques.

1 - La forêt

Sur le Plateau Central marocain, il subsiste encore des massifs forestiers importants mais dans le bassin versant de l'oued Grou ceux-ci ne couvrent que 9 % de la surface totale du bassin. La forêt occupe essentiellement les crêtes et parfois les versants des vallées très encaissées où elle est dégradée. Le défrichement explique certainement l'absence de la forêt sur les surfaces planes plus propices à l'exploitation agricole et pastorale.

L'étagement des différents types de forêt apparaît encore assez bien dans les zones où les dénivellations du relief sont importantes. La densité du couvert végétal est cependant très variable selon la nature des formes de relief, leur exposition ou l'impact anthropique. Cette densité est appréciée par le "degré de recouvrement des strates" (DRS), employé par les phytosociologues, qui est le rapport de la surface de la frondaison projetée verticalement au sol et la surface totale étudiée. Il peut être exprimé en pourcentage.

La forêt dense de chênes-liège (DRS : 80 à 90 %) est bien conservée sur les crêtes appalachiennes du Haut-Pays qui entourent la dépression de Bled el Gada. Elle s'étale entre 1200 et 1600 m d'altitude, dans un étage suffisamment humide qui favorise le développement d'un sous-bois de cytises et de cistes. De ce fait, malgré de fortes pentes, le ruissellement est entravé mais l'infiltration reste subsuperficielle en raison du substratum imperméable (schistes grésio-quartzitiques et conglomératiques). Le chênes-liège apparaît également dans la partie aval du bassin, sur les plateaux du Palier Inférieur, de part et d'autre de la vallée de l'oued Grou, à des altitudes comprises entre 300 et 500 m. Ces lambeaux de forêt témoignent de l'extension de la célèbre

Tableau I-10 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU:Répartition du couvert végétal par bassin versant

Bassin	Ouljet Haboub 1627 km²	Sidi Jabeur (3067 km²)	Ras el Fathia (3540 km²)	Bassin total (3820 km²)
<u>Forêts</u>				
Forêt dense à chêne-liège dominant	87 km ² (5.3 %)	87 km ² (2.8 %)	113 km ² (3.2 %)	140 km ² (3.7 %)
Forêt dense à chêne vert dominant	36 km ² (2.2 %)	80 km ² (2.6 %)	80 km ² (2.3 %)	80 km ² (2.1 %)
Forêt clair de chêne vert	90 km ² (5.5 %)	120 km ² (3.9 %)	120 km ² (3.4 %)	120 km ² (3.1 %)
<u>Matorrals</u>				
Matorral dense (oléastre, lentisque, tizra)	42 km ² (2.6 %)	42 km ² (1.4 %)	42 km ² (1.2 %)	42 km ² (1.1 %)
Matorral clair (oléastre, tizra, jujubier)	220 km ² (13.5 %)	527 km ² (17.2 %)	527 km ² (14.9 %)	527 km ² (13.8 %)
Formation inégalement dégradée des vallées (chêne, thuya, oléastre, lentisque, tizra, doum)	187 km ² (11.5 %)	570 km ² (18.6 %)	652 km ² (18.4 %)	748 km ² (19.6 %)
<u>Steppes</u>				
Piquetage à thuya et genévrier oxycèdre dominant	376 km ² (23.1 %)	376 km ² (12.2 %)	376 km ² (10.6 %)	376 km ² (9.8 %)
Piquetage à jujubier et betoum	254 km ² (15.6 %)	254 km ² (8.3 %)	272 km ² (7.7 %)	272 km ² (7.1 %)
<u>Cultures-pâturages</u>				
Cultures saisonnières et pâturage	335 km ² (20.6 %)	1011 km ² (33 %)	1357 km ² (38.3 %)	1514 km ² (39.6 %)

Forêt de la Mamora qui est très bien conservée au nord-ouest du Plateau Central. L'existence du chêne-liège n'est pas liée, ici, à des conditions humides d'altitude mais surtout à la perméabilité du substratum. Les plateaux à schistes gréseux sont plus ou moins recouverts par des sables argileux du Mio-Pliocène qui favorisent, sur les surfaces planes, une infiltration partielle et une rétention suffisante des eaux sous-forme de nappes en partie pérenne. C'est donc cette ressource en eaux souterraines, régulièrement alimentée par l'humidité des flux océaniques, qui explique la conservation de la forêt de chênes-liège. Cependant, sur les versants de la vallée de l'oued Grou, la forêt se dégrade rapidement du fait que les pentes ne permettent plus une rétention suffisante des eaux infiltrées et le ruissellement devient prédominant.

La forêt de chênes verts subsiste également sur les crêtes appalachiennes du Haut-Pays mais on la trouve également ailleurs, à des altitudes très variables, généralement entre 500 et 1500 m. Le chêne vert s'adapte donc à des conditions physiques différentes avec toutefois des aspects variés. Cette forêt, souvent associée de chênes-lièges, est dense (DRS : 70 à 80 %) sur les crêtes et les sommets des plateaux qui dépassent 1000 m d'altitude. Cependant, elle est un peu moins dense (DRS : 60 à 70 %) à plus basse altitude, sur les versants les plus frais de certaines vallées orientés au nord ou à l'est. Le sous-bois y est épais, avec des cytises, des cistes et des lavandes qui protègent les sols de l'impact des précipitations et qui entravent partiellement le ruissellement.

Mais cette forêt de chênes verts est souvent plus clairsemée (DRS: 40 à 60 %) du fait de son utilisation par l'homme (coupe de bois) et par les troupeaux qui ont entamé largement le sous-bois. Il en résulte nécessairement l'apparition d'un ruissellement qui entraîne les éléments fins du sol, laissant apparaître en surface les éléments caillouteux. Cette forêt claire est caractéristique des crêtes du Haut-Pays, à l'ouest de la dépression de Bled el Gada et de celles qui bordent la plaine de Smala. La dégradation est encore plus importante sur tous les versants raides de la vallée de l'oued Grou dans le Palier Intermédiaire, avec un ruissellement qui a tendance à se concentrer provoquant ainsi des ravines, surtout lorsque les schistes sont friables.

Ainsi, à part les îlots de forêts denses de chênes-liège et de chênes verts comportant un sous-bois assez fourni, les forêts claires ou dégradées favorisent essentiellement le ruissellement si le sous-bois est peu développé et si la pente du relief est assez accentuée.

2 - Le matorral

Le matorral représente 35 % de la superficie du bassin versant de l'oued Grou. Le terme de matorral désigne les formations ligneuses basses comportant des arbustes ou des arbres de faible hauteur (inférieure à 7 m). Les espèces peuvent être climaciques ou liées aux dégradations anthropiques.. La combinaison paysagère des espèces est extrêmement diversifiée, avec une densité très variable.

Dans le bassin de l'oued Grou , le matorral dense remplace la forêt dans la région de Sidi bou Abbad, située à l'extrémité sud du bassin, entre 800 et 1000 m d'altitude. C'est une formation épaisse, parfois peu pénétrable, avec un sous-bois réduit, dont les espèces dominantes sont les oléastres, les lentisques et les tizras, ces derniers étant plus fréquents dans la partie basse de l'étage. Le DRS varie globalement de 40 à 60 %, selon la pente du relief et l'exposition des versants. Le ruissellement est généralement diffus lorsque la strate herbacée est bien fournie, mais il peut être plus actif si celle-ci est réduite par le pâturage des troupeaux de moutons qui remontent plus au nord et plus en altitude, lors des années particulièrement sèches.

Si le matorral dense couvre une faible superficie dans le bassin, le matorral clair à oléastre, tizra et jujubier est par contre nettement plus étendu. Sur le Palier Intermédiaire, au sud de l'oued Grou, il couvre en partie les collines de Rouached et Koudiat el Louz et la plaine de Smala. Le degré de recouvrement des strates n'est plus que de 30 à 40 %. Le ruissellement reste diffus lorsque la strate herbacée est bien conservée mais, le plus souvent, dans les zones soumises au pâturage, il devient très actif et tend à se concentrer, avec formation de ravines, profondes de 20 à 40 cm et larges d'environ 1 m, qui deviennent permanentes.

Les formations inégalement dégradées des vallées traduisent le plus souvent une opposition de versant. Sur les versants plus frais, exposés au nord et à l'est, les espèces forestières (chêne, thuya) subsistent mais de manière clairsemée et rabougrie, avec un DRS variable de 40 à 60 %. Le ruissellement y est actif du fait des fortes pentes. A l'opposé, les versants exposés au sud et à l'ouest sont plus chauds. Les espèces du matorral y dominent (lentisque, oléastre, tizra et doum) avec un DRS nettement plus faible (20 à 40 %) qui permet un développement important du ruissellement généralisé, avec formation de ravines souvent profondes et larges.

Ces formations du matorral, le plus souvent assez dégradées par les actions anthropiques et les conditions sévères d'un milieu semi-aride, représentent l'essentiel du couvert végétal du Palier Intermédiaire et de la vallée de l'oued Grou dans le Palier Inférieur. Le ruissellement est très actif, avec souvent une concentration des écoulements dans un réseau dense de ravines.

3 - La steppe

Les formations steppiques, qui représentent 17 % de la surface du bassin, sont localisées essentiellement dans les plaines d'Asfar et de Sidi Lamine. Elles sont liées au climat semi-aride qui caractérise l'ensemble de la Dépression Orientale, au pied du Moyen Atlas, drainée par le court amont des oueds Grou et Oum er Rabia. L'aridité est due au caractère continental de cette dépression qui est protégée des flux d'ouest par les crêtes du Haut-Pays et plus ouverte au vents desséchants du sud.

Dans la plaine d'Asfar, plus élevée (800 à 1000 m), l'aridité moins sévère permet le développement d'une steppe à thuya et genévrier oxycèdre. Ces espèces bénéficient également localement de l'eau des petites nappes superficielles qui se forment temporairement dans les matériaux caillouteux à matrice limono-argileuse des épandages quaternaires. Les espèces, réparties selon un piquetage assez régulier, ne couvrent que 20 à 30 % la surface. La strate herbacée est déficiente du fait d'un pâturage excessif. Lors des fortes averses, le ruissellement généralisé entraîne la matrice fine des sols laissant apparaître en surface un reg de pierrailles schisteuses et quartzitiques.

Dans la plaine de Sidi Lamine, moins élevée (600 à 800 m), l'aridité plus sévère détermine une steppe très clairsemée (10 à 20 % de la surface). Les espèces végétales, jujubier et doum, sont souvent déchaussées par le ruissellement épisodique mais intense. Dans la partie aval de la plaine, les épandages de matériaux plus fins, érodés à l'amont, permettent la conservation d'une certaine quantité d'eau dans le sol lors des périodes pluvieuses. Celle-ci favorise un meilleur développement de la strate herbacée qui est toutefois fortement pâturée. Dans cette zone à faible pente, le ruissellement s'organise sous forme d'un lavis de chenaux anastomosés, couverts de pierrailles.

Quelque soit le type de formation steppique, le ruissellement est toujours très actif et quasi général, du fait de la forte intensité des averses qui

caractérise ce milieu continental aride.

4 - Les cultures et les pâturages

Les zones définies par cette association culture-pâturage offrent des paysages très diversifiés. Il s'agit toujours de cultures saisonnières, le plus souvent céréalières, qui sont laissées au pâturage après la moisson. Ces zones couvrent 40 % de la surface totale du bassin.

Dans le Haut-Pays, relativement humide, les cultures sont régulières mais limitées aux petites dépressions, situées entre les crêtes appalachiennes, qui comportent des sols bruns assez profonds.

Sur le Palier Intermédiaire, les cultures sont moins denses, sauf sur le Plateau d'Ezzhiliga assez humide, avec la présence de sols hydromorphes. Sur les sols bruns peu épais des collines de Rouached et Koudiat el Louz et sur les sols rouges caillouteux de la dépression de Chougrane, les cultures sont moins permanentes en raison d'un climat plus sec.

Sur le Palier Inférieur plus humide, sur les sols rouges et les sols hydromorphes, l'extension des cultures est très importante. Elles s'étendent même sur les versants où le ruissellement se déclenche rapidement.

Il est difficile d'apprécier globalement l'effet du ruissellement dans ces zones de culture-pâturage du fait de leur diversité. Sur les zones planes, il est généralement diffus mais dès que le relief présente une pente, même faible, le ruissellement devient actif en dehors de la période végétative.

Ainsi, pour l'ensemble du couvert végétal, on peut noter une liaison entre l'indice de recouvrement des strates (DRS) et l'intensité du ruissellement. G. Beaudet souligne que "au-dessus de 6/10, une faible partie seulement de l'eau reçue par le versant ruisselle, la plus grande partie s'infiltre. Au-dessous de 6/10, c'est l'inverse : l'essentiel de l'eau ruisselle". Mais les autres facteurs du milieu physique (pentes, substratum, sol,...) se combinent pour expliquer l'intensité du ruissellement. On peut toutefois considérer que d'une façon générale le ruissellement est d'autant plus important que le couvert végétal est moins dense :

- ruissellement faible sous les forêts denses de chênes-liège et de chênes verts (DRS : 60 à 90 %),

- ruissellement moyen pour les forêts claires de chêne vert et le matorral dense (DRS : 40 à 60 %), ainsi que pour les zones de culture-pâturage qui sont généralement sur des faibles pentes,

- ruissellement important pour toutes les autres formations végétales clairsemées ou sur forte pente.

Le tableau suivant présente la répartition des formations végétales selon l'intensité du ruissellement, pour les différents bassins :

Tableau I-11 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU :

Le couvert végétal selon l'intensité du ruissellement, par bassin

Bassins versants	Couvert végétal à faible ruissellement (%)	Couvert végétal à ruissellement moyen (%)	Couvert végétal à fort ruissellement (%)
Ouljet Haboub	7.5	29.1	63.4
Sidi Jabeur	5.4	37.1	57.5
Ras el Fathia	5.3	41.6	53.1
Bassin total	5.8	42.2	52

Globalement, le couvert végétal du bassin de l'oued Grou favorise essentiellement le ruissellement. Plus de la moitié du bassin est soumise à un ruissellement intense alors que le ruissellement faible ne concerne que 6 % de la surface du bassin. La différenciation entre les bassins est faible. On peut toutefois remarquer que le bassin amont, à Ouljet Haboub, a une superficie plus importante soumise au fort ruissellement, liée à une végétation steppique très développée, qui n'est que faiblement compensée par l'espace forestier à faible ruissellement, un peu plus important que pour les autres bassins.

Il ressort, de cette analyse des sols et de la végétation, une forte tendance au ruissellement quelque soit le bassin étudié. Les zones à fort ruissellement sont caractérisées essentiellement par des sols d'érosion et un couvert végétal clairsemé. Le ruissellement est moins généralisé sur les sols hérités plus ou moins évolués et lorsque le couvert végétal est moyennement dense. Sur les surfaces planes, il est généralement diffus mais dès que la

pente est suffisante (quelques degrés), il a tendance à se concentrer rapidement. Seules quelques zones à couvert forestier dense sur sol profond favorisent partiellement l'infiltration. Le régime hydrologique de l'oued Grou dépend donc essentiellement de la concentration des eaux de ruissellement.

CONCLUSION

Le bassin versant de l'oued Grou est représentatif de la bordure sud du Plateau Central marocain.

L'évolution géologique, longue et complexe, a déterminé des ensembles morphostructuraux homogènes dans leur ensemble mais très hétérogènes au niveau des reliefs élémentaires. Quel que soit l'ensemble morphostructural considéré, les reliefs sont toujours très vigoureux du fait de la profonde entaille du réseau hydrographique au Tertiaire et au Quaternaire.

Ce relief contrasté, associé à un substratum primaire essentiellement imperméable et soumis à des conditions climatiques également très contrastées, est le support d'une variété de paysages à dominante semi-aride.

En effet, le réseau hydrographique est dense mais l'écoulement pérenne est faible en raison de l'indigence des apports souterrains. En surface, l'interception des précipitations n'est guère favorisée par un couvert végétal très clairsemé et des sols à faible capacité de rétention.

Ainsi, l'ensemble des facteurs naturels du bassin versant de l'oued Grou, accentués par les actions anthropiques, favorise surtout les processus de ruissellement et la concentration rapide des écoulements en période pluvieuse.

L'analyse comparée des bassins versants aux différentes stations hydrométriques peut être effectuée à partir des principales caractéristiques du contexte naturel qui favorisent l'écoulement des eaux de surface. Ces caractéristiques sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau I-12 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU :
Principaux facteurs de l'écoulement des eaux de surface par bassin

Bassins versants	Ouljet Haboub	Sidi Jabeur	Ras el Fathia
Surface (km ²)	1627	3067	3540
Roches imperméables (%)	75	66	61
Indice de relief ($Ds = Ig \times \sqrt{A}$)	assez fort (222)	fort (288)	fort (280)
Densité de drainage du réseau maximal (Dd, Km/ Km ²)	3.6	4.3	4.2
Coefficient de torrentialité $Ct = \left[Dd \times \frac{N_1}{A} \right]$	5.5	7.2	6.9
Sols d'érosion (%)	47	48	50
Couvert végétal à fort ruissellement (%)	63	57	52

Quel que soit le bassin étudié, les valeurs des facteurs favorisant l'écoulement des eaux de surface sont très élevées.

La différenciation entre les bassins est faible, surtout pour ceux de Sidi Jabeur et Ras el Fathia qui, par leur surface, englobent la majeure partie des différents milieux naturels que comportent le bassin versant de l'oued Grou. Seul le bassin amont à Ouljet Haboub, a des valeurs légèrement différentes. Ceci est dû au poids des hautes plaines de la Dépression orientale qui se caractérisent par un relief moins prononcé et un réseau hydrographique moins dense. Par contre, l'imperméabilité du substratum et la dégradation du couvert végétal sont plus importants que dans les autres bassins.

Il en résulte ainsi une convergence de tous les facteurs favorisant le ruissellement et la concentration rapide des eaux dans les drains principaux. Le régime hydrologique sera donc homogène aux différentes stations hydrométriques dans la mesure où les conditions climatiques sont homogènes dans le temps et dans l'espace pour l'ensemble du bassin.

DEUXIEME PARTIE
LE CLIMAT

INTRODUCTION

Dans cette partie, nous nous proposons de présenter, à l'échelle du bassin versant de l'oued Grou, les particularités climatiques majeures et leurs incidences sur le comportement hydrologique des cours d'eau, à partir de deux paramètres essentiels : la température et les précipitations.

A cette fin, l'étude climatique portera sur :

- la pluviosité qui détermine l'abondance fluviale,
- la répartition mensuelle et saisonnière des pluies qui influence directement le régime hydrologique,
- les moyennes mensuelles et annuelles des températures, facteur explicatif de l'évapotranspiration.

Ainsi, ces données statistiques feront l'objet d'une critique préalable puis d'une interprétation compte tenu des données chiffrées disponibles.

Avant de commencer la critique de l'organisation et la distribution du réseau climatologique, il s'agit de dégager les grands traits fondamentaux du climat de la région, ses nuances spatiales et les irrégularités temporelles.

I - L'APPROCHE DU CLIMAT REGIONAL

L'aspect du climat de la région découle de la circulation atmosphérique générale au Maroc. Ce dernier doit à la latitude et à la proximité des deux façades maritimes qui le baignent d'avoir un climat de type méditerranéen, avec des hivers doux, des pluies d'automne, d'hiver et de printemps et des étés chauds et secs : le trait essentiel en est la coïncidence de l'été et de la période sèche. Son climat s'explique également par sa situation au nord-ouest du continent africain et par le voisinage du Sahara au sud.

L'approche du climat régional revêt trois aspects :

- un premier qui relève de la climatologie dynamique,
- un second plus statistique qui s'appuie sur l'inventaire et la critique des données,

- enfin un troisième qui analyse les nuances des régimes thermiques et pluviométriques.

A - LES ASPECTS METEOROLOGIQUES

Le climat méditerranéen du Maroc est essentiellement sous la dépendance de phénomènes atmosphériques caractéristiques de la zone subtropicale sur la bordure occidentale des continents; A..Viant (1947), Gíaoa et M. Ferreira (1956), D. Noin (1963) et H. Delannoy (1971).

En été, la zone subtropicale est annexée au domaine désertique tropical chaud et sec, en hiver au domaine humide des façades occidentales des continents.

1 - La circulation des masses d'air

Tout le Maroc occidental est soumis pendant la plus grande partie de l'année au régime des vents d'ouest, à un climat changeant et quelquefois pluvieux. C'est le balancement saisonnier de l'équateur météorologique qui permet le positionnement sur les latitudes méditerranéennes du courant d'altitude (courant "jet"). Sa trace au sol est marquée par des perturbations ou cyclones tempérés, petites dépressions associant le plus souvent un front chaud et un front froid se déplaçant globalement d'ouest en est. Ces guirlandes de perturbations correspondent au concept traditionnel du front polaire. Pendant la saison froide, tout le Maroc occidental connaît les conditions du domaine humide "océanique". Cependant, quelques centres d'actions dirigent les masses d'air et rendent discontinue la circulation zonale.

- L'anticyclone des Açores

Situé au voisinage des Açores, l'anticyclone se trouve sous les hautes pressions subtropicales d'altitude dans une région de forte subsidence qui couvre en toutes saisons l'Atlantique tropicale. D'extension très variable, il est alimenté à la fois par l'air tropical subsident et l'air polaire descendant des hautes latitudes sur son flanc septentrional. En raison du balancement saisonnier, sa présence sur le Maroc occidental est quasi-permanente de mai à septembre du fait que pendant cette période, l'échauffement des basses couches sur le continent le limite à la rive orientale de l'Atlantique.

- Les anticyclones polaires de l'Atlantique nord

Ils sont instables et leur pression élevée est due essentiellement à un effet de densité à cause de très basses températures. Pendant la saison froide, ils parviennent jusqu'au Maroc en circulation de nord ou de nord-ouest et viennent renforcer et étendre l'anticyclone des Açores sur la région .

- La dépression saharienne

En été, le Sahara est surchauffé ; en conséquence, il s'y crée par convection des ascendances qui engendrent une dépression de type thermique (dépression saharienne). L'atmosphère, bien que sèche, est très instable avec des vents de sables et parfois des orages.

En somme, l'oscillation saisonnière en latitude de la situation des hautes pressions subtropicales va déterminer une alternance de situations anticycloniques et de situations cycloniques plus ou moins pluvieuses.

2 - Les différents types de temps

D'une façon générale on peut distinguer deux situations qui mènent à l'alternance d'un été de type aride, caractérisé par un temps calme et régulier, et d'un hiver de type tempéré océanique, caractérisé par un temps instable et perturbé.

- En hiver

L'anticyclone des Açores se replie vers le sud-ouest, son centre se trouve déporté au sud des Açores (longitude 27° ouest) alors que l'Atlantique nord devient un centre dépressionnaire où descendent périodiquement les anticyclones polaires. Le mélange de masses d'airs tiède et froid se fait donc le long d'un front mobile où se succèdent les perturbations. Celles-ci se déplacent de l'ouest vers l'est, apportant au pays un temps changeant, des rafales de vents, des pluies irrégulières. Néanmoins, le passage de ces cyclones tempérés est régulièrement entrecoupé par les extensions de hautes pressions subtropicales vers le nord, ramenant un temps sec et froid.

- En été

Du fait du balancement de l'équateur météorologique, les hautes pressions subtropicales remontent plus vers le nord, jusqu'au 45^{ème} parallèle, et installent un temps calme et régulier sur notre région, caractérisé par une

atmosphère limpide et la sécheresse (sauf sur les côtes en raison de la formation de brouillards littoraux). Par ailleurs, une dépression thermique se crée sur le Sahara qui va fortement influencer le climat marocain. Lorsque les basses pressions sahariennes s'avancent anormalement vers le nord-ouest, jusque dans les régions atlantiques, des vents d'est ou sud-est (Chergui) franchissent la chaîne de l'Atlas et déversent un souffle brûlant sur les plateaux et les plaines atlantiques, provoquant parfois des orages. Pour toutes ces raisons, l'été est sec avec des températures diurnes élevées.

Pour le bassin versant de l'oued Grou, l'examen du cadre géographique montre qu'il s'étale en gros sur un degré de latitude (33° et 34°) et entre 1604 et 40 m d'altitude. Les écarts de latitude jouent un rôle secondaire dans la répartition des éléments du climat (températures et précipitations). Par contre la position par rapport à l'océan Atlantique et l'altitude complétée par les conditions de topographie et d'exposition sont déterminantes. Les caractéristiques principales du climat du secteur sont donc celles de toute la partie nord-ouest du Maroc et sont bien celles du climat méditerranéen. En outre, la faiblesse et l'irrégularité des précipitations sont un trait bien connu des marges méridionales de ce climat.

B - L'INVENTAIRE ET LA CRITIQUE DES DONNEES CLIMATIQUES

Pour décrire le climat du bassin versant de l'oued Grou, nous allons procéder à l'examen des données climatiques existant dans le secteur en deux temps : d'abord en précisant les conditions de leur collecte et leur origine, ensuite en critiquant l'homogénéité et la durée des séries d'observations.

1 - Le choix des données

Pour disposer de chroniques d'observations disponibles, trois problèmes se posent :

- le premier est celui de la documentation des mesures disponibles,
- le deuxième, celui de la distribution, de l'organisation et de la situation des stations pour l'ensemble du bassin de l'oued Grou,
- le troisième concerne la longueur des séries d'informations disponibles.

a - Le problème de la documentation et de la période d'étude

Les relevés d'observations utilisés dans l'étude proviennent des services gestionnaires qui possèdent des banques de données météorologiques : Direction Générale de l'Hydraulique (Rabat), la Météorologie Nationale (Casablanca) et la Direction des Eaux et Forêts (Rabat). Malheureusement, ces services ne possèdent pas, pour le secteur d'étude, les données des différents éléments du climat (température, évapotranspiration réelle, vent, durée d'ensoleillement...), par manque de stations de mesure. De même ces services préfèrent ne pas divulguer certaines observations, même pluviométriques, pour lesquelles il est difficile d'assurer une qualité minimale de collecte et de critique...

Pour le réseau pluviométrique, on constate d'une part, que des stations sont arrêtées après l'indépendance et que certaines séries d'observations présentent des lacunes importantes à l'échelle annuelle; d'autre part, qu'il existe quelques stations pluviométriques situées dans le bassin versant dont nous n'avons pas pu acquérir, à ce jour, les données.

Par ailleurs, le manque d'homogénéité temporelle des données et la jeunesse de l'équipement hydrométrique sont les contraintes principales qui ont décidé du choix de la période d'étude : 1972-73/1985-86. Cette période débute à la date d'implantation des stations hydrométriques sur l'oued Grou et la date de fin est imposée par les lacunes importantes dans les données de la station de mesure de la température d'Oued Zem et de quelques stations pluviométriques, comme par exemple Moulay bou Azza et Rommani.

b - L'organisation du réseau climatologique

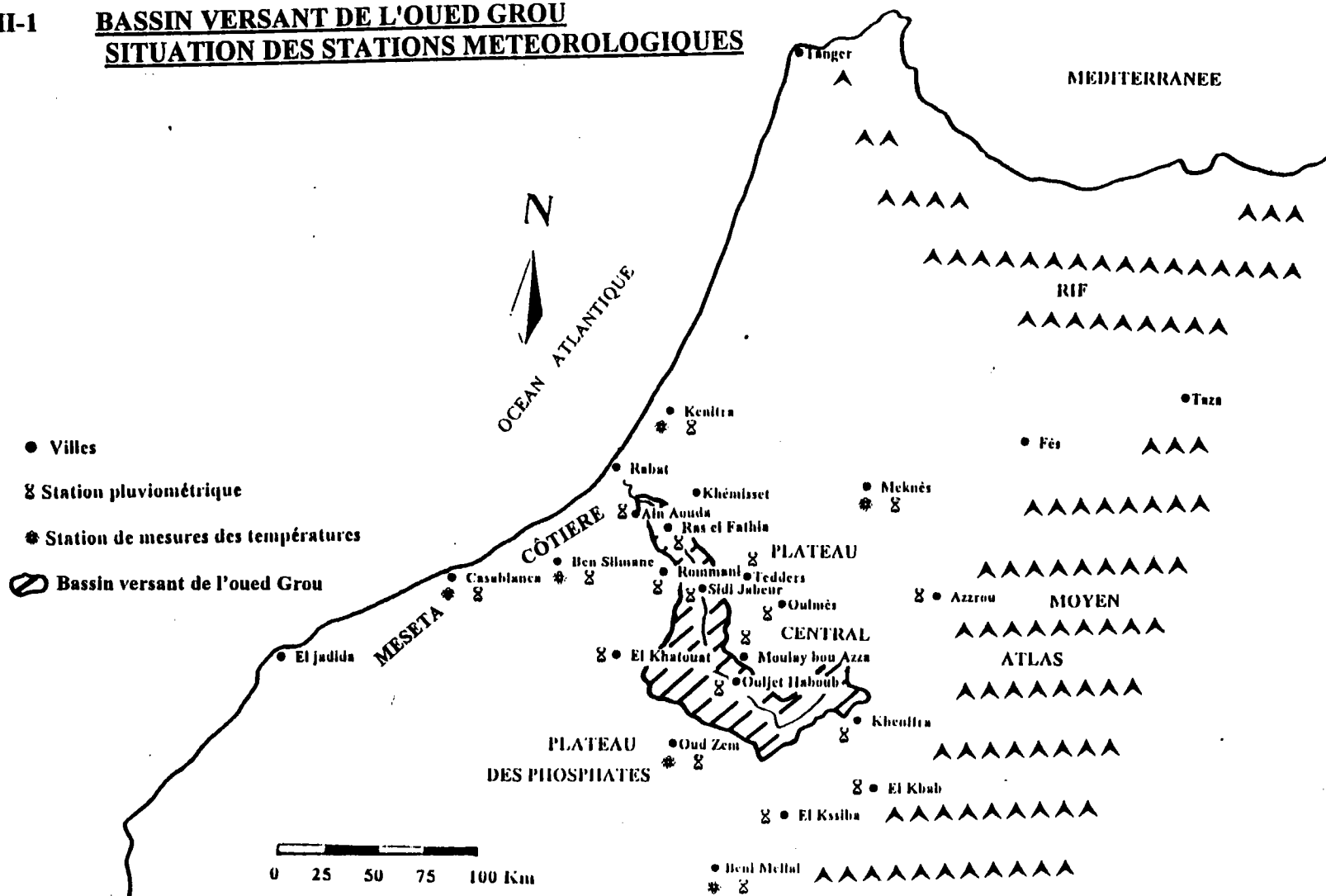
Le réseau climatologique de la région est généralement hétérogène. Cette hétérogénéité apparaît dans l'espace et dans le temps.

- Dans l'espace

La carte (Cf. Fig. II-1) montre que l'infrastructure météorologique, dont les données sont disponibles, est relativement clairsemée pour l'ensemble de la région. De même, ce réseau climatologique nous paraît mal réparti pour un bassin versant tel que celui de l'oued Grou aux caractéristiques contrastées. Sa distribution géographique montre une disparité pour certaines parties du bassin versant. Ainsi, même s'il existe des stations de mesure, situées sur les bordures du bassin versant, leur densité

Fig. II-1

BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU
SITUATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES



reste inégale pour ces différentes parties : d'une part, la partie amont en est paradoxalement la plus dépourvue et d'autre part, la majorité des stations sont installées aux bordures avoisinant les parties médiane et aval. De plus la situation de certains postes n'est pas tout à fait représentative de la réalité pluviométrique de la région : Ouljet Haboub, Sidi Jabeur et Ras el Fathia sont situées dans la vallée de l'oued Grou, à proximité des stations hydrométriques de même nom.

Enfin, si les stations extérieures vont faciliter la compréhension du climat ainsi que le calcul de pluies moyennes du bassin, l'absence presque totale de postes en certains endroits et notamment le long des bandes nord-est et sud-est, a sensiblement accru la part de l'interprétation dans les calculs (Voir plus loin, Estimations des précipitations moyennes du bassin versant en II- D).

- Dans le temps

Excepté dix postes pluviométriques qui ont des relevés pour une période suffisamment longue, les autres stations viennent d'être installées dans le bassin versant de l'oued Grou. En plus, certaines stations présentent des lacunes.

Quant aux températures, l'absence totale de postes dans le bassin, nous conduit à utiliser la station la plus proche, celle d'Oued Zem, qui avoisine approximativement la partie centrale du bassin versant. Nous bénéficions aussi d'autres postes qui nous ont permis d'affiner les observations thermiques à l'échelle régionale (voir plus loin, en III-A-1) : la station de Meknès située au nord, Kenitra au nord-ouest, Ben Slimane et Casablanca au sud-ouest et celle de Beni Mellal située au sud-est (Cf. carte Fig. II-1).

c - Le choix de l'année de référence d'étude

Il est nécessaire de justifier le découpage de l'année d'étude de septembre à août. Ce découpage de l'année est adopté par les services de l'Agronomie, de l'Hydraulique et par plusieurs auteurs ayant déjà travaillé sur le Maroc. Cette année de référence est comprise entre deux étages annuels successifs, du fait de l'absence quasi-totale de pluies pendant l'été, la saison où l'évaporation potentielle atteint ses valeurs maximums (climat des pays méditerranéens du sud); elle correspond au concept de l'année hydrologique.

Afin de pouvoir utiliser aisément les documents climatiques et hydrologiques établis par ces services, nous retenons cette année de référence en signalant toutefois quelques remarques.

Ce découpage lié aux facteurs climatiques convient mieux aux recherches agronomiques tout en correspondant aux réalités hydrologiques de notre région. Son origine est fixée au moment où les réserves en eau sont à leur minimum : les précipitations commencent en automne dès le mois de septembre mais en réalité les réserves en eaux souterraines épuisées en saison sèche ne sont en voie de reconstitution qu'en novembre et parfois tardivement au mois de décembre. Ce retard est bien lié au fait que l'évapotranspiration reste encore élevée durant cette période de l'année.

2 - La critiques des données

Les séries d'observations de la période 1972-73/1985-86 ont été critiquées, tant pour vérifier leur homogénéité que pour combler certaines lacunes existantes.

a - L'homogénéité des données

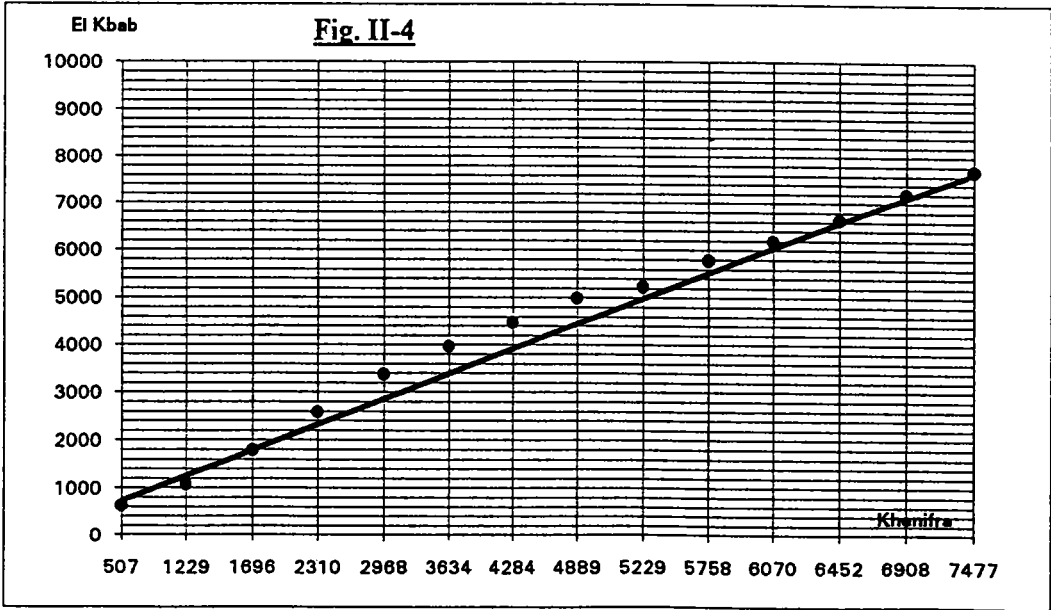
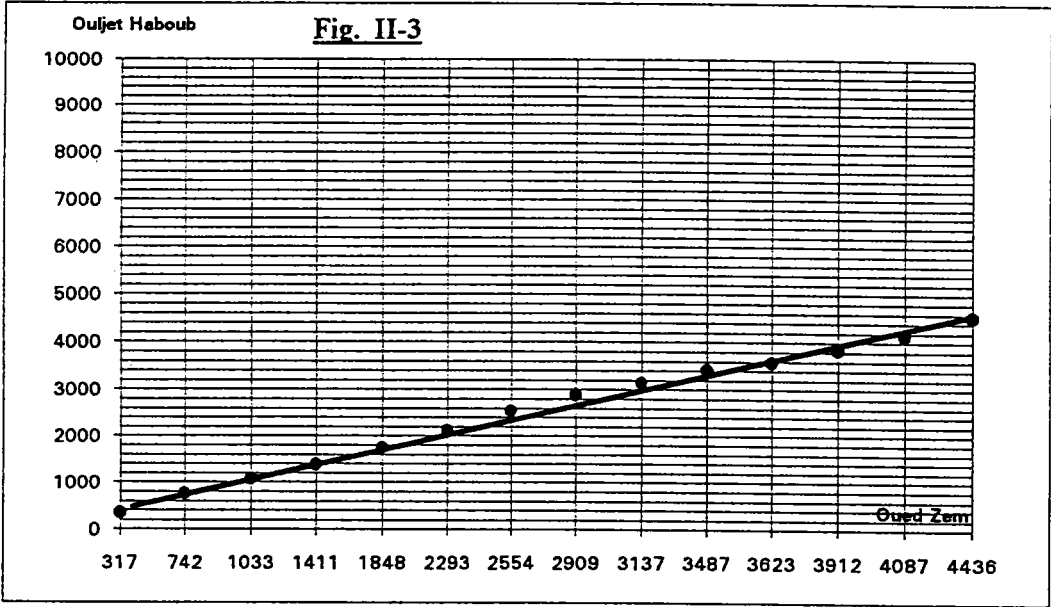
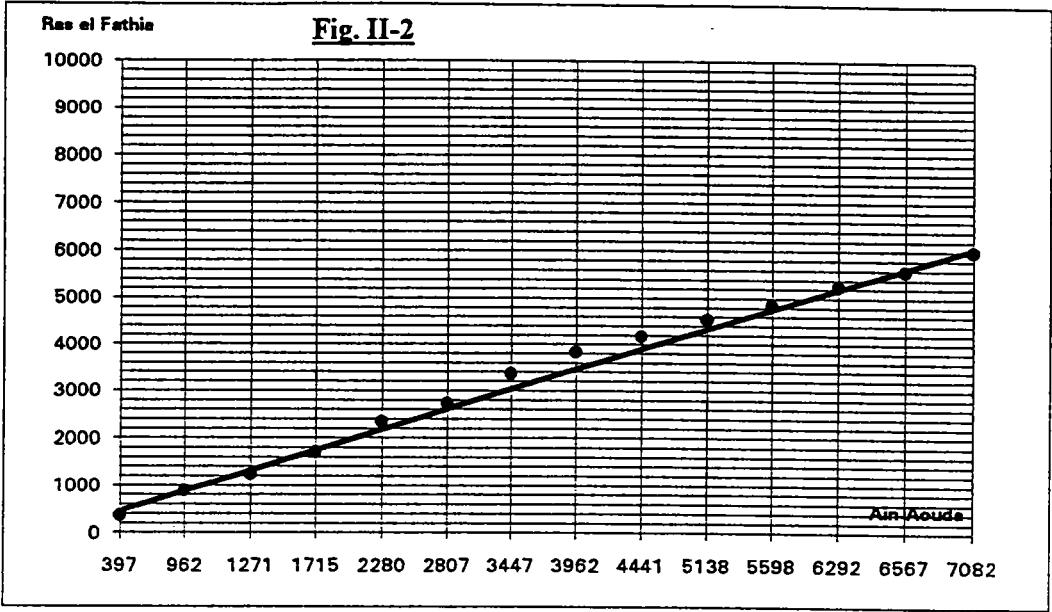
Pour vérifier l'homogénéité des données pluviométriques et thermiques, nous avons utilisé la méthode des doubles cumuls et la corrélation poste à poste.

- Le double cumul : cette méthode permet une vérification de la fiabilité et de l'homogénéité des totaux annuels de précipitations et des moyennes annuelles de températures. Elle est souvent utilisée pour vérifier le déplacement d'un poste ou les changements dans les conditions d'enregistrement (états aux alentours, observateur...)

En effet, sur un repère orthonormé, on porte en abscisse les totaux annuels cumulés de la station de référence X et en ordonnée les totaux annuels cumulés de la station Y à vérifier (P. Dubreuil, 1974).

L'application systématique de la méthode aux différentes stations pluviométriques n'a montré aucune hétérogénéité (pas de changement de pente des droites du double cumul). A l'échelle des sous ensembles du bassin versant de l'oued Grou, plusieurs stations de référence peuvent être utilisées, chacune d'entre elles servant de base de comparaison aux stations voisines. A titre d'exemple, nous avons sélectionné les graphiques (Fig. II-2 à II-4 et

Double cumul des stations pluviométriques



annexe II-1) pour trois stations de référence correspondant aux parties amont, médiane et aval du bassin versant, Khenifra, Oued Zem et Ain Aouda qui ont fonctionné durant une longue période et sans lacune. L'analyse graphique a montré quelques ruptures dans les alignements des points qui correspondent soit à des années exceptionnelles (1973-74), soit au début d'une sous série humide (1974-75) ou sèche (1980-81).

La méthode appliquée aux données de température (Cf. Annexe II-2) n'a pas davantage permis de détecter une quelconque hétérogénéité.

- La corrélation de poste à poste : cette méthode permet de regrouper les stations, dans la mesure où le coefficient de corrélation (r) reflète la cohérence des données d'une station par rapport à une autre. Nous avons testé cette méthode pour toutes les stations pluviométriques et thermiques sur leur chronique commune de 14 années (1972-73/1985-86); les matrices de corrélation sont représentées dans les tableaux II-1 et II-2.

Vu la taille de l'échantillon de la période d'étude (14 années), on a testé les distributions des données des stations étudiées afin de les normaliser en comparant les valeurs de (r) obtenues avec celles des tables de Fisher et de Bravais-Pearson (Groupe Chadule, 1974). Celles-ci indiquent les seuils inférieurs de signification des valeurs de (r) pour divers niveaux de risque d'erreur correspondant aux probabilités figurant dans le tableau suivant :

Tableau II-3 : Le seuil inférieur de signification du coefficient de corrélation (r) d'après les tables de Fisher et de Bravais-Pearson

Risque d'erreur de la probabilité	0,10	0,05	0,02	0,01
Valeur de r : Fisher	-----	0,50	0,57	0,62
Valeur de r : Bravais-Pearson	0,46	0,53	0,61	-----

Pour les stations pluviométriques, (Cf. tableau II-1), toutes les valeurs calculées de (r) sont supérieures au seuil de signification correspondant au risque d'erreur de 0,01 selon la table de Fisher. Ainsi on note que :

Tableau II-1 : Matrice de corrélation entre les stations pluviométriques (1972-73/85-86)

Stations	Ain Aouda	R. el Fathia	Rommani	Tedders	Sidi Jabeur	El Khatouat	Oulmès	M.bou Azza	Oued Zem
Ain Aouda	1	0.84	0.82	0.93	0.86	0.68	0.82	0.79	0.76
R. el Fathia		1	0.93	0.88	0.98	0.83	0.9	0.81	0.83
Rommani			1	0.93	0.92	0.89	0.91	0.82	0.8
Tedders				1	0.9	0.77	0.9	0.81	0.83
Sidi Jabeur					1	0.78	0.83	0.81	0.79
El Khatouat						1	0.89	0.79	0.8
Oulmès							1	0.75	0.84
M.bou Azza								1	0.85
Oued Zem									1
O. Habeub									

Stations	O. Habeub	Khenifra	El Kasiba	El Kbab	Meknès	Kenitra	Casablanca	Ben Slimane	Beni Mellal
Ain Aouda	0.79	0.8	0.69	0.63	0.79	0.81	0.76	0.87	0.73
R. el Fathia	0.91	0.91	0.82	0.81	0.89	0.77	0.84	0.9	0.83
Rommani	0.94	0.92	0.84	0.71	0.81	0.79	0.84	0.97	0.75
Tedders	0.91	0.9	0.77	0.71	0.79	0.87	0.85	0.95	0.81
Sidi Jabeur	0.86	0.87	0.82	0.77	0.85	0.79	0.81	0.91	0.79
El Khatouat	0.88	0.89	0.77	0.71	0.82	0.64	0.83	0.81	0.71
Oulmès	0.95	0.94	0.74	0.75	0.85	0.77	0.88	0.88	0.82
M.bou Azza	0.83	0.88	0.82	0.73	0.82	0.64	0.72	0.75	0.78
Oued Zem	0.91	0.94	0.81	0.86	0.92	0.73	0.82	0.77	0.9
O. Habeub	1	0.97	0.81	0.82	0.88	0.82	0.9	0.9	0.86
Khenifra		1	0.86	0.85	0.92	0.82	0.93	0.87	0.9
El Kasiba			1	0.73	0.83	0.8	0.82	0.78	0.72
El Kbab				1	0.91	0.71	0.79	0.64	0.94
Meknès					1	0.81	0.9	0.76	0.87
Kenitra						1	0.9	0.82	0.73
Casablanca							1	0.83	0.81
Ben Slimane								1	0.71
Beni Mellal									1

Tableau II-2 : Matrice de corrélation entre les stations de mesure thermiques (1972-73/85-86)

Stations	Casablanca	Kenitra	Ben Slimane	Meknès	Oued Zem	Beni Mellal
Casablanca	1	0.85	0.24	0.68	0.85	0.65
Kenitra		1	0.28	0.65	0.81	0.51
Ben Slimane			1	0.65	0.28	0.17
Meknès				1	0.87	0.93
Oued Zem					1	0.83
Beni Mellal						1

- 75 % des valeurs de coefficient de corrélation calculés dépassent 0,78,
- 50 % des valeurs sont supérieures à 0,82,
- 25 % des valeurs dépassent 0,87,
- 10 % sont supérieures à 0,91.

Les plus mauvais résultats (entre 0.6 et 0.7) proviennent de corrélations entre des stations littorales et continentales comme exemple Ben Slimane, El Kbab et Ain Aouda El Kssiba.

Pour les stations de mesure des températures, (Cf. tableau II-2), les résultats sont plus variables :

- 50 % des valeurs de coefficient de corrélations dépassent 0,65,
- 40 % des valeurs sont supérieures à 0,80,
- 18 % des valeurs sont supérieures à 0,90 .

La station de Ben Slimane nous montre, en effet, de mauvaises corrélations avec toutes les autres stations et aucune déclaration du changement de poste ou de l'état des alentours n'a été signalée, ce qui peut faire douter de la fiabilité des observations de cette station.

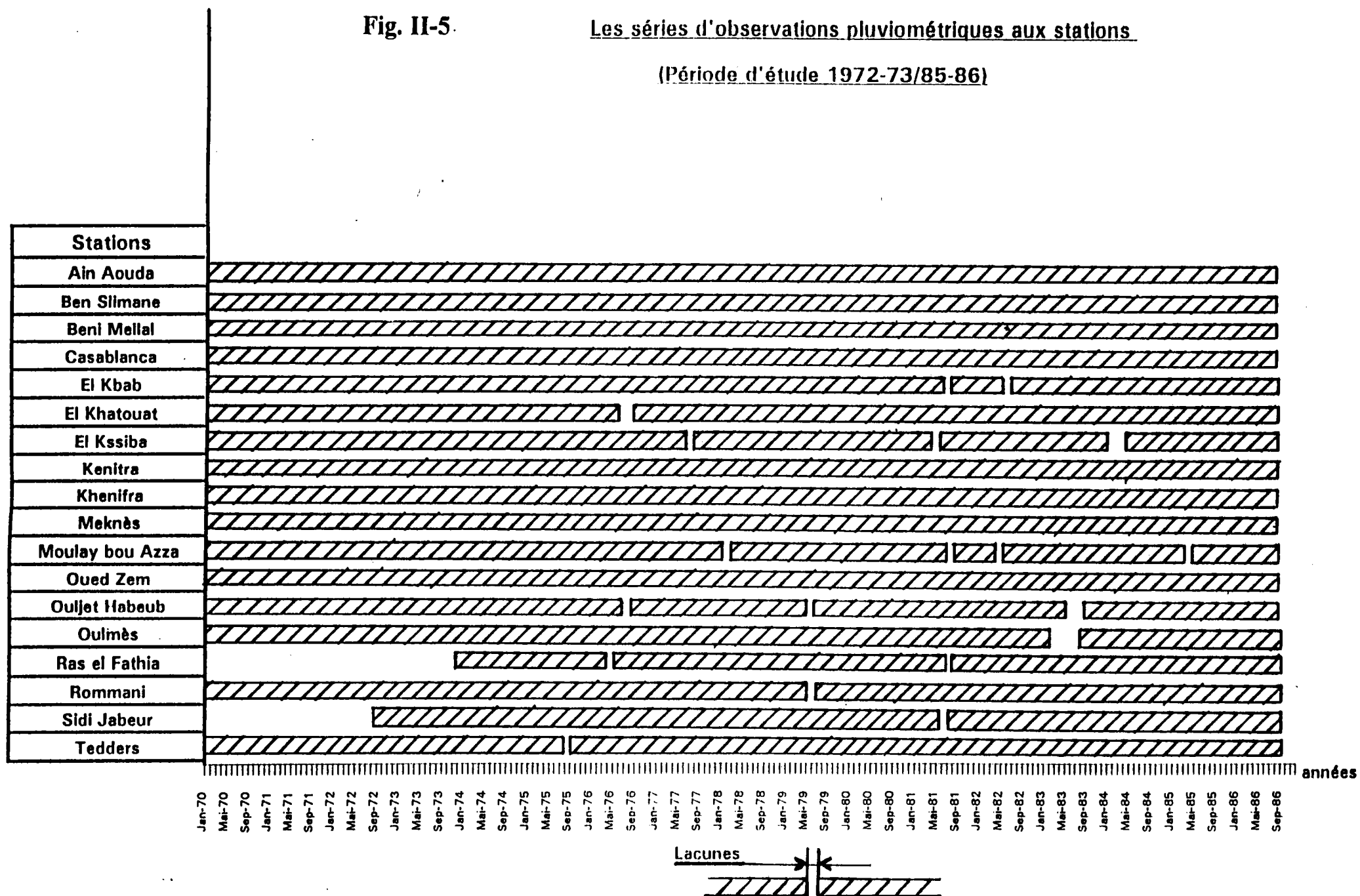
Selon les résultats calculés, on a considéré que les valeurs de (r) comprises entre 0,80 et 0,89 montrent une bonne corrélation, entre 0,90 et 0,94 une corrélation significative apparaît et entre 0,95 et 0,99, il s'agit d'une corrélation très significative. Pour les corrélations moyennes comprises entre 0.6 et 0.8, nous retiendrons deux explications possibles :

- les petits échantillons ($n < 30$, ici 14 années) ne sont pas, en général, distribués normalement, même lorsqu'ils proviennent de populations normales,
- l'ensemble des stations ne se trouvent pas dans un même contexte climatique ; trois groupes de stations au moins s'individualisent : secteur littoral, secteur de transition et secteur intérieur. Chaque groupe se différencie assez nettement des autres. Ceci ne peut être expliqué que par la conjonction des variations de plusieurs paramètres géographiques ; à titre d'exemple :

Fig. II-5.

Les séries d'observations pluviométriques aux stations

(Période d'étude 1972-73/85-86)



l'altitude de la station, la proximité de l'océan, l'éloignement par rapport aux grandes lignes de relief qui font barrière aux flux perturbés, la situation en longitude et le site géographique (plateau, plaine, vallée etc...).

b - Le comblement des lacunes d'observations

Quelques stations pluviométriques retenues pour l'étude de la période 1972-73/1985-86 présentent des lacunes d'observations généralement sur quelques mois (Cf. Fig. II-5). La reconstitution des données manquantes aux stations lacunaires pour quelques mois, s'est faite selon la méthode de la régression linéaire. Les couples de stations à confronter doivent avoir des affinités aussi climatiques que géographiques, on recherche généralement une distance entre les stations inférieure à 30 km . On a privilégié également les stations avec lesquelles la série à combler présentait les degrés de corrélation les plus proches de 1, à l'échelle annuelle ou mensuelle (Voir matrice des corrélations Tableau II-1).

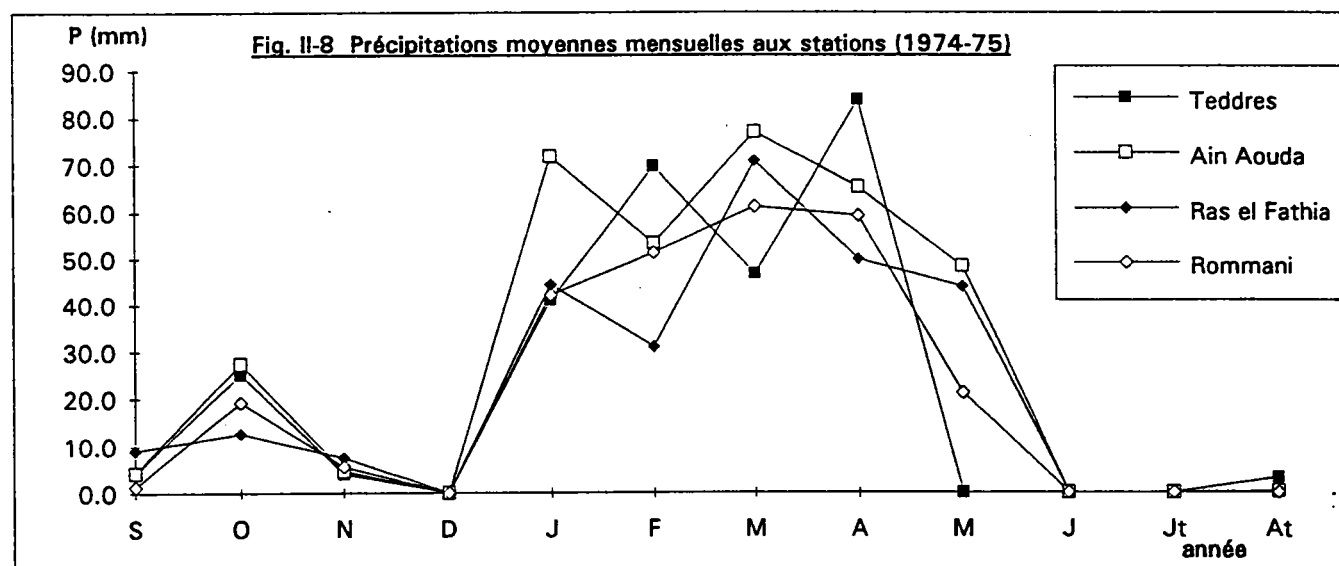
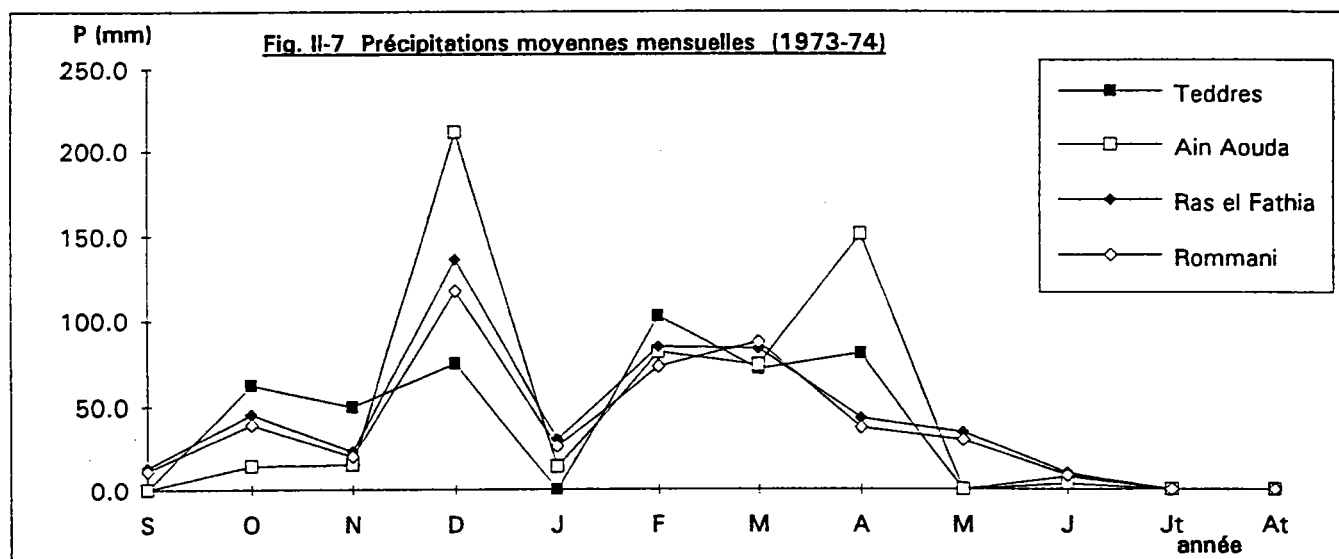
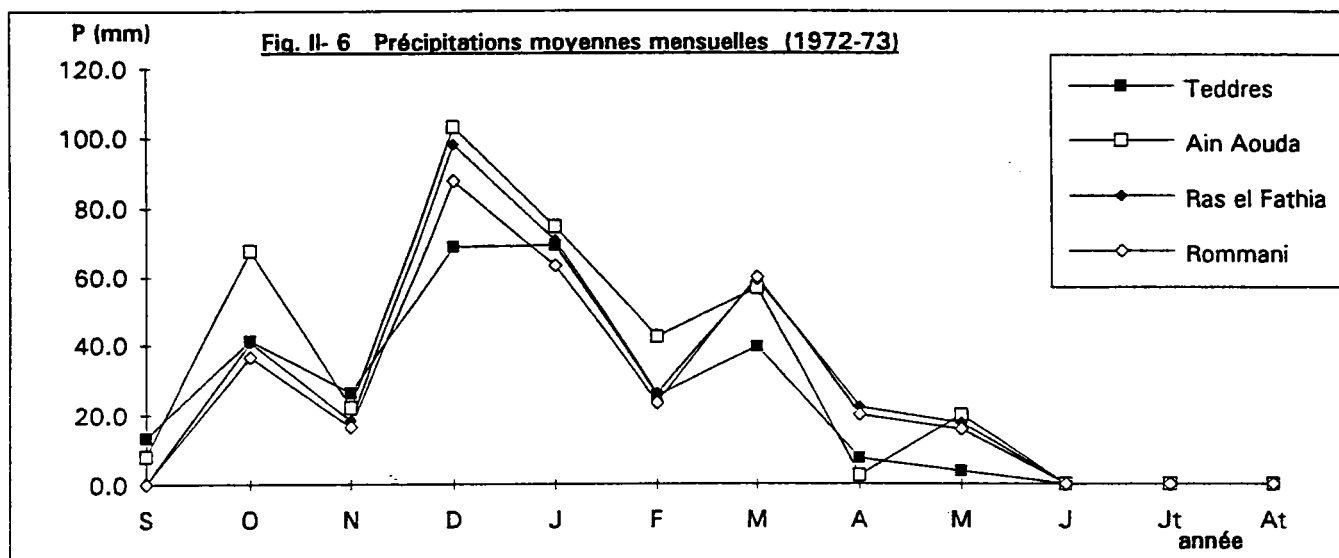
L'extension de la série d'observation à la station Ras el Fathia pour les trois années manquantes (1972-73/1974-75) a été faite selon les données de la station Sidi Jabeur. Le choix de cette station est basé sur la situation commune dans la vallée pour les deux stations, leur proximité et un coefficient de corrélation proche de 1 ($r = 0.98$). Ces données reconstituées, ont été comparées avec celles des stations avoisinantes Ain Aouda, Rommani et Tedders (Cf. Fig. II-6 à II-8).

c - Les régimes climatiques

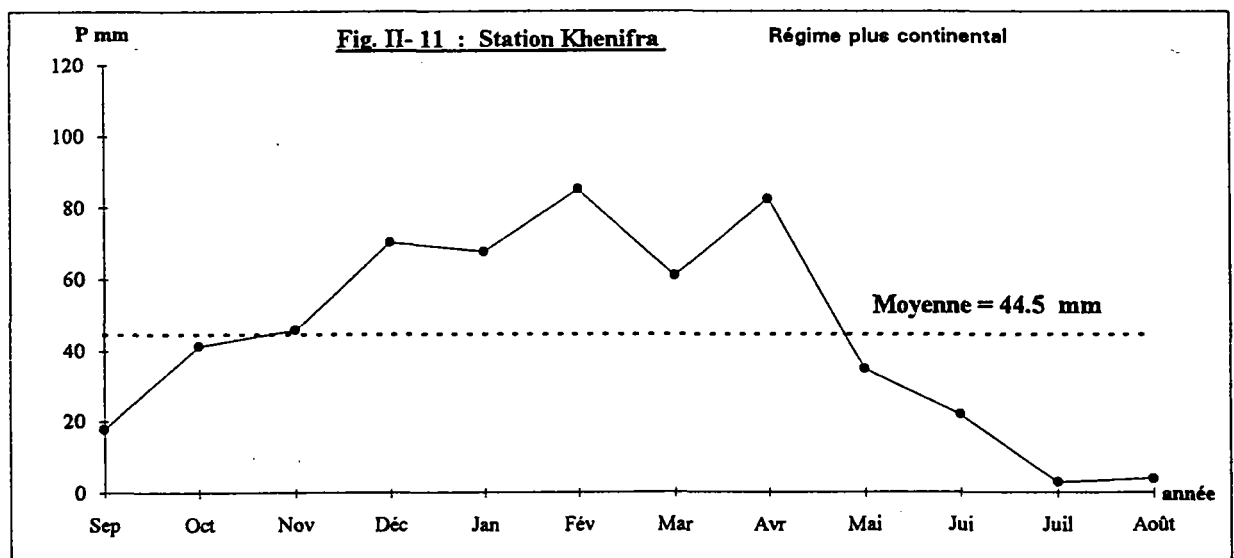
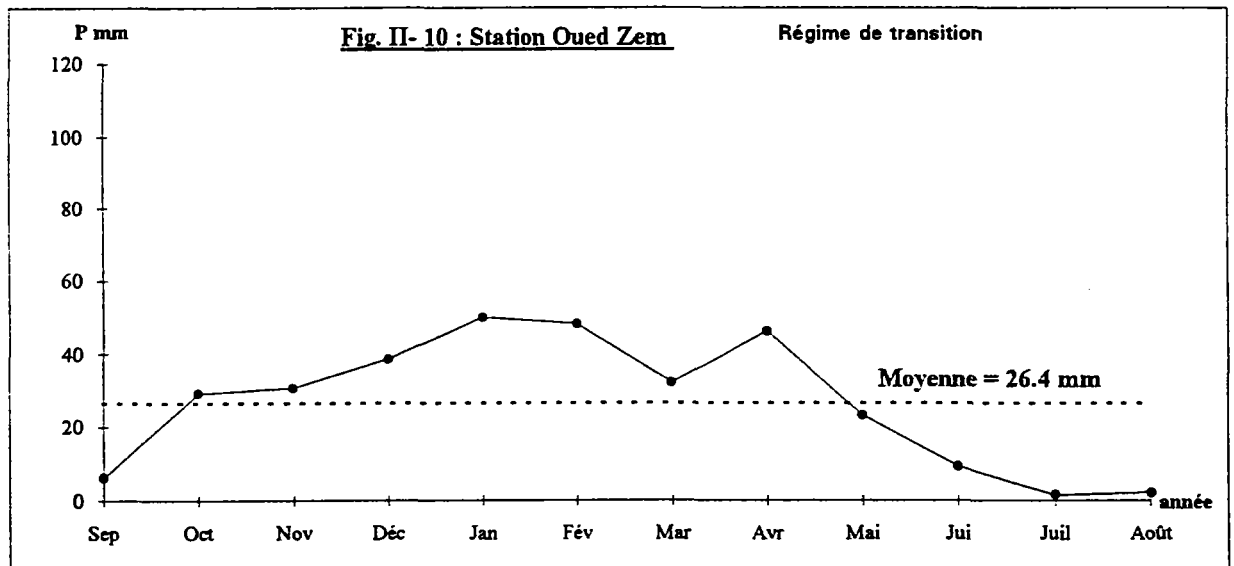
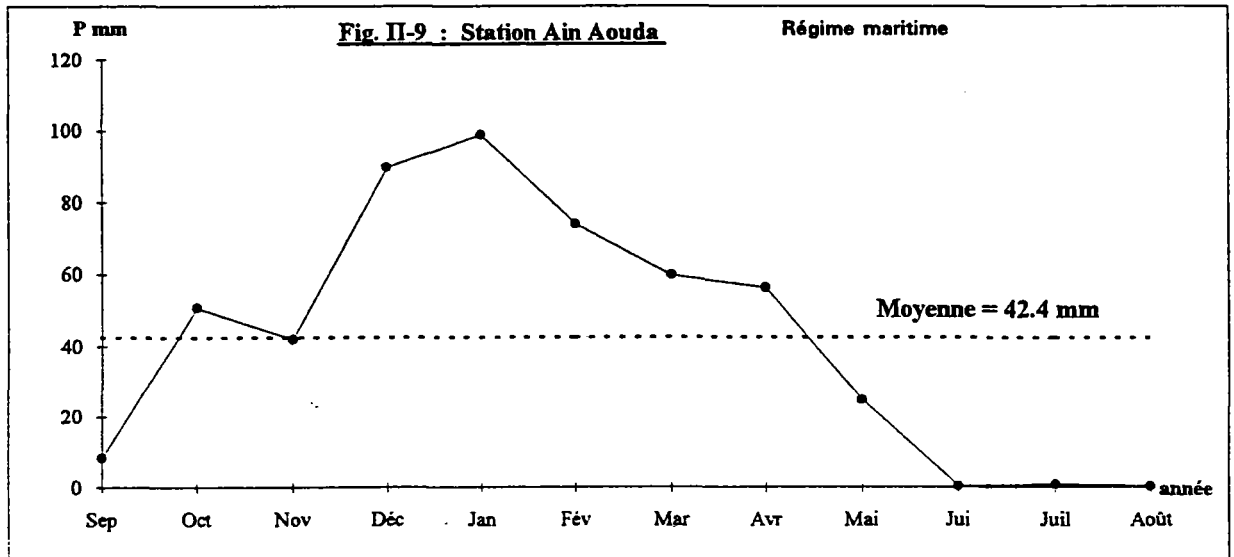
Les caractéristiques essentielles des régimes pluviométriques et thermiques dans la région, du littoral atlantique jusqu'au pied du Moyen Atlas en passant par les bas et les hauts plateaux, présentent des nuances que nous allons souligner.

- Le régime pluviométrique

Dans nos régions, la faiblesse et l'irrégularité des précipitations sont un trait bien connu des marges méridionales du climat méditerranéen. Pour le secteur étudié, les figures II-9 à II-11 et celles de l'annexe II-3 révèlent des nuances géographiques dans la variation des précipitations au cours de l'année moyenne avec, cependant, un caractère plus original qui est l'individualisation d'une saison estivale sèche pour l'ensemble des stations. Les mois de juillet, août, juin et parfois septembre sont, dans l'ordre, les mois



Les régimes pluviométriques (1972-73/85-86)



les plus secs de l'année. Par ailleurs, décembre, janvier, février et avril correspondent aux mois les plus humides dans la totalité des stations. En général, le nombre de mois où les précipitations sont inférieures aux modules pluviométriques aux différentes stations est de l'ordre de 5.

$$\text{MODULE PLUVIOMETRIQUE (mm)} = \frac{\text{PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES (mm)}}{12}$$

Pour différencier les régimes pluviaux des stations, il est difficile de s'appuyer sur un indice simple. Par exemple, nous avons calculé l'indice de continentalité pluviale (C) de COUTAGNE (1954), qui est le rapport du total des précipitations des six mois les plus chauds à la somme des précipitations des six mois les plus froids.

$$C = \frac{\text{PRECIPITATIONS DES 6 MOIS CHAUDS}}{\text{PRECIPITATIONS DES 6 MOIS FROIDS}}$$

Pour l'ensemble des stations du secteur, l'indice de continentalité pluviale (C) est inférieur à 1; les précipitations du semestre chaud sont bien inférieures à celles du semestre froid. Il s'agit donc de régimes maritimes et non continentaux. Mais, dans notre région, cet indice n'a pas permis de mesurer le degré de continentalité des stations étudiées du fait des précipitations insignifiantes de la saison estivale ; par contre, nous verrons plus loin que les températures se prêtent davantage à ce type d'analyse.

Cependant, on peut distinguer de l'ouest vers l'est une évolution du régime (Cf. Fig. II-12 et annexe II-3) :

- un régime maritime, caractérisé par des précipitations importantes d'automne-hiver à partir de septembre autour d'un seul maximum (décembre-février), puis par une décroissance régulière jusqu'au minimum estival. Ce régime concerne plus particulièrement les stations de Casablanca, Kenitra, Ben Slimane, Aïn Aouda et Ras el Fathia...

- un régime de transition, avec un maximum pluviométrique principal en décembre-février et la présence d'un maximum secondaire bien accusé en avril. Il correspond aux stations situées dans la partie médiane de notre secteur : El Khatouat, Moulay bou Azza, Tedders, Oued Zem , Ouljet Haboub, Sidi Jabeur...

- un régime plus continentalisé, caractérisé par l'augmentation progressive des précipitations depuis septembre jusqu'au maximum d'avril et

Fig. II-12 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES

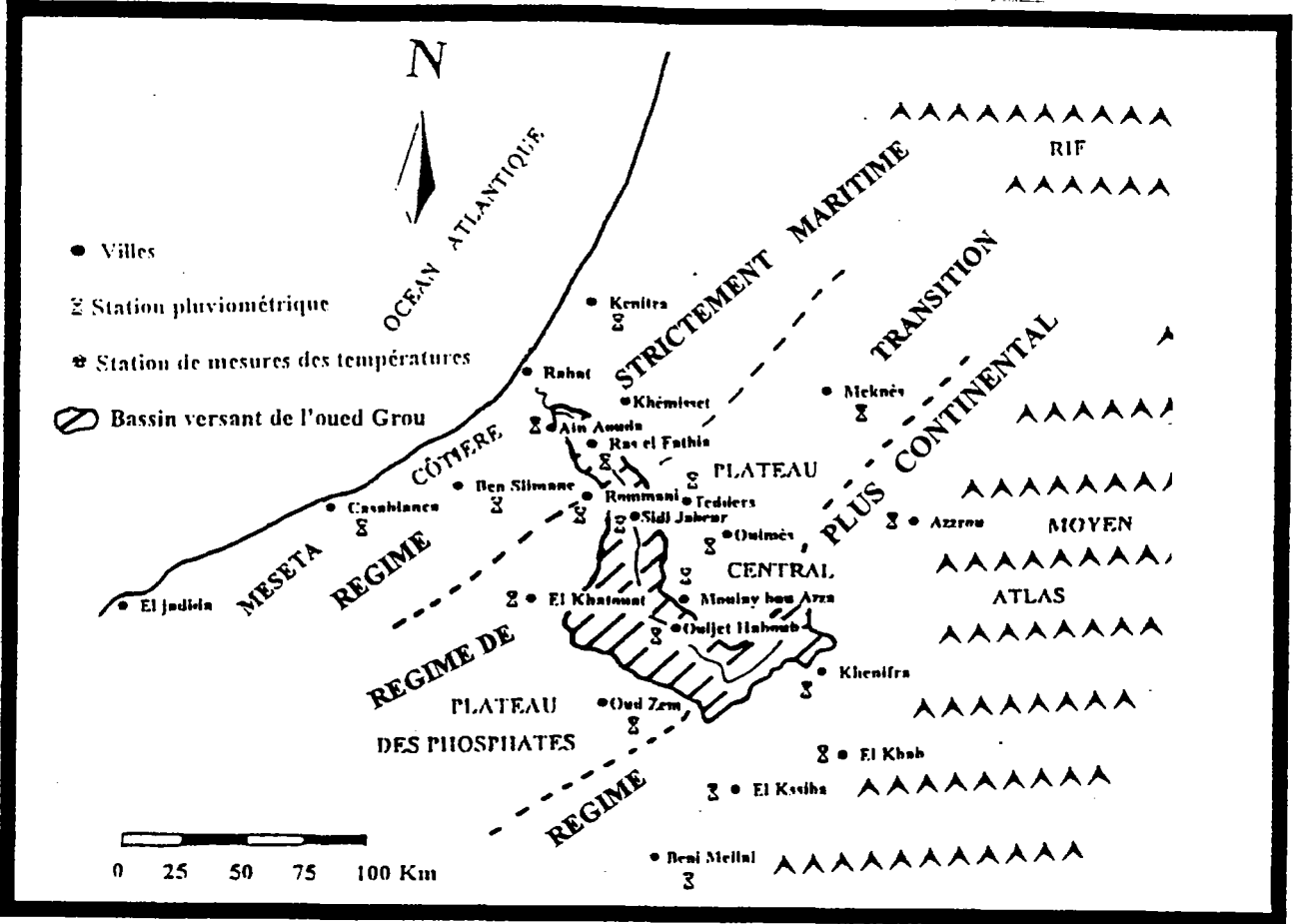
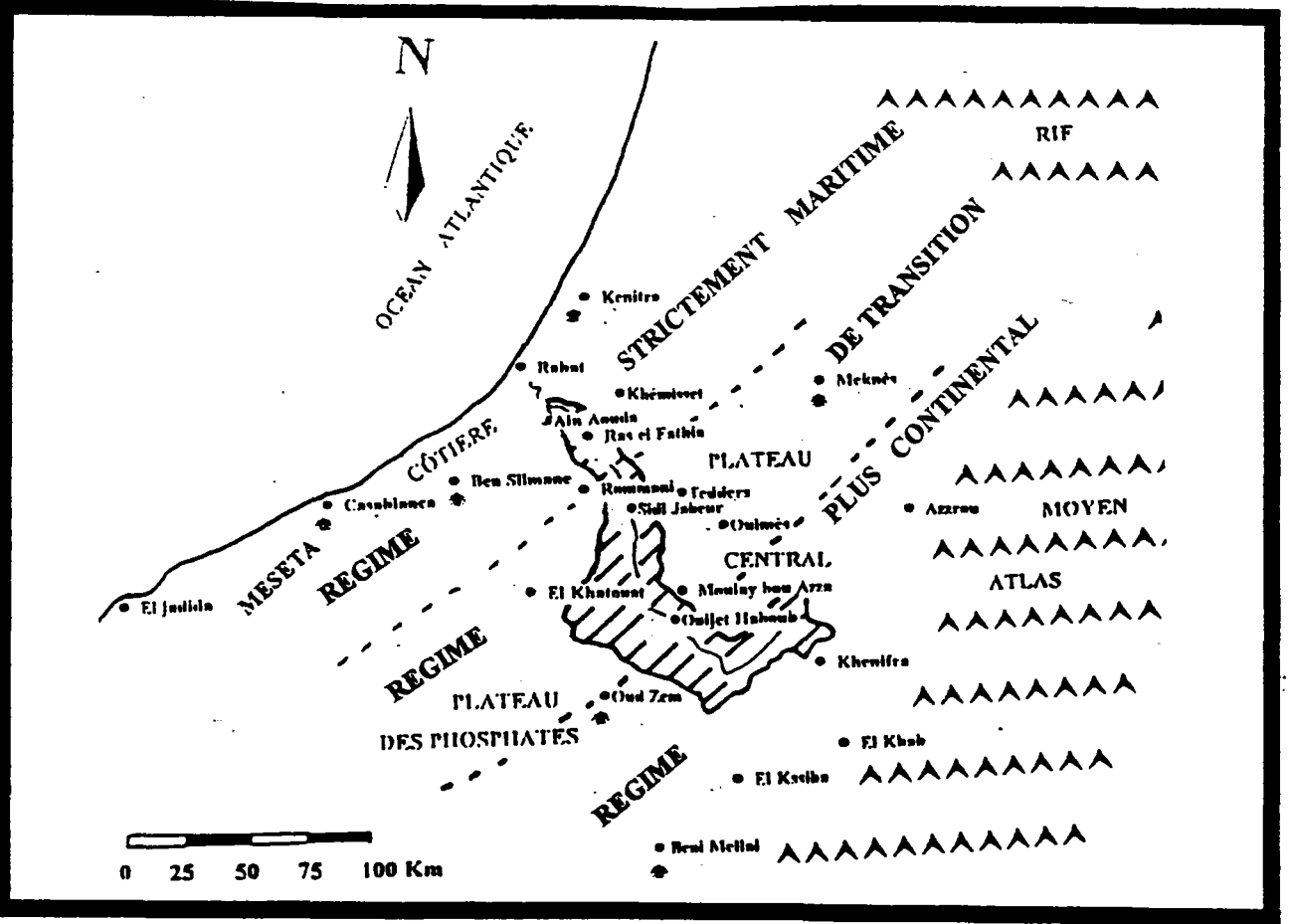


Fig. II-13 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : LES REGIMES THERMIQUES



par des précipitations estivales non négligeables. Ce régime s'identifie aux stations situées plus à l'intérieur de la région : El Kbab, Khenifra et Beni Mellal... L'accroissement des précipitations estivales par rapport au régime de "transition" s'explique par la proximité du Moyen Atlas et la fréquence des orages sur le relief.

- Le régime thermique

En raison de l'absence de postes de mesure de la température sur notre bassin versant, nous avons utilisé six stations situées sur les bordures nord, nord-ouest, sud-ouest, sud et sud-est du secteur étudié (Cf. Fig. II-1 et Fig. II-13). Le choix de ces stations permet d'étudier la variation régionale de la température dans l'espace et dans le temps.

Le régime thermique du secteur connaît, toutefois, des nuances régionales qui peuvent être déterminées par les valeurs des températures moyennes mensuelles et l'amplitude thermique moyenne annuelle.

Les saisons thermiques sont bien tranchées (Cf. Fig. II-14 à II-16 et annexe II-4), la saison froide s'étend de novembre à avril alors que la saison chaude va de mai à octobre. Le minimum des températures est atteint en janvier pour l'ensemble des stations. L'influence maritime retarde la montée des températures, reportant le mois le plus chaud en août pour les stations littorales, Casablanca et Kenitra, ainsi qu'aux stations de Ben Slimane et Meknès, soumises aux flux maritimes pénétrant profondément sur le continent. Aux stations intérieures, Oued Zem et Beni Mellal, la chaleur continentale culmine au mois de juillet.

Dans nos régions, l'écart de température entre l'hiver et l'été est un élément capital du climat, qui varie localement. On peut l'exprimer globalement par l'amplitude thermique moyenne annuelle qui est la différence entre la température moyenne du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid. Elle fait ressortir l'opposition entre les différentes stations et permet de caractériser le degré de continentalité car elle s'accroît avec l'éloignement de l'océan, les stations littorales ont des amplitudes annuelles bien inférieures à celles situées au coeur du continent (Cf. tableau II-4).

Deux nuances se distinguent nettement (Cf. Fig. II-13) :

- un domaine maritime qui s'étend au long de la bande littorale entre Kenitra et Casablanca. Les températures moyennes du mois le plus froid

Courbes ombrothermiques des stations (1972-73/85-86)

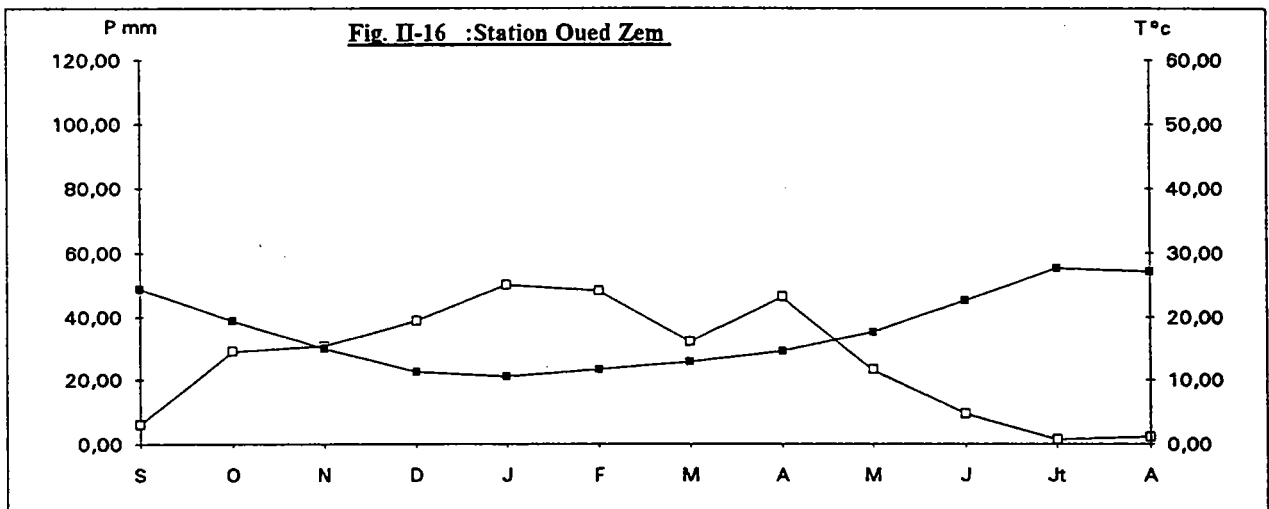
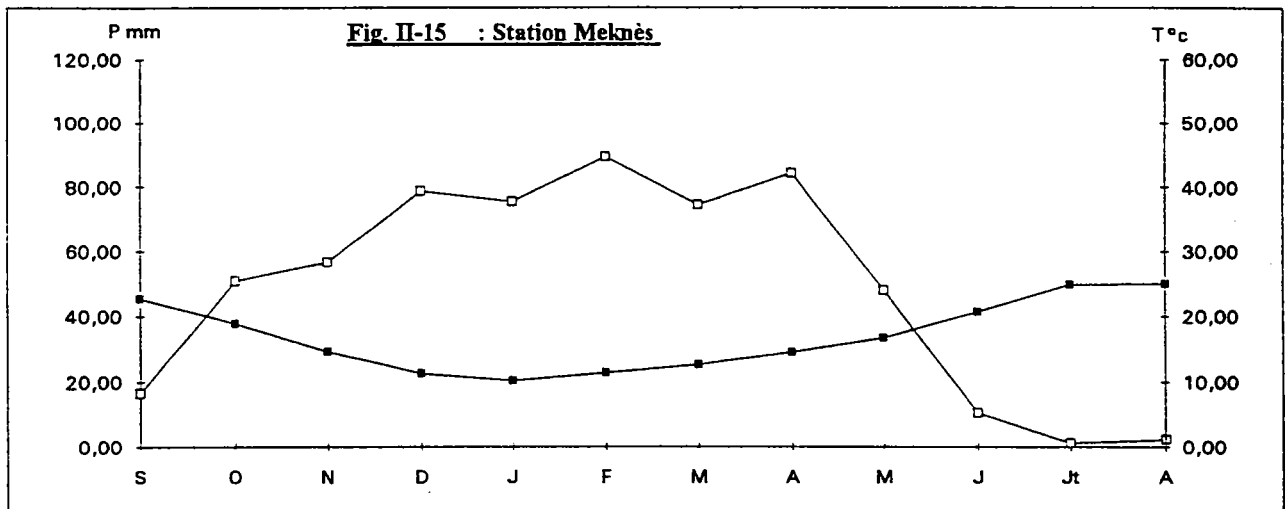
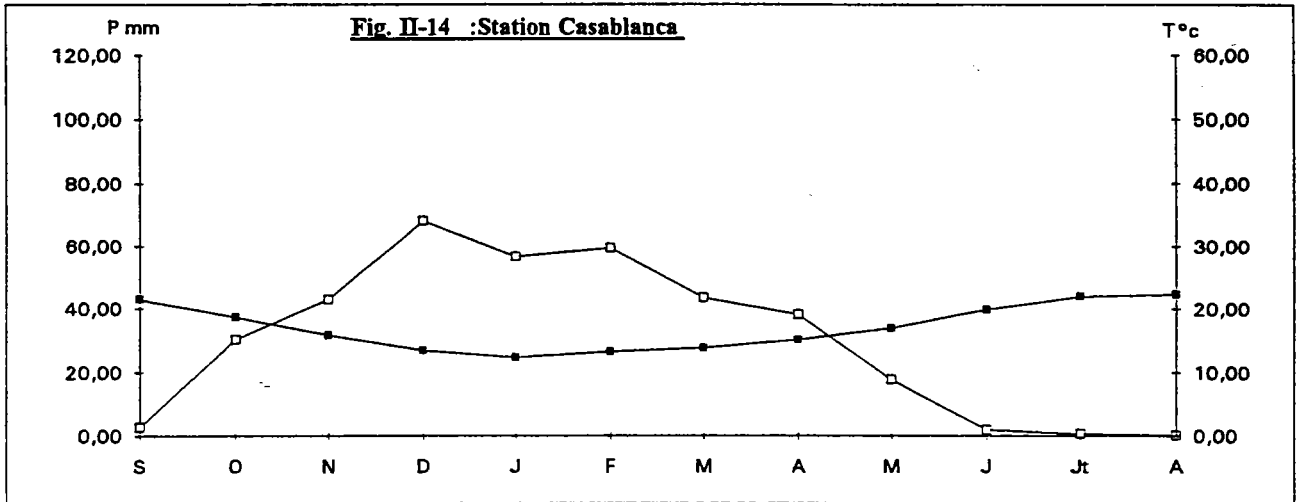


Tableau II-4 : Les températures moyennes mensuelles et les amplitudes thermiques moyennes annuelles aux stations 1972-73/85-86

Stations		Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Août.	année	Amplitude	Mois
Casablanca	Moy. Extrême Max	27.1	25.5	23.9	19.9	18.3	19.5	20.6	21.8	22	24.6	27.4	28.1	23.2	22.5	août
	Moy. Extrême min	15.7	10.7	8.7	5.3	5.1	7.0	7.8	9.1	12.4	14.6	17.3	16.9	10.9	11.7	janvier
	Moyenne	21.4	18.1	16.3	12.6	11.7	13.3	14.2	15.5	17.2	19.6	22.4	22.5	17.1	10.8	
Kenitra	Moy. Extrême Max	29.8	27.4	26.2	19.7	18.7	19.9	21.8	24.5	23.9	27.5	29.8	30.4	25.0	23.6	août
	Moy. Extrême min	15.5	11.2	8.2	4.4	4.5	6.4	7.1	9.1	12	14.5	16.9	16.8	10.6	11.6	janvier
	Moyenne	22.7	19.3	17.2	12.1	11.6	13.2	14.5	16.8	18.0	21.0	23.4	23.6	17.8	12.0	
Ben Slimane	Moy. Extrême Max	32.6	31.3	28.2	20.5	19.4	19.4	24.3	25.3	26.9	29.2	32.5	34.2	27.0	22.9	août
	Moy. Extrême min	11.3	6.5	4.2	3.1	2.3	3.9	2.6	5.7	5.1	9.4	12.8	11.6	6.5	10.9	janvier
	Moyenne	22.0	18.9	16.2	11.8	10.9	11.7	13.5	15.5	16.0	19.3	22.7	22.9	16.8	12.1	
Melunès	Moy. Extrême Max	32.8	28.6	24.9	18.8	17.8	19.6	22.3	23.5	25.5	31.1	35.8	35.2	26.3	25.2	août
	Moy. Extrême min	14.2	10.2	6.7	3.9	2.5	4.7	5.4	6.9	9.8	12.5	14.6	14.9	8.9	10.2	janvier
	Moyenne	23.5	19.4	15.8	11.4	10.2	12.2	13.9	15.2	17.7	21.8	25.2	25.1	17.6	15.1	
Oued Zem	Moy. Extrême Max	39.5	30.8	28.1	20.9	20.9	20.7	25.3	27.1	32.5	34.3	42.0	40.4	30.2	27.4	juillet
	Moy. Extrême min	11	8.9	5.5	1.5	1.2	2.7	2.7	4.0	6.4	10.3	10.9	14.3	6.6	11.1	janvier
	Moyenne	25.3	19.9	16.8	11.2	11.1	11.7	14.0	15.6	19.5	22.3	26.5	27.4	18.4	16.3	
Beri Mellal	Moy. Extrême Max	35.4	31.0	26.8	20.1	20.5	20.8	25.8	27.1	28.8	34.2	41.6	39.1	29.3	28.5	juillet
	Moy. Extrême min	13.9	8.4	4.6	1.0	1.0	2.3	4.6	4.7	9.6	13.0	15.3	15.7	7.8	10.6	décembre
	Moyenne	24.7	19.7	15.7	10.6	10.8	11.6	15.2	15.9	19.2	23.6	28.5	27.4	18.6	17.9	

(janvier) sont de l'ordre de 12 °c dans les deux stations et celles du mois le plus chaud (août) sont comprises entre 22 et 23 °c, soit une amplitude thermique moyenne de l'ordre de 10 °c à Casablanca et de 11 °c pour Kenitra. On peut y intégrer la station de Ben Slimane qui est à 25 km environ de la mer. Elle voit déjà se renforcer les caractères continaux (amplitude thermique moyenne de 11.8 °c);

- un domaine plus continental illustré par les stations d'Oued Zem et Beni Mellal. L'éloignement de l'océan, l'altitude et la position topographique se conjuguent dans cette région pour donner des écarts thermiques importants. Les températures moyennes du mois le plus chaud sont de l'ordre de 27-28 °c en juillet (27,3 °c à Beni Mellal et 27,9 °c à Oued Zem), celles du mois le plus froid sont de l'ordre de 10 °c en janvier (10 °c à Beni Mellal et 10,3 °c à Oued Zem); soit une amplitude thermique moyenne de l'ordre de 17-18 °c.

Entre ces deux domaines, la station de Meknès représente un domaine de transition. Les températures moyennes mensuelles sont comprises entre 10,2 °c pour le mois le plus froid (janvier) et 25 °c pour le mois le plus chaud (août). L'amplitude moyenne annuelle est intermédiaire entre les deux domaines déjà cités : 14.8 °c.

On constate que les analyses sur les régimes thermiques et pluviométriques parviennent aux mêmes distinctions entre régimes littoral, de transition et continental, avec une nuance à la station d'Oued Zem : sa continentalité est plus affinée par les températures que par les précipitations, vraisemblablement parce que c'est la station la plus élevée en altitude avec 759 m (voir plus loin le gradient thermique III-A-2).

3 - La définition du climat de la région

Le climat du secteur résulte de la situation du Maroc aux marges méridionales du climat méditerranéen et en façade nord-ouest du continent africain dans la zone subtropicale. Dans le temps, il apparaît au cours de l'année deux périodes : l'une bien marquée par une nette coïncidence entre des précipitations insignifiantes ou même nulles et une forte chaleur ; l'autre, humide et tempérée, donne au contraire des précipitations assez régulièrement réparties au cours de cette période et des températures plus clémentes. Pour caractériser ce climat, nous avons réalisé des représentations graphiques et calculé des indices climatiques.

a - La représentation graphique : diagrammes ombrothermiques et climogrammes

Pour établir les diagrammes ombrothermiques (Cf. Fig. II-14 à II-16 et annexe II-4), nous avons utilisé la définition du mois sec établie par F. Bagnouls et H. Gaussen (1952) : "un mois sec est celui où le total mensuel des précipitations exprimé en millimètres est égale ou inférieur au double de la température moyenne mensuelle exprimée en degrés celsius : $P \text{ (mm)} \leq 2T \text{ }^{\circ}\text{C}$ ". L'application de cette définition nous permet de mettre en évidence la durée de la saison sèche. Pour toutes les stations, les mois secs sont consécutifs, ils vont selon les cas, de mai ou juin à septembre ou octobre. La sécheresse du mois de mai s'explique par le fait que les températures ne sont pas encore très élevées mais les précipitations sont déjà faibles. Inversement pour le mois d'octobre, les précipitations sont déjà fortes mais les températures restent encore élevées.

L'établissement des climogrammes à partir des moyennes mensuelles des températures et des précipitations (Fig. II-17 à II-19 et annexe II-5) nous permet, par leur forme, de compléter l'analyse précédente. En effet, selon ces graphiques, 6 à 8 mois sont considérés comme "tempérés et humides" et 4 à 6 mois sont "arides". Comme nous l'avons vu précédemment, ce sont les mois d'octobre et mai qui sont à l'origine de cette différence de la répartition temporelle aux stations étudiées. Le mois d'octobre est considéré comme "tempéré" pour les stations de Kenitra et Meknès, se situe à la limite entre le domaine tempéré et aride pour Casablanca et Ben Slimane, tandis qu'il est annexé dans le domaine aride pour les stations intérieures d'Oued Zem et Beni Mellal. Le mois de mai s'installe dans le domaine aride pour toutes les stations sauf la station de Meknès où il est dans le domaine tempéré.

b - Les indices climatiques

Pour affiner l'analyse de l'aridité du climat montrée par les représentations graphiques, nous avons calculé un certain nombre d'indices climatiques. Mais notons que certains indices calculés ne mesurent pas directement l'aridité puisque les précipitations n'interviennent pas.

Climogrammes des stations : (1972-73/85-86)

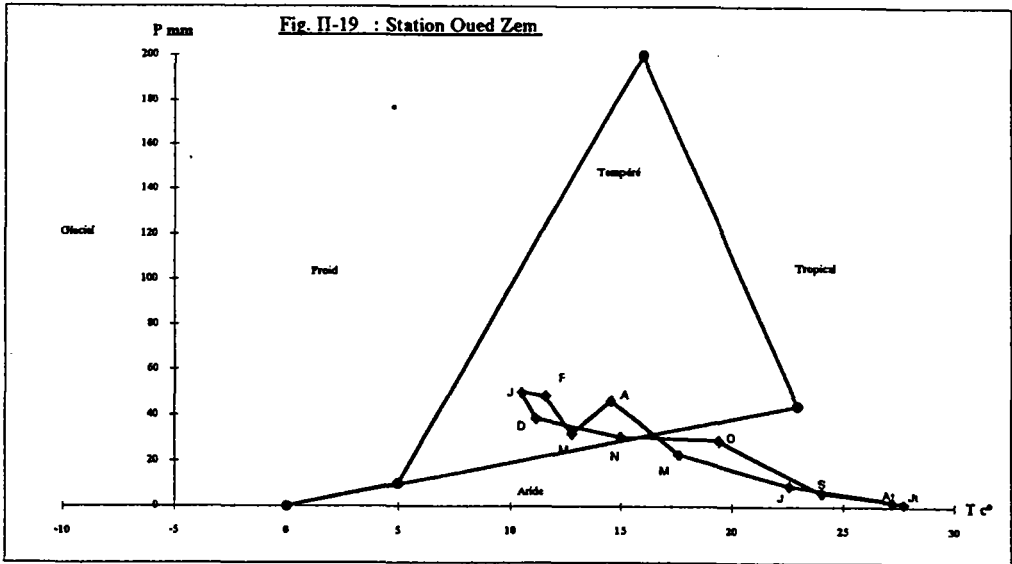
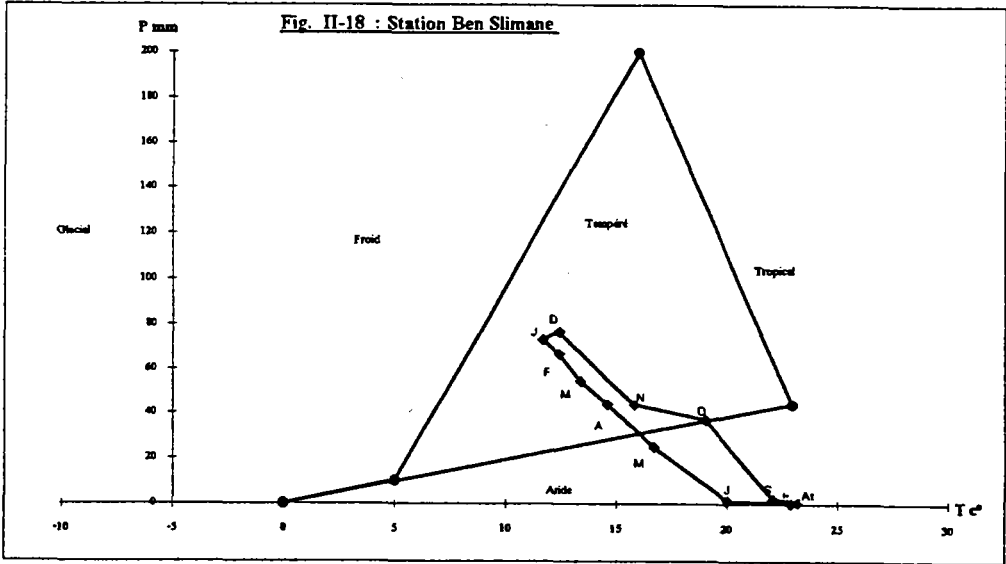
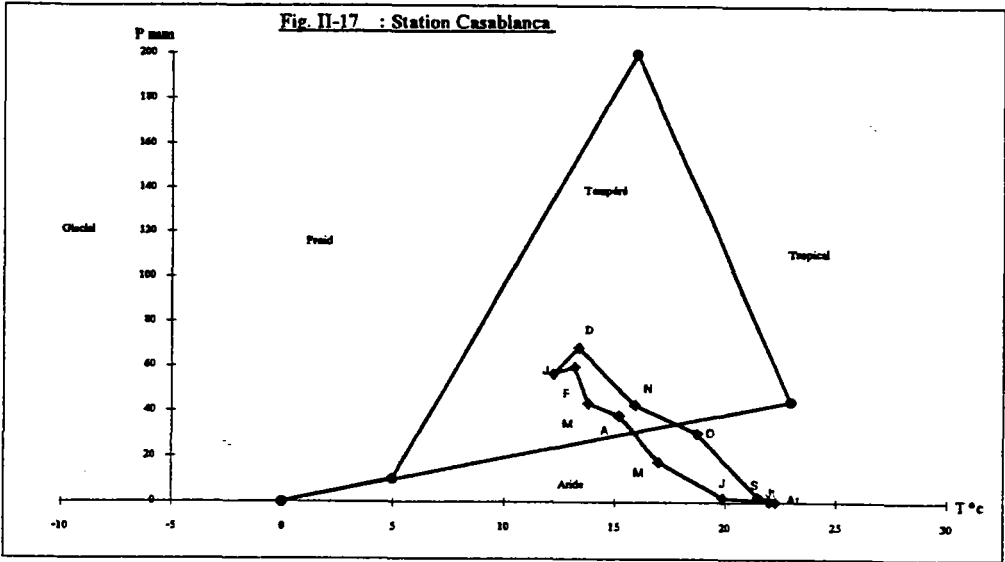


Tableau II-5 : Les indices climatiques

Stations	P min (mm)	(Qpt) année	(I) Koppen	(I) DeMartonne	(A) DeMartonne	(Ig) Gausson	(S) Emberger	(K) Conrad	(Ti) Kerner
Casablanca	0.28	69	15.1	13.4	6.7	99	0.08	11	35
Kenitra	0.08	88	21.9	19.5	9.8	96	0.13	13	29
Ben Slimane	0.31	60	17.8	15.8	7.9	102	0.10	14	38
Meknès	1.2	74	24.6	21.8	11.2	90	0.26	22	30
Oued Zem	1.4	33	18.0	11.4	5.9	148	0.13	30	27
Beni Mellal	3.4	39	15.4	13.8	7.4	68	0.18	30	21

- Indice de continentalité thermique (Conrad, 1946)

L'indice de continentalité thermique de Conrad (1946) intègre le fait que l'amplitude thermique moyenne augmente avec la distance de la mer. La continentalité thermique (K) dans cet indice est exprimée en pourcentage et elle varie de 0 à 100 %. La formule est présentée dans la forme suivante :

$$K = \frac{1.7 \times A}{\sin(\varphi + 10)} - 14$$

où A = l'amplitude moyenne annuelle de la température

φ = la latitude en degré.

Les valeurs de K signifient donc la continentalité relative des stations. Plus elles sont élevées, plus forte est la continentalité thermique. Près de la mer, les valeurs sont insignifiantes.

Les valeurs calculées de K pour l'ensemble des stations étudiées varient entre 11 à Casablanca et 30 à Oued Zem et Beni Mellal (Cf. tableau II-5).

Selon ses résultats, on constate que la tendance à la continentalité thermique est très faible à la station de Ben Slimane située à 25 km environ de la l'océan ($K = 14$) et reste proche de celle des stations littorales (Kenitra, $K = 13$). Elle est un peu plus importante à la station de Meknès ($K = 22$) et devient sensible aux stations d'Oued Zem et de Beni Mellal ($K = 30$).

Signalons que l'indice de Conrad confirme les analyses des régimes pluviométriques et thermiques précédentes.

- Indice thermoïsothermique de Kerner

Aux latitudes tempérées, le mois d'octobre est plus chaud que le mois d'avril dans les stations maritimes alors qu'on observe l'inverse dans les stations continentales. En outre, l'amplitude thermique annuelle est relativement faible dans les stations maritimes. En vue d'exprimer ces faits, Kerner a proposé un indice thermoïsothermique selon la formule suivante :

$$Ti = \left(\frac{To - Ta}{A} \right) \times 100$$

où To = la température moyenne mensuelle du mois d'octobre

Ta = la température moyenne mensuelle du mois d'avril

et A = l'amplitude moyenne annuelle de la température.

C'est en effet, un indice d'océanité. Si les valeurs obtenues sont positives, les stations concernées ont un régime thermique de type océanique ou sub-océanique. Si les valeurs sont négatives, le régime est dit "continental".

D'après les valeurs calculées de cet indice (Cf. tableau II-5), on constate qu'elles sont positives pour l'ensemble des stations étudiées. Ceci nous permet de les classer en régime océanique ou sub-océanique.

- Indice d'aridité de De Martonne

De Martonne mesurait l'aridité par les indices (I) en 1924 et (A) en 1942, calculés selon les formules suivantes :

$$I = \frac{P}{(T+10)} \quad \text{et} \quad A = \frac{\left(\frac{P}{T+10} \right) + \left(\frac{P \text{ mois plus sec}}{T \text{ mois plus sec}} \right)}{2}$$

avec P : précipitations moyennes annuelles mm,

et T : températures moyennes annuelles en °C.

Pour l'ensemble de la région, les stations situées plus vers le nord (Kenitra et Meknès) marquent les valeurs les plus élevées tandis que celle

d'Oued Zem marque le minimum pour l'ensemble du secteur (Cf. tableau II-5).

Selon la classification de cet auteur, les stations de Kenitra et Meknès sont annexées au domaine des savanes et prairies. Les autres stations sont classées dans le domaine des steppes.

- Indice d'aridité de Köppen

D'autre part, Köppen caractérise l'aridité des stations selon la formule suivante :

$$Ik = \frac{P}{T+x}$$

où P = précipitations moyennes annuelles mm,

T = températures moyennes annuelles en °c,

Avec $\frac{P}{T+x} < 10$ (désert) ; $10 < \frac{P}{T+x} < 20$ (semi-aride "steppe")

(x = 0) saison sèche en été, (x = 7) pas de saison sèche et (x = 14) saison sèche en hiver.

Les stations de Meknès et Kenitra ont les valeurs de Ik > 20 et plus d'un mois où la température moyenne mensuelle est supérieure à 22 °c (juillet, août et septembre). Le climat de ces deux stations est de type Csa : méditerranéen avec sécheresse d'été. Les autres stations (Casablanca, Ben Slimane, Oued Zem et Beni Mellal) sont de type Bss_k : semi aride ou steppes avec sécheresse d'été et température moyenne annuelle < 18 °c, soit une dégradation du climat méditerranéen vers l'aride.

- Quotient pluviothermique d'Emberger (Qpt) et son indice de sécheresse saisonnière (S)

Le quotient pluviothermique d'Emberger (Qpt) et son indice de sécheresse saisonnière (S) permettent de caractériser la sécheresse dans nos régions, en s'appuyant sur les deux éléments majeurs du climat : les précipitations et les températures.

$$Q_{pt} = \left(\frac{P}{\left(\frac{(M+m)}{2} \right) (M-m)} \right) * 1000 \quad \text{et} \quad S = \frac{Pe}{M}$$

avec : P = précipitations moyennes en (mm)

Pe = précipitation de la saison sèche en (mm),

M = température maximale moyenne du mois le plus chaud,

m = température minimale moyenne du mois le plus froid,

- les températures sont en degrés absolus (Kelvin) = (T °c + 273.15).

Les valeurs de S sont très faibles car la saison chaude et sèche se caractérise par un grand contraste entre les précipitations et les températures. La carence des précipitations se conjugue avec de fortes chaleurs pour donner à la région une aridité périodique intense.

Ainsi, la représentation graphique du quotient pluviométrique et des minimums de température (m), établie par Ch. Sauvage, a permis à L. Emberger de définir les surfaces bioclimatiques et les sous-étages bioclimatiques. Les classifications d'Emberger et Sauvage ont été conçues pour l'ensemble de la zone méditerranéenne, et notamment pour le Maroc où elles ont été mises au point. Les stations de l'étude ont été reportées sur le graphique (Cf. Fig. II-20) qui représente cette classification.

Nous verrons ci-après que la comparaison du quotient pluviométrique (Qpt) avec l'indice de Gaussen (Ig) permet d'affiner les nuances d'aridité dans le secteur.

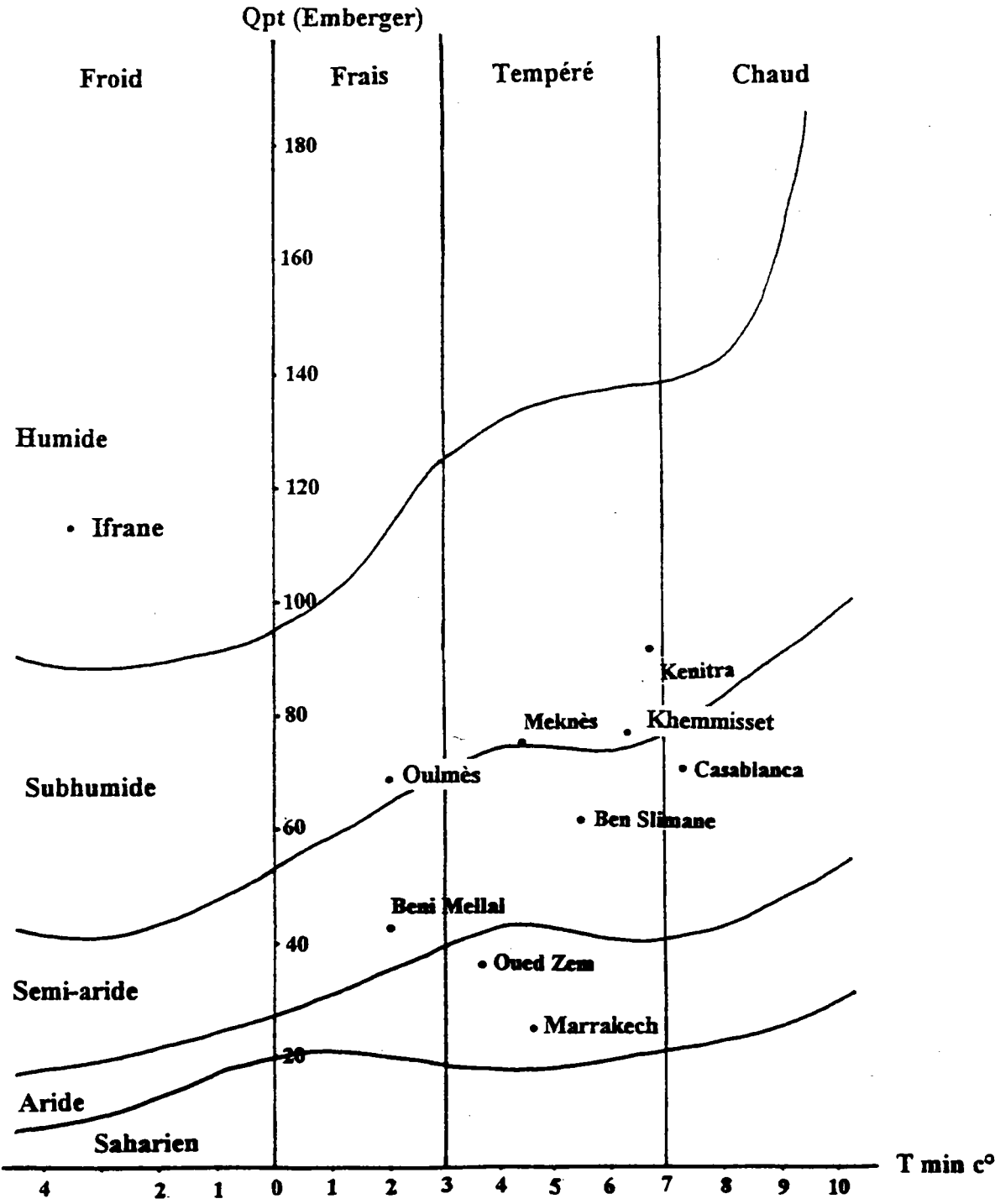
- Indice xérothermique de Gaussen

« Les jours sans pluie ne sont pas nécessairement des jours "biologiquement secs" » F. Bagnouls et H. Gaussen (B.A.G.F 1952).

Sur le littoral marocain, il existe de fortes condensations nocturnes qui mettent à la disposition des végétaux une appréciable quantité d'eau. C'est pourquoi, nous avons utilisé l'indice xérothermique de Gaussen (Ig), calculé pour les stations étudiées dans le cadre de la partie occidentale du bassin méditerranéen (Cf. tableau II-5).

Fig. II-20 : Climagramme Pluviothermique du coefficient d'Emberger

(d'après L. Emberger et Sauvage)



La confrontation des résultats obtenus par ces auteurs avec la carte du couvert végétal réalisée pour le bassin versant de l'oued Grou (Cf. annexe I-11) donne les résultats du tableau suivant :

Tableau II-6 : La limite des espèces végétales existant dans le bassin versant de l'oued Grou selon la valeur de Ig

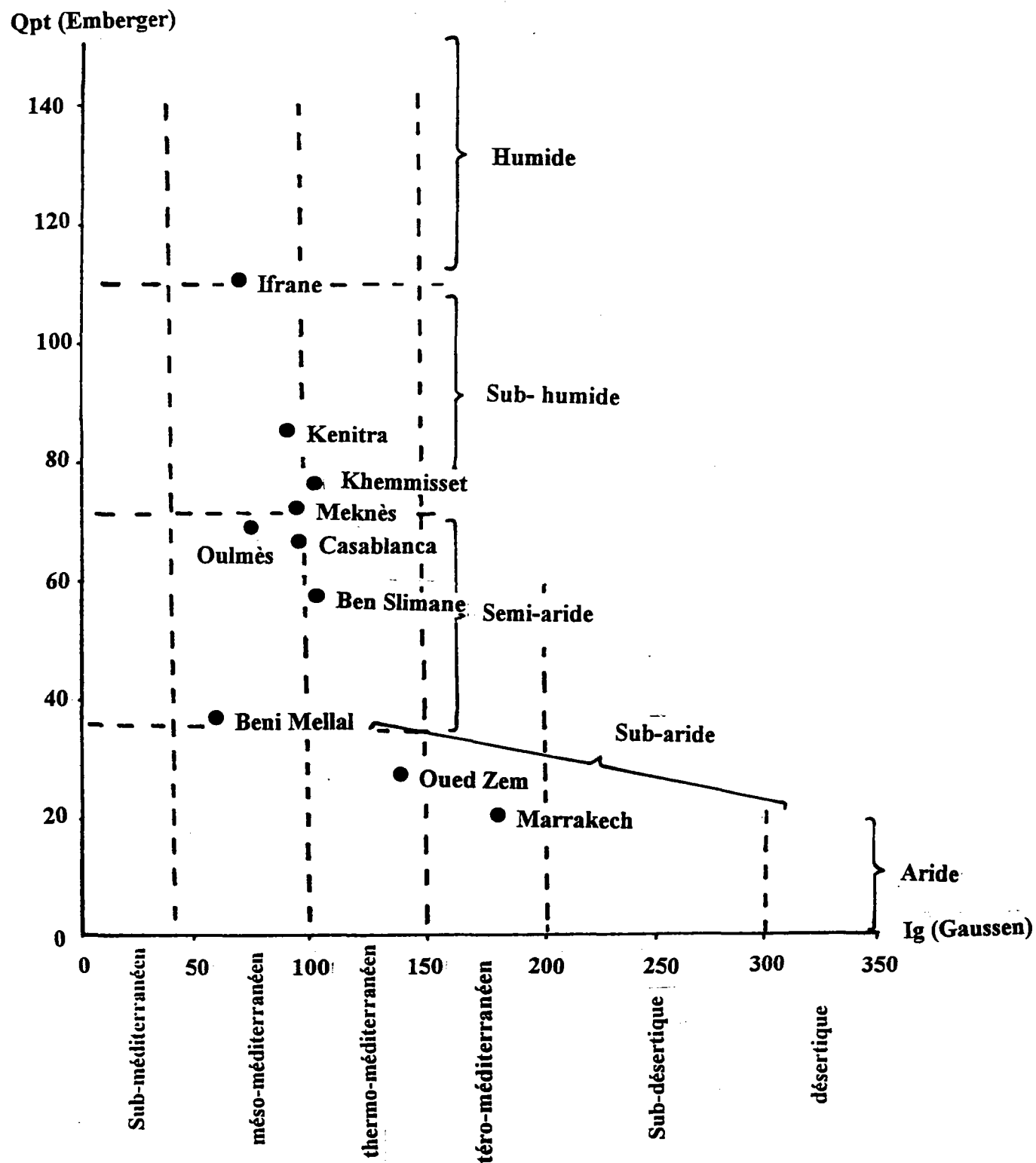
Espèce	Sa limite selon (Ig)
Chêne-vert	0 à 100
Chêne-liège	30 à 110
Oleo-Lentisque	0 à 170
Thuya	80 à 180
Genévrier	100 à 250
Jujubier	100 à 250
Betoum	100 à (+300)

La représentation graphique des stations, avec en ordonnées les valeurs du quotient pluviothermique d'Emberger (Qpt) et en abscisses les valeurs de (Ig) de Gaussen (Cf. Fig. II-21), a montré que les stations de Kenitra et Meknès sont annexées à la zone sub-humide méso-méditerranéenne. Celle de Casablanca et Ben Slimane sont situées à la limite entre les zones semi-arides méso-méditerranéenne et thermo-méditerranéenne. La station de Beni Mellal est située à la limite de la zone semi-aride et la zone sub-aride méso-méditerranéenne. Quant à la station d'Oued Zem, elle est annexée à la zone sub-aride thermo-méditerranéenne.

En ce qui concerne le bassin versant de l'oued Grou, selon les résultats des stations situées sur le graphique II-21 et par l'intermédiaire du couvert végétal, on peut le situer entre 30 et 80 pour Qpt et 70 à 140 pour Ig. D'une façon générale, on peut conclure que le secteur étudié est classé dans le domaine semi-aride. La sécheresse est à peu près absolue durant la saison chaude pour l'ensemble des stations étudiées.

Fig. II-21 : Les limites climatiques

(d'après les indices d'Emberger et de Gaussen)



II - LES PRECIPITATIONS : VARIABILITE ET REPARTITION

L'étude des précipitations acquiert une grande importance dans notre région à forte évaporation : elles constituent l'élément indispensable à la vie végétale et animale; les cultures et les activités humaines sont étroitement liées à leur abondance et à leur répartition dans l'espace et au cours de l'année. Ce chapitre est consacré, d'une part, à l'analyse de la variabilité des données pluviométriques, pluviosité et nombre de jours de précipitations et , d'autre part, au problème de la quantification spatiale des précipitations.

A - L'ANALYSE DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE

Les données d'observations des stations figurant dans le tableau II-7 permettent de préciser les variations des quantités d'eau enregistrées dans les différentes parties de la région. Dans notre secteur, elles sont surtout fonction du relief et de la proximité de l'océan. D'autres conditions jouent également un rôle déterminant sur la quantité d'eau précipitée, comme par exemple, l'exposition du versant et l'ouverture des vallées aux courants perturbés d'ouest dominants.

1 - Les précipitations annuelles

Il y a deux aspects à la variabilité des précipitations annuelles et nous les aborderons tous deux plus loin :

- l'aspect statistique et fréquentiel;
- l'aspect temporel, pour déceler une éventuelle organisation de la succession dans le temps des années humides et sèches.

L'importance des variations interannuelles est soulignée dans le tableau II-7 par les valeurs du coefficient de variation qui traduit la dispersion relative des pluies autour de la moyenne.

$$CV = \frac{\text{Ecart type}}{\text{Moyenne}}$$

Cette variabilité interannuelle traduit la situation climatique régionale fluctuante, déterminée par des alternances irrégulières de types de temps anticycloniques et dépressionnaires d'une année à l'autre. Elle peut être aussi

Tableau II-7 Précipitations moyennes annuelles aux stations étudiées (1972-73/85-86)

Année	Ain Aouda	Ras el Fathia	Rommani	Sidi Jabeur	Tedders	El Khatouat	Ouljet Habeb	Moulay bou Azza	El Kasiba	Oued Zem	Khenifra	El Kbab	Oulmès
1972-73	397	361	323	207	295	384	349	351	397	317	507	627	679
1973-74	565	522	449	351	450	582	404	530	574	425	721	443	959
1974-75	309	352	269	261	278	409	319	508	385	291	467	713	512
1975-76	443	470	334	346	286	434	314	686	672	378	614	792	707
1976-77	565	641	408	479	366	528	355	717	1140	437	658	803	525
1977-78	527	381	451	314	425	628	377	924	980	445	666	580	630
1978-79	640	642	618	512	515	629	429	751	828	261	650	518	828
1979-80	515	463	422	348	382	286	353	729	993	354	604	519	631
1980-81	479	330	267	252	269	249	245	567	350	228	340	246	355
1981-82	697	368	261	300	424	236	274	746	471	350	529	547	597
1982-83	460	325	252	298	288	191	163	258	384	136	312	399	410
1983-84	694	390	339	334	424	273	263	391	513	290	383	444	528
1984-85	275	321	282	270	336	158	292	320	572	175	456	565	356
1985-86	516	428	289	256	388	447	404	491	867	349	569	503	709
Moyenne	506	428	354	323	366	389	324	569	652	317	534	550	602
Ecart type	127	108	104	85	76	167	73	196	264	94	129	152	172
C.variation	0.25	0.25	0.29	0.26	0.21	0.43	0.22	0.34	0.40	0.30	0.24	0.28	0.29

caractérisée par la pluviosité, ou rapport de l'année particulière au module moyen annuel; on peut encore considérer le rapport entre l'année la plus humide de la série et l'année la plus sèche.

L'année la plus humide varie selon les stations ; c'est 1978-79 pour la majorité des stations. Pour d'autres stations les années 1973-74, 1976-77, et 1977-78 ont été également marquées par une plus grande humidité. Le rapport à la moyenne varie de 1.3 pour Ouljet Haboub à 1.8 pour El Kssiba.

L'année de la plus faible pluviosité varie aussi ; 1980-81, 1982-83 ou 1984-85. Les valeurs révèlent des sécheresses sévères : le rapport à la moyenne est de 0.4 pour El Khatouat contre 0.8 à Ras el Fathia et Rommani.

Le maximum de variation est enregistré à la station El Khatouat (rapport entre les années extrêmes : 2.9; coefficient de variation 0.41) et le minimum à Tedders (1.9 et 0.21). On note que l'irrégularité est plus élevée en général pour les stations situées au sud et sud ouest du bassin (El Khatouat, Oued Zem et El Kssiba); les stations proches du littoral sont au contraire, les plus régulières.

a - L'étude fréquentielle des précipitations annuelles

Pour bien décrire cette variabilité interannuelle des précipitations et son caractère statistique, nous avons réalisé une étude fréquentielle afin de déterminer les précipitations caractéristiques pour les fréquences de dépassement 1/5, 1/10, tant vers l'humide que vers le sec.

Ceci suppose de rechercher, au préalable, la fonction de répartition s'ajustant le mieux à la distribution des précipitations annuelles. Pour ce faire, on procède à l'arrangement des valeurs pluviométriques par ordre décroissant en attribuant à chacune une fréquence dite expérimentale, en fonction de son rang selon la formule :

$$F = \left(\frac{r - 0.5}{N} \right)$$

r : rang.

N : effectif

Le test des lois d'ajustement symétriques : normale (Laplace-Gauss), racine-normale et Log-normale (Cf. Fig. II-22 à II-24 et annexe II-6) a montré

Fig. II-22

Station : Ain Aouda

Loi Normale

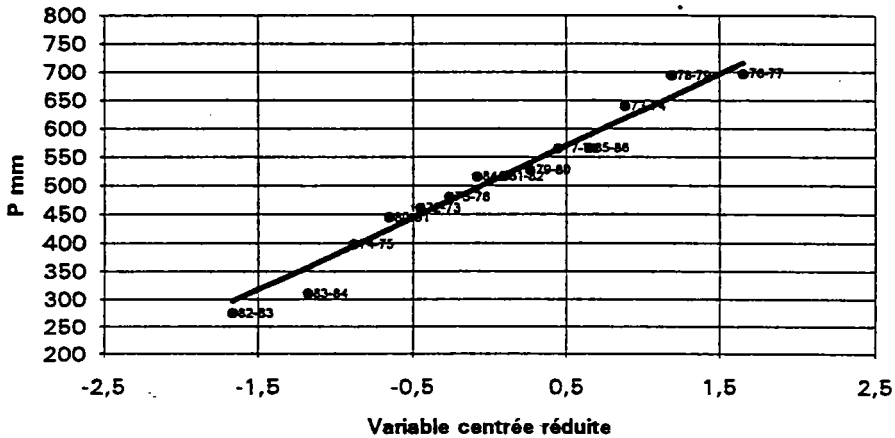


Fig. II-23

Station : Ain Aouda

Loi Racine Normale

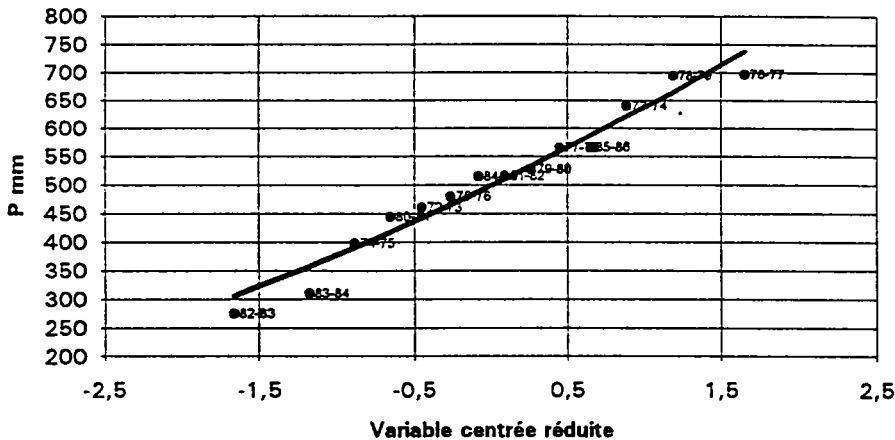
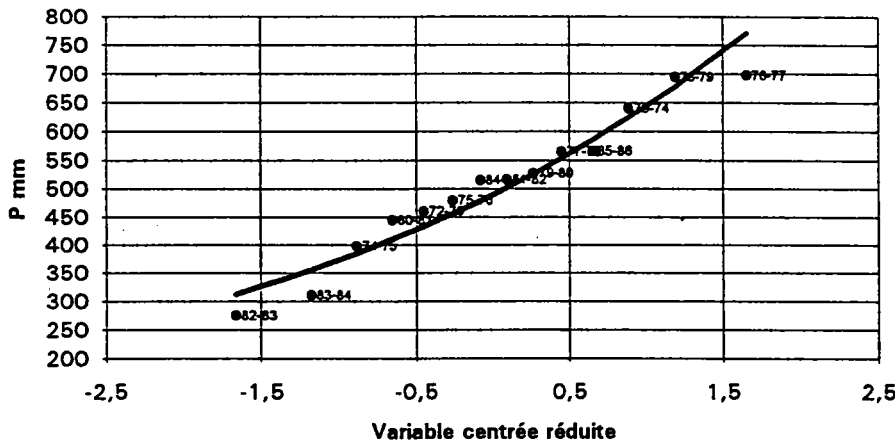


Fig. II-24

Station : Ain Aouda

Loi Ln Normale



que la loi Log-normale donne le meilleur ajustement pour l'ensemble des stations à l'échelle annuelle et saisonnière. Le choix de la loi s'appuie sur les valeurs du test d'adéquation de Kolmogrov-Smirnov (*D*) (Groupe Chadule, 1974) qui repose sur la mesure du plus grand écart entre les fréquences expérimentale et théorique) et sur l'écart type résiduel (C.E.G.U.M, 1995) (Cf. tableau II-8).

- Test d'adéquation de Kolmogrov-Smirnov :

$$D = |F - F'| \text{ maximum}$$

F = fréquence expérimentale cumulée

F' = fréquence théorique cumulée

- Ecart type résiduel = $\sqrt{\frac{(P - P_F)^2}{N}}$

P = Précipitation observée (mm)

P_F = Précipitation fréquentielle (mm)

N = effectif

- Variable centrée réduite de Laplace-Gauss

$$U = \frac{X - M}{\sigma}$$

X : Variable

σ : Paramètre d'échelle

et *M* : Moyenne.

Tableau II-9 : Valeurs de la variable centrée réduite de Gauss

	Années Sèches		Médiane	Années Humides	
Fréquence	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9
Valeur de (u)	-1.28	-0.84	0	0.84	1.28

Tableau II-8 : Les précipitations annuelles caractéristiques selon la loi Log- normale, (1972-73/85-86)

Stations	Moyenne	Xo	D*	Mode	Ecart type résiduel	Fréquences					Année la plus humide				Année la plus sèche			
						F 0,1	F 0,2	Médiane	F 0,8	F 0,9	P (mm)	année	Fréquences	Durée de retour	P (mm)	année	Fréquences	Durée de retour
Ain Aouda	506	490	0.11	454	31.6	345	389	490	616	695	697	81- 82	0.900	10	275	84 - 85	0.017	69
El Kbab	550	528	0.11	454	36.5	358	409	528	683	780	803	76 - 77	0.915	12	246	80 - 81	0.006	167
El Khatouat	388	355	0.10	291	43.6	200	244	355	519	631	629	78 - 79	0.940	17	158	84 - 85	0.087	11
El Ksiba	652	605	0.11	514	56.9	381	431	605	848	1012	1140	76 - 77	0.898	10	350	80 - 81	0.036	28
Khenifra	534	518	0.12	484	36.4	371	415	518	647	725	721	73 - 74	0.896	10	312	82 - 83	0.018	38
Moulay bou Azza	569	535	0.14	464	51.2	330	389	535	735	868	921	77 - 78	0.926	14	258	82 - 83	0.026	38
Oueljet Haboub	324	316	0.12	296	22.7	228	254	316	391	437	429	78 - 79	0.885	9	163	82 - 83	0.005	200
Oued Zem	317	301	0.13	267	32.4	193	225	301	403	470	445	77 - 78	0.869	8	136	82 - 83	0.011	91
Oulmès	602	579	0.083	530.3	27.2	396.5	451.3	579	741.9	844.3	959	73 - 74	0.950	20	355	84 - 85	0.043	23
Ras el Fathia	428	417	0.15	394	31.7	309	342	417	508	562	642	78 - 79	0.968	31	321	84 - 85	0.132	8
Rommani	355	342	0.13	319	29.9	243	273	342	429	482	618	78 - 79	0.986	71	252	82 - 83	0.126	8
Sidi Jabeur	323	314	0.14	296	23.5	230	256	314	386	430	512	78 - 79	0.977	43	207	72 - 73	0.044	23
Tedders	366	359	0.15	344	16.5	275	301	359	428	469	515	78 - 79	0.958	24	269	80 - 81	0.083	12

D* valeur du test de Kolmogorov-Smirnov

Les précipitations annuelles caractéristiques, estimées pour les différentes stations et pour les probabilités de retour retenues, sont reportées dans le tableau II-8.

Les valeurs du rapport entre les précipitations caractéristiques des fréquences décennales sèche et humide ($F_{0.9}/F_{0.1}$) sont comprises entre 3.1 à El Khatouat et 1.7 à Tedders; elles sont finalement très proches des valeurs du rapport entre les extrêmes observés.

Vers l'humide, les précipitations caractéristiques de la fréquence quinquennale sont dépassées au moins 2 fois pour toutes les stations. Les précipitations de fréquence décennales sont dépassées au moins une fois pour toutes les stations sauf El Khatouat, Ouljet Haboub, Oued Zem et Khenifra. Les durées de retour théoriques les plus élevées concernent des stations concentrées à l'aval du bassin pour l'année 1978-79 (24 ans et plus).

Vers le sec, les précipitations estimées pour la fréquence quinquennale sont dépassées au moins 2 fois pour l'ensemble des stations. Pour la fréquence décennale, elles sont dépassées au moins une fois pour toutes les stations sauf Ras el Fathia et Rommani. Les durées de retour les plus élevées concernent les stations des parties amont et médiane du bassin pour l'année 1982-83 (38 ans et plus).

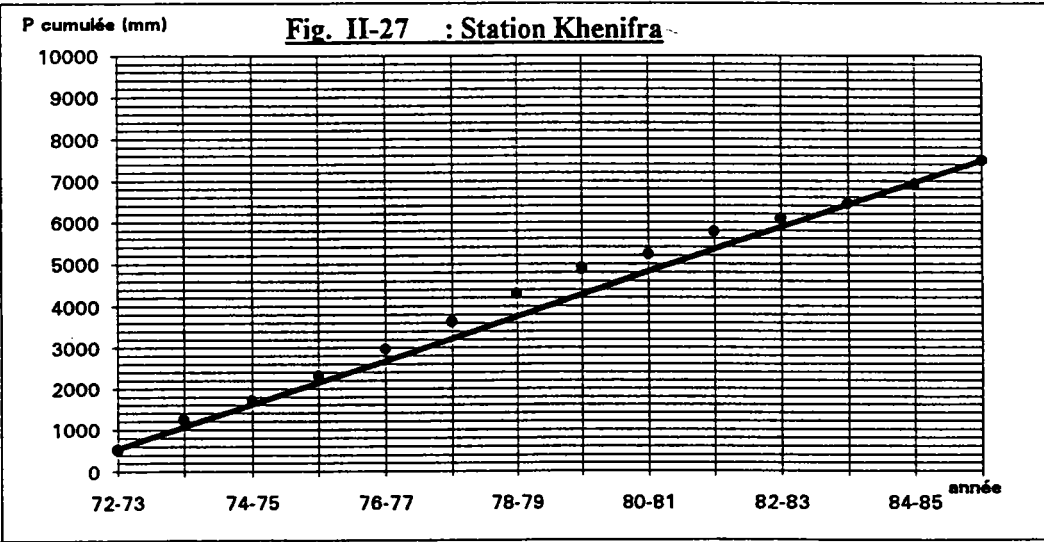
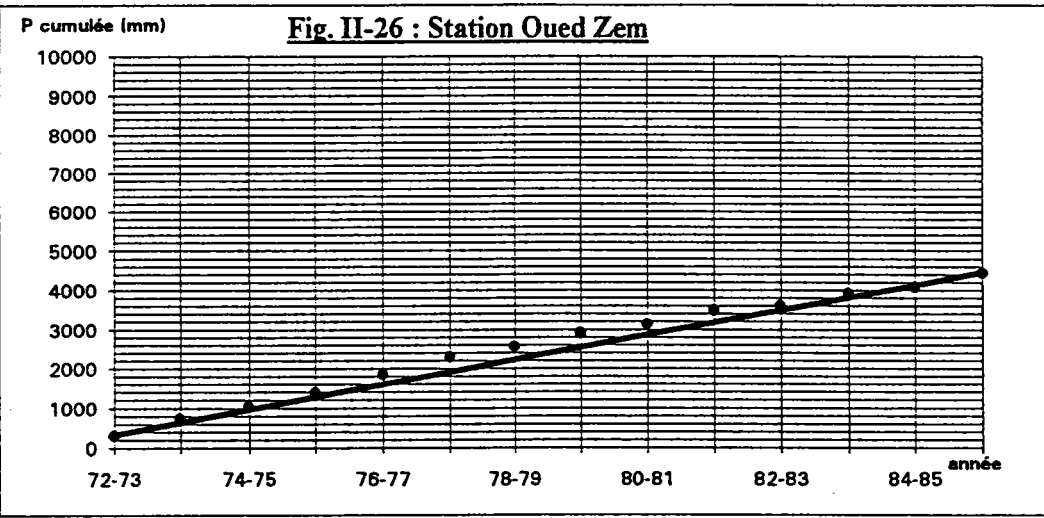
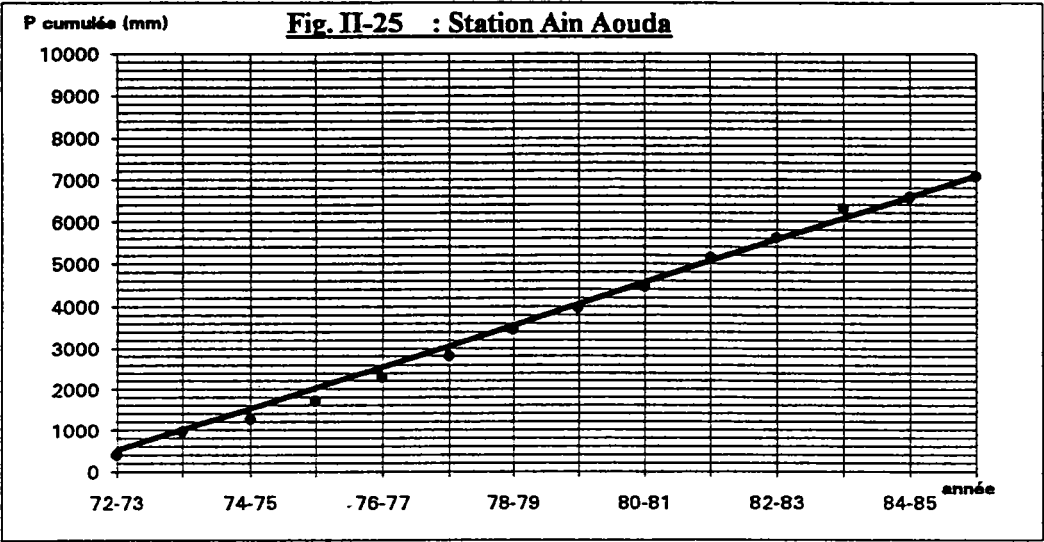
Du point de vue statistique, il semble donc qu'on puisse noter une répartition aléatoire (Log-normale) des précipitations annuelles. Il reste à vérifier que cette répartition est également aléatoire dans le temps ou, au contraire, qu'elle montre un arrangement faisant se succéder des séquences d'années sèches et humides. C'est l'objet de l'étude de l'homogénéité de la série.

b - L'étude de l'homogénéité de la série 1972-73/1985-86

Nous avons utilisé deux méthodes, celle du simple cumul (Cf. Fig. II-25 à II-27 et annexe II-7) et celle des CUSUM (Cf. Fig. II-28 à II-30 et annexe II-8) pour détecter l'existence de pseudo-cycles secs et humides.

L'application de la méthode des simples cumuls permet de voir l'arrangement de la séquence de précipitations annuelles par comparaison avec la droite de la moyenne cumulée. Nous avons pu ainsi constater partout

Simple cumul aux stations pluviométriques



CUSUM et Cjx aux stations étudiées (1972-73/85-86)

Fig. II-28 : Station Ain Aouda

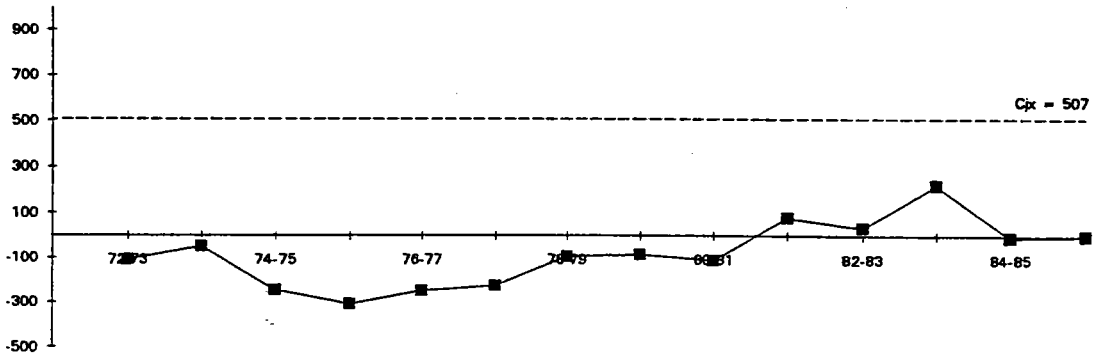


Fig. II-29 : Station Oued-Zem

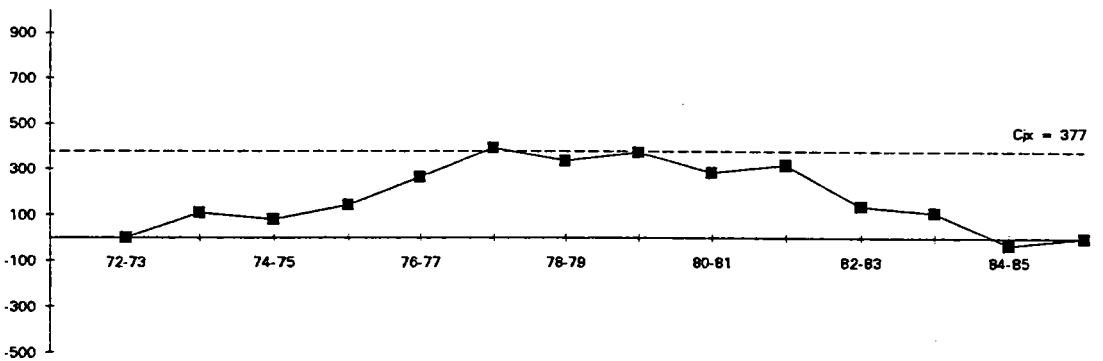
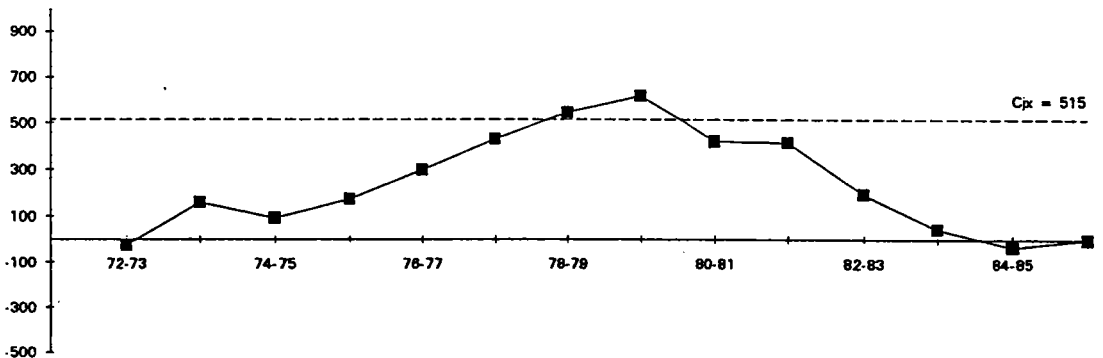


Fig. II-30 : Station Khenifra



des regroupements d'années sèches et d'années humides consécutives, mais cette méthode ne permet pas de caractériser ces différences.

Ces tendances sont encore plus visibles lorsqu'on applique la méthode des CUSUM aux hauteurs annuelles des précipitations. Cette méthode s'appuie sur la représentation graphique du cumul des écarts à la moyenne. On calcule, par ailleurs, l'extremum de la fonction C_{jx} du CUSUM pour toutes les stations selon l'équation suivante (J. F. Zumstein et al; 1993):

$$C_{jx} = \pm S \left[\left(\frac{u\sqrt{N}}{4} \right) + \left(\frac{u^2}{2\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{u^3}{8\sqrt{N}} \right) \right]$$

avec :

S : écart type,

N : l'effectif

u : variable de student (en général, on retient une probabilité de 95 %).

Cette fonction C_{jx} détermine une bande passante optimum, à l'intérieur de laquelle doivent se retrouver tous les points de la courbe du CUSUM pour que la série puisse être considérée comme homogène.

Les résultats obtenus ont montré que les courbes de certaines stations restent entre les limites de la bande passante optimum : on admet que ces séries sont homogènes. Pour les autres, les courbes dépassent les limites positives de la bande passante optimum : il apparaît donc que ces stations ont des séries hétérogènes composées d'une série humide puis d'une série sèche bien marquées (Cf. Fig. II-28 à II-30 et annexe II-8).

Néanmoins, la tendance générale est effectivement humide pendant la période 1975-76/1979-80 plus ou moins un an (sauf Ain Aouda et Moulay bou Azza).

La série sèche correspond à la période qui suit jusqu'en 1984-85 ou 1985-86 (sauf Tedders et Ain Aouda, pas de tendance sèche).

Cependant, compte tenu de la difficulté à identifier ces séquences sèches et humides, nous préférons, par la suite, différencier les années sèches et les années humides par comparaison entre l'année et la moyenne annuelle (pluviosité >1 : humide et pluviosité <1 : sèche).

2 - Les précipitations saisonnières

La répartition saisonnière des précipitations constitue un aspect très important des études pluviométriques. Les précipitations montrent en effet une tendance à se concentrer sur une saison particulière et à s'amoinrir durant une autre. Dans notre région, la répartition des précipitations au cours de l'année est nettement inégale (annexe II-3). Pour notre étude, nous avons divisé l'année climatique en deux grandes saisons, une saison humide qui va d'octobre à avril où les précipitations sont supérieures à la moyenne et une saison sèche de mai à septembre avec des précipitations inférieures à la moyenne. Le tableau II-10 et l'annexe II-3 représentent la répartition saisonnière des précipitations pour toutes les stations, selon ces deux grandes saisons. L'analyse des modalités de ce découpage peut permettre de caractériser des nuances climatiques régionales

Tableau II-10 : Précipitations moyennes saisonnières (1972-73/85-86)

Stations	P (mm) saison humide	P (mm) saison sèche
Ain Aouda	471	34.9
El Kbab	477	76.5
El Kssiba	561	90.9
El Khatouat	356	32.6
Khenifra	453	80.9
Moulay bou Azza	485	61.7
Ouljet Haboub	274	50.9
Oulmès	539	63.1
Oued Zem	275	41.1
Ras el Fathia	387	38.6
Rommani	320	40.1
Sidi Jabeur	292	31.8

a - La saison humide

En saison humide, la quantité d'eau enregistrée aux différentes stations varie en moyenne de 274 mm à Ouljet Haboub et 561 mm à El Kssiba. Cette quantité représente entre 85 et 93 % des moyennes annuelles pour l'ensemble des stations.

La partie amont reçoit, pendant cette saison, une pluviosité moyenne entre 561 mm à El Kssiba et 453 mm à Khenifra.

Dans la partie médiane, la pluviométrie moyenne varie entre les deux rives de l'oued Grou : en rive droite, la station Moulay bou Azza a une moyenne saisonnière de 507 mm ; en rive gauche les précipitations sont plus faibles et la moyenne de cette saison ne dépasse pas les 275 mm à la station d'Oued Zem et à celle d'Ouljet Haboub située dans la vallée de l'oued Grou.

Vers la partie aval, la quantité d'eau enregistrée reste importante, 471 mm à Ain Aouda et 390 mm à Ras el Fathia située dans la vallée de l'oued Grou.

b - La saison sèche

La quantité d'eau précipitée durant cette saison est globalement faible pour l'ensemble des stations, elle varie entre 28 mm à la station de Tedders et 91 mm à El Kssiba et représente de 7 à 15 % de la moyenne annuelle.

Dans la partie amont, les moyennes saisonnières vont de 81 mm à Khenifra et 91 mm à El Kssiba. Ces moyennes saisonnières restent élevées dans tout le secteur durant cette saison.

Vers la partie médiane, elles sont entre 33 mm à El Khatouat et 62 mm à Moulay bou Azza, soit de 8 à 11 % de la moyenne annuelle.

Dans la partie aval, la moyenne saisonnière est entre 28 mm à Tedders et 38 mm à Ras el Fathia et ne dépasse pas les 10 % de la moyenne annuelle.

Mais notons l'effet de la quantité de précipitations des mois de mai et septembre, durant cette saison sèche, qui peut représenter jusqu'à 96 % de la moyenne saisonnière.

Cette variabilité intersaisonnière des pluies a été complétée par l'étude des précipitations saisonnières fréquentielles selon la loi Log-normale (voir la présentation plus haut). Les résultats sont portés dans les tableaux II-11 et II-12.

En saison humide, les résultats sont proches de ceux obtenus pour l'année complète, en raison de la faiblesse des précipitations de la saison sèche :

- le rapport entre décennal humide et décennal sec est de 1.8 à 3.2;
- les fréquences quinquennales humide et sèche sont dépassées au moins 2 fois chacune à toutes les stations;
- les fréquences décennales humide et sèche sont dépassées au moins 1 fois pour l'ensemble des stations.

Pour la saison sèche, les valeurs de précipitations caractéristiques des fréquences décennales humide (0.9) et sèche (0.1) montrent un rapport s'étalant de 3.2 à 100. Ce rapport n'a pas grand sens compte tenu de la faiblesse des précipitations de la saison sèche. En année humide, les valeurs de la fréquence quinquennale sont dépassées au minimum 2 fois pour l'ensemble des stations. Pour la fréquence décennale, les valeurs sont dépassées au moins une fois pour toutes les stations sauf Oulmès, Oued Zem et Tedders. En année sèche, les précipitations des deux fréquences sont généralement faibles et sont dépassées au minimum une fois pour toutes les stations.

Pour valider les résultats obtenus de l'étude des précipitations fréquentielles annuelles et saisonnières, nous avons comparé les valeurs caractéristiques estimées pour chaque fréquence en année moyenne avec la somme des valeurs de la même fréquence en saison humide et saison sèche.

$$\text{Soit : } \left(\frac{X_{moy_{F_i}} - (X_{h_{F_i}} - X_{s_{F_i}})}{X_{moy_{F_i}}} \right) \times 100$$

avec : $(X_{moy_{F_i}})$: précipitations fréquentielles annuelles de la fréquence F_i

Tableau II- 11 : Les précipitations saisonnières caractéristiques à une loi Log-normale, saison humide (1972-73/85-86)

Stations	Moyenne	D*	Mode	Ecart type résiduel	Fréquences					Année la plus humide				Année la plus humide			
					F 0,1	F 0,2	Médiane	F 0,8	F 0,9	P (mm)	année	Fréquences	Durée de retour	P (mm)	année	Fréquences	Durée de retour
Ain Aouda	471	0.15	418	29	315	357	454	579	657	671	81-82	0.95	20	252	84-85	0.05	20
El Kbab	459	0.12	405	29	302	344	442	569	648	748	76-77	0.95	20	246	80-81	0.05	20
El Khatouat	358	0.12	264	39	181	221	324	475	580	616	78-79	0.92	13	151	84-85	0.05	20
El Kssiba	560	0.14	432	43	302	362	516	735	883	1097	76-77	0.96	25	286	74-75	0.08	13
Khenifra	453	0.10	398	26	297	339	435	560	637	684	73-74	0.94	17	275	82-83	0.06	17
Moulay bou Azza	507	0.13	398	50	278	333	471	666	798	828	77-78	0.92	13	242	82-83	0.05	20
Oueljet Haboub	274	0.14	246	11	187	210	265	333	375	420	78-79	0.96	25	155	82-83	0.03	33
Oued Zem	275	0.09	230	21	166	194	261	350	408	415	77-78	0.91	11	130	84-85	0.02	42
Oulmès	539	0.06	510	23	326	380	510	683	795	941	73-74	0.96	25	276	84-85	0.03	31
Ras el Fathia	390	0.18	356	34	276	307	378	466	519	635	78-79	0.99	100	295	80-81	0.05	20
Rommani	321	0.16	284	33	214	242	308	392	444	618	78-79	0.99	100	216	74-75	0.11	9
Sidi Jabeur	292	0.15	263	25	202	226	282	351	394	498	78-79	0.99	100	196	72-73	0.08	13
Tedders	338	0.11	314	14	248	274	330	399	440	515	78-79	0.98	50	246	75-76	0.05	20

Tableau II-12 : Les précipitations saisonnières caractéristiques à une loi Log-normale, saison sèche (1972-73/85-86)

Stations	Moyenne	D*	Mode	Ecart type résiduel	Fréquences					Année la plus humide				Année la plus humide			
					F 0,1	F 0,2	Médiane	F 0,8	F 0,9	P (mm)	année	Fréquences	Durée de retour	P (mm)	année	Fréquences	Durée de retour
Ain Aouda	34.9	0.24	4.6	16	4.4	7.6	21.6	61.7	106	120	83-84	0.92	13	1	78-79	0.01	100
El Kbab	90.4	0.12	52.9	16	35.1	45.8	76.4	127	166	216	74-75	0.96	25	23	73-74	0.02	50
El Khatouat	32.5	0.13	14.4	6.6	9.7	13.5	25.6	48.6	67.7	73	75-76	0.92	13	7	84-85	0.05	20
El Kssiba	91	0.14	40.8	13	27.4	37.9	71	133	184	240	79-80	0.95	20	24	78-79	0.07	14
Khenifra	80.8	0.05	59.7	5.8	41	50	73.4	108	131	160	75-76	0.96	25	36	82-83	0.05	20
Moulay bou Azza	61.8	0.19	30.6	7.9	20.4	27.9	50.5	91.6	125	150	75-76	0.94	17	14	73-74	0.04	25
Oueljet Haboub	50.8	0.25	24	14	16.1	22.3	41.8	78.3	109	115	74-75	0.91	11	8	82-83	0.01	100
Oued Zem	42	0.12	12.5	17	9.1	13.8	30.6	67.8	103	93	75-76	0.88	8	6	82-83	0.03	33
Oulmès	63.1	0.17	17.8	35	13.3	20.5	46.9	107	165	119	74-75	0.83	6	3	78-79	0.01	100
Ras el Fathia	38.4	0.10	18.4	7	12.3	16.8	30.9	56.9	78.1	83	75-76	0.91	11	7	78-79	0.02	50
Rommani	33.4	0.10	0.3	4.3	2.9	8.4	26.7	55.2	74	89	77-78	0.81	5	0.2	78-79	0.01	100
Sidi Jabeur	31.8	0.06	16	2.8	10.6	14.4	25.6	45.8	61.9	85	75-76	0.96	25	7	73-74	0.04	25
Tedders	27.9	0.22	0.9	35	1.7	3.5	14.2	57.1	118	93	83-84	0.87	8	0.1	78-79	0.01	100

D* valeur du test de Kolmogorov-Smirnov

(Xh_{Fi}) : précipitations fréquentielles de la saison humide de la fréquence F_i

(Xs_{Fi}) : précipitations fréquentielles de la saison sèche de la fréquence F_i

Les résultats montrent que vers l'humide, les précipitations de la fréquence quinquennale s'écartent de 1 à 7 %. Pour la fréquence décennale, l'écart est entre 3 à 19 %. La somme des valeurs fréquentielles saisonnières est plus faible que la valeur fréquentielle de l'année complète (-4 à -11 % pour les deux fréquences 0.2 et 0.1).

Ces chiffres montrent que les années complètes ne sont jamais purement sèches ou purement humides. En fait, la variation interannuelle se conjugue avec une variabilité à l'intérieur des saisons indépendante. Ceci nous permet de voir la variabilité des précipitations à l'échelle mensuelle.

3 - Les précipitations mensuelles

La répartition des précipitations selon les mois est une donnée importante pour les comportements hydrologiques. Elle permet aussi de préciser l'irrégularité des précipitations au cours de l'année.

Bien entendu, la régularité de l'été méditerranéen qui fait se ressembler toutes les stations pluviométriques, reste une conséquence directe de la situation climatique de notre région (situation anticyclonique). Dans chacune des stations étudiées, les mois de juin, juillet, août et parfois septembre reçoivent des précipitations faibles ou nulles. Les mois de décembre, janvier, février, mars, et avril restent les mois les plus pluvieux de toute l'année. (Cf. annexe II-3).

Les moyennes mensuelles vont globalement de 105 à 0,1 mm. La répartition des précipitations moyennes mensuelles peut être traduite par le coefficient mensuel de pluies (C. M. P) donné par la formule suivante :

$$C.M.P = \frac{PRECIPITATIONS \text{ DU MOIS CONSIDERE (mm)} \times NJP \text{ ANNEE}}{TOTAL \text{ MOYEN ANNUEL (mm)} \times NJP \text{ DU MOIS CONSIDERE}}$$

NJP = Nombre de jours de précipitations

Les valeurs de ce rapport sont toutes comprises entre 0 et 2.37 pour tous les mois de l'année et pour l'ensemble des stations.

La variabilité des précipitations à l'échelle mensuelle pourrait être exprimée par le coefficient de variation. Mais ce coefficient n'a aucune signification dès que la moyenne est trop proche de 0; ce qui se produit pendant les mois d'été. Néanmoins, signalons qu'à la majorité des stations le coefficient de variation le plus faible se situe en mars, ce mois est donc caractérisé par une certaine régularité des types de temps d'une année à l'autre.

Le mois le plus pluvieux varie selon les stations : pour les stations de Rommani, Ras el Fathia et Oulmès c'est décembre; pour Oued Zem, Ain Aouda et El Kssiba, janvier; pour Moulay bou Azza, Sidi Jabeur, Ouljet Haboub, Khenifra et Tedders, février; pour El Kbab, avril. Le mois le plus sec varie lui aussi selon les stations : pour Oulmès, Moulay bou Azza, Khenifra, Ouljet Haboub le minimum pluviométrique est le mois de juillet, pour El Kssiba, El Kbab, Ain Aouda, Ras el Fathia, Sidi Jabeur c'est le mois d'août.

D'une façon générale, la situation climatique de la région peut, d'une année à l'autre, entraîner un comportement pluviométrique nettement différent pour un même mois et pour toutes les stations ; à titre d'exemple, le mois de décembre 1974 enregistre 0 mm pour l'ensemble des stations.

De même, l'amplitude pluviométrique moyenne annuelle qui est la différence (en mm) entre les précipitations du mois le plus pluvieux et du mois le plus sec, montre de fortes variations régionales à l'échelle de l'année moyenne: les valeurs varient entre 45 et 105 mm. Mais notons que ces valeurs restent proches de celles des maxima pluviométriques mensuels du fait que la pluviométrie faible ou presque nulle du mois le plus sec de l'année, ne dépasse pas 1 mm dans la majorité des stations.

Ces constatations nous donnent une idée de l'opposition dans la région entre l'irrégularité pluviométrique hivernale et la régularité de l'été sec.

Cette analyse de la variabilité des précipitations doit être complétée par les études du nombre de jours de précipitations et l'intensité pluviométrique.

B - LA REPARTITION DU NOMBRE DE JOURS DE PRECIPITATIONS

La répartition du nombre de jours de précipitations et sa variabilité dans l'espace et dans le temps constituent également un aspect très important de l'étude pluviométrique.

Les tableaux II-13 et II-15 donnent les moyennes annuelles, saisonnières et mensuelles du nombre de jours de précipitations où il est enregistré au minimum 0,1 mm durant la période 1972-73/1985-86 pour les stations étudiées.

1 - L'échelle annuelle

Le nombre moyen annuel de jours de précipitations va de 41 jours/an à Oued Zem à 70 jours/an à Khenifra .

Dans la partie amont, le nombre moyen annuel de jours pluvieux est de 52 jours/an à El Kssiba et 70 jours/an à Khenifra. Vers la partie médiane, le nombre moyen de jours de précipitations se situe entre 41 jours/an à Oued Zem et 59 jours/an à Ouljet Haboub, située au fond de la vallée de l'oued Grou. Vers l'aval, le nombre moyen de jours de précipitations se situe en moyenne entre 39 jours/an à Tedders et 59 jours/an à Ras el Fathia.

2 - L'échelle saisonnière

Pour la saison humide, le nombre moyen de jours de précipitations se situe entre 34 et 51 jours. C'est dans la partie aval du bassin, à Ras el Fathia, et dans la partie amont, à Khenifra, qu'on relève le nombre moyen maximal, 51. Vers la partie médiane, le nombre moyen se situe entre 35 et 48 jours; la station d'Ouljet Haboub marque le maximum dans la vallée de l'oued Grou. Dans la partie aval, les stations situées dans la vallée marquent le nombre moyen le plus élevé, 51 jours en moyenne à Ras el Fathia et 49 jours à Sidi Jabeur .

Pour la saison sèche, le nombre moyen de jours de précipitations maximal ne dépasse pas les 20 jours dans l'ensemble des stations et le minimum est de l'ordre de 5 jours. Dans la partie amont, le nombre moyen saisonnier va de 9 jours à El Kssiba à 19 jours à Khenifra. Vers la partie médiane, le nombre moyen saisonnier se situe entre 6 et 11 jours et c'est aussi la station d'Ouljet Haboub qui marque la valeur élevée. Dans la partie aval,

Tableau II- 13 : Précipitations, nombre de jours de pluies et intensité pluviométriques année et saisons humide et sèche (1972-73/85-86)

Stations	P année	NJP année	Int.Pluv.année	P s.humide	NJP s.humide	Int.Pluv.s.humide	P s.sèche	NJP s.sèche	Int.Pluv.s.sèche
Ain Aouda	506	54.7	9.2	471	48.5	9.7	35	6.2	5.6
El Kbab	550	60.0	9.2	477	49.0	9.7	77	11.0	7.0
El Kssiba	652	51.7	12.6	561	42.6	13.2	91	9.1	9.9
El Khatouat	388	49.6	7.8	356	42.1	8.4	33	7.4	4.4
Khenifra	534	69.6	7.7	453	50.5	9.0	81	19.1	4.2
M.bou Azza	569	47.4	12.0	485	39.7	12.2	62	7.6	8.1
Ouljet Haboub	324	58.8	5.5	274	47.9	5.7	51	10.9	4.7
Oulmès	602	65.1	9.2	539	49.0	11.0	63	16.1	3.9
Oued Zem	317	41.0	7.7	275	34.9	7.9	42	6.1	6.9
Ras el Fathia	428	58.9	7.3	387	50.8	7.6	39	8.2	4.7
Rommani	354	43.9	8.1	320	37.9	8.4	40	6.0	6.7
Sidi Jabeur	323	58.1	5.6	292	49.2	5.9	32	8.9	3.6
Tedders	366	38.5	9.5	338	33.8	10.0	28	4.7	6.0

Tableau II-14 : Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles aux stations (1972-73/85-86)

Station	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aôu.	Année
Ain Aouda	8.3	50.7	42.1	89.7	98.7	73.9	59.7	56.2	24.9	0.5	0.8	0.4	506
El Kbab	20.4	42.8	46.3	67.7	72.8	82.7	61.3	85.9	40.0	21.3	5.8	3.0	550
El Kssiba	17.0	51.2	73.4	63.5	100.9	94.9	86.2	90.8	54.9	11.0	5.6	2.4	652
El Khatouat	5.7	21.1	35.2	64.3	67.4	69.5	46.5	51.8	22.2	4.0	0.3	0.4	388
Khenifra	17.8	41.3	45.8	70.1	67.7	85.1	60.9	82.4	34.6	21.8	2.9	3.8	534
Moulay bou Azza	11.9	62.4	45.2	89.3	87.9	90.8	54.4	77.4	35.8	11.8	0.3	1.9	569
Ouljet Haboub	9.7	23.8	35.4	36.4	44.0	46.7	43.5	43.5	24.3	11.9	1.4	3.6	324
Oulmès	9.1	48.6	65.6	97.2	71.5	87.5	85.8	82.5	37.7	13.7	0.4	2.3	602
Oued Zem	6.1	29.0	30.6	38.7	50.0	48.3	32.0	46.3	23.1	9.2	1.4	2.1	317
Ras el Fathia	6.5	35.8	39.9	71.5	67.0	65.1	59.5	51.4	28.0	3.5	0.4	0.1	428
Rommani	9.2	29.5	31.1	59.8	52.9	54.9	48.3	44.7	20.7	2.9	0.1	0.3	354
Sidi Jabeur	6.0	30.0	30.4	49.3	47.1	49.5	40.9	44.4	18.8	5.5	1.4	0.1	323
Tedders	3.7	30.9	34.1	48.9	56.7	67.1	46.4	54.1	18.3	5.6	0.1	0.2	366

Tableau II-15 : Le nombre de jours de précipitations mensuelles et annuelles aux stations (1972-73/85-86)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Année
Ain Aouda	1.2	4.5	6.3	7.6	8.9	6.9	7.4	6.9	4.4	0.3	0.2	0.1	54.7
El Kbab	2.0	4.0	6.0	7.0	8.0	9.0	8.0	7.0	5.0	2.0	1.0	1.0	60.0
El Kssiba	1.4	4.4	5.1	6.1	6.5	7.6	6.8	6.1	4.6	2.0	0.6	0.4	51.7
El Khatouat	1.4	3.1	4.7	7.1	7.2	7.1	6.1	6.8	3.9	1.3	0.3	0.6	49.6
Khenifra	2.7	5.3	5.7	6.9	7.6	8.1	8.1	8.8	8.0	4.9	2.4	1.1	69.6
Moulay bou Azza	1.4	3.1	5.4	6.2	7.2	7.1	5.6	5.0	4.4	1.6	0.1	0.1	47.4
Ouljet Haboub	2.1	4.3	6.1	7.0	7.7	8.2	7.2	7.4	4.9	1.9	0.7	1.2	58.8
Oulmès	1.0	5.0	7.0	7.0	7.0	8.0	7.0	8.0	8.0	5.0	2.0	0.1	65.1
Oued Zem	1.4	3.5	4.8	4.9	5.9	6.0	4.9	5.1	2.9	1.0	0.4	0.3	41.0
Ras el Fathia	1.4	4.8	6.7	7.1	8.4	8.4	7.3	8.3	5.6	0.7	0.3	0.2	58.9
Rommani	1.5	3.4	4.8	8.6	5.7	5.3	5.6	4.6	3.4	0.9	0.1	0.2	43.9
Sidi Jabeur	1.4	4.6	5.8	7.1	8.1	8.0	7.5	8.1	4.8	1.7	0.6	0.3	58.1
Tedders	0.6	3.2	4.1	5.0	6.1	5.6	5.0	4.6	2.7	1.0	0.1	0.3	38.5

Tableau II-16 : L'intensité pluviométrique moyenne mensuelle et annuelle aux stations (1972-73/85-86)

Stations	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Année
Ain Aouda	6.8	11.3	6.7	11.8	11.1	10.7	8.0	8.2	5.6	1.8	3.7	5.6	9.2
El Kbab	10.2	10.7	7.7	9.7	9.1	9.2	7.7	12.3	8.0	10.7	5.8	3.0	9.2
El Kssiba	11.9	11.8	14.3	10.5	15.5	12.4	12.7	15.0	11.8	5.5	8.7	5.6	12.6
El Khatouat	4.2	6.9	7.5	9.0	9.3	9.7	7.7	7.6	5.8	3.1	1.1	0.6	7.8
Khenifra	6.5	7.8	8.0	10.2	8.9	10.5	7.5	9.4	4.3	4.4	1.2	3.5	7.7
Moulay bou Azza	8.3	19.9	8.3	14.4	12.2	12.7	9.8	15.5	8.1	7.5	4.2	13.3	12.0
Ouljet Haboub	4.5	5.6	5.8	5.2	5.7	5.7	6.0	5.9	4.9	6.4	2.0	3.0	5.5
Oulmès	9.1	9.7	9.4	13.9	10.2	10.9	12.3	10.3	4.7	2.7	0.2	23	9.2
Oued Zem	4.3	8.3	6.4	8.0	8.5	8.1	6.6	9.1	7.9	9.2	3.3	7.4	7.7
Ras el Fathia	4.6	7.5	6.0	10.1	8.0	7.8	8.2	6.2	5.0	5.3	1.1	0.8	7.3
Rommani	6.1	8.8	6.5	7.0	9.3	10.4	8.6	9.8	6.2	3.4	1.4	1.4	8.1
Sidi Jabeur	4.2	6.5	5.3	7.0	5.8	6.2	5.5	5.5	3.9	3.2	2.2	0.2	5.6
Tedders	6.5	9.6	8.2	9.8	9.2	11.9	9.3	11.7	6.7	5.6	1.0	0.8	9.5

le nombre moyen est entre 5 et 9 jours et ce sont aussi les stations situées dans la vallée qui marquent les moyennes les plus élevées, 8 jours à Ras el Fathia et 9 jours à Sidi Jabeur.

Il est intéressant de relever que les stations de la vallée de l'oued Grou, Ouljet Haboub, Sidi Jabeur et Ras el Fathia, connaissent en moyenne plus de jours de précipitations, quelle que soit la saison.

3 - L'échelle mensuelle

Le maximum moyen mensuel du nombre de jours de précipitations se situe en février pour la majorité des stations et le minimum se montre en juillet ou août. Des maximums secondaires apparaissent aussi durant la saison pluvieuse (décembre, janvier et avril) et restent rapprochés les uns des autres.

Dans la partie amont, les maximums moyens du nombre de jours de précipitations vont de 8 jours/mois à El Kssiba à 9 jours/mois à El Kbab et sont marquées en février. Dans la partie médiane, les maximums sont entre 6 et 8 jours/mois, et sont atteints en janvier et février. Vers l'aval, les maximums sont entre 6 et 9 jours/mois en moyenne et sont marqués entre décembre et février. Globalement le nombre moyen maximum est plus important vers le nord et vers l'est que vers le sud et le sud-ouest.

Le minimum moyen du nombre mensuel de jours de précipitations ne dépasse pas un jour dans l'ensemble des stations et il est marqué durant la saison sèche, en juillet ou août.

En fait, le nombre moyen mensuel de jours de précipitations suit la répartition saisonnière des précipitations. Spatialement, la variabilité du nombre de jours de précipitations au cours de la saison humide est peu importante (de 4 à 9 jours). La variabilité réelle se traduit bien dans les valeurs des hauteurs précipitées et non pas dans le nombre de jours des précipitations. Ceci nous amène à étudier l'intensité pluviométrique à différentes échelles.

C - L'INTENSITE PLUVIOMETRIQUE

Pour une étude conjointe de la répartition géographique des hauteurs d'eau précipitées et du nombre de jours de précipitations, nous avons calculé l'intensité pluviométrique à l'échelle moyenne annuelle, saisonnière et mensuelle, de la façon suivante :

$$\text{INTENSITE PLUVIOMETRIQUE (mm / jour)} = \frac{\text{PRECIPITATIONS MOYENNES (mm)}}{\text{NOMBRE MOYEN DE JOURS DE PRECIPITATIONS}}$$

1 - L'échelle annuelle

L'intensité maximale est enregistrée à la station d'El Kssiba : 12.6 mm/jour, soit 652 mm pour 52 jours/an de précipitations.

Ce sont les stations de la bordure ouest du Moyen Atlas (El Kbab, et El Kssiba) qui connaissent les intensités les plus élevées (9.2 à 12.6 mm/jour) avec les stations du Plateau Central (Moulay bou Azza, Oulmès et Teddres, entre 9.2 et 12 mm/jour) auxquelles on peut rattacher Ain Aouda en bordure ouest (9.2 mm/jour). Les minimums sont enregistrés aux stations de fond de vallée (Ouljet Haboub 5.5 et Sidi Jabeur 5.6 mm/jour; Cf. tableau II-13).

2 - L'échelle saisonnière

Pour la saison humide, on retrouve à peu près la même répartition et les mêmes valeurs : entre 10 et 13 mm/jour pour le Plateau Central et la retombée du Moyen Atlas et 5.7 à 5.9 mm/jour pour la vallée de l'oued Grou.

Pour la saison sèche, le schéma est différent : l'intensité est liée à l'occurrence des orages et sa répartition spatiale semble plus aléatoire.

3 - L'échelle moyenne mensuelle

L'intensité pluviométrique mensuelle va de 0.2 mm/jour à 15.5 mm/jour. Les valeurs les plus élevées (entre 14 et 15.5 mm/jour) sont marquées aux stations d'Oulmès en décembre, d'El Kssiba en janvier et de Moulay bou Azza en avril (le Plateau Central et la retombée du Moyen Atlas). Pour les autres stations les valeurs sont comprises entre 6 mm/jour en mars à Ouljet Haboub et 12 mm/jour en février à Teddres (Cf. tableau II-16).

Là encore, à l'échelle moyenne mensuelle, le poids de certains événements ponctuels pluvieux est indéniable et explique les grandes différences entre les stations pour le mois du maximum.

Les valeurs les plus faibles de l'intensité pluviométrique mensuelle se situent aux mois de juillet ou août pour l'ensemble des stations, mais ce sont les stations de la partie amont et médiane du bassin qui marquent les valeurs maximales, celles de la partie aval marquent les valeurs minimales.

Ainsi, la pluviométrie connaît des variations dans le temps et dans l'espace; ceci est lié aux facteurs géographiques locaux cités précédemment (le site de la station, l'orographie, son exposition aux vents dominants, la fréquence des orages etc...).

Le contexte topographique du bassin versant joue bien un rôle important (crêtes, hauts et bas plateaux, dépressions et vallées...) et il est donc nécessaire de se pencher maintenant sur la répartition spatiale des précipitations.

D - L'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS MOYENNES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU

Pour estimer les pluies moyennes du bassin versant de l'oued Grou, nous avons d'abord essayé d'établir un gradient pluviométrique moyen annuel en fonction de l'altitude. Les résultats obtenus n'ont pas montré de gradient au-dessous de 800 m d'altitude, ce qui montre l'influence de la proximité de l'océan sur les bas et les hauts plateaux; l'effet orographique semble n'apparaître qu'au-delà de 800 m d'altitude. Néanmoins, deux approches sont possibles :

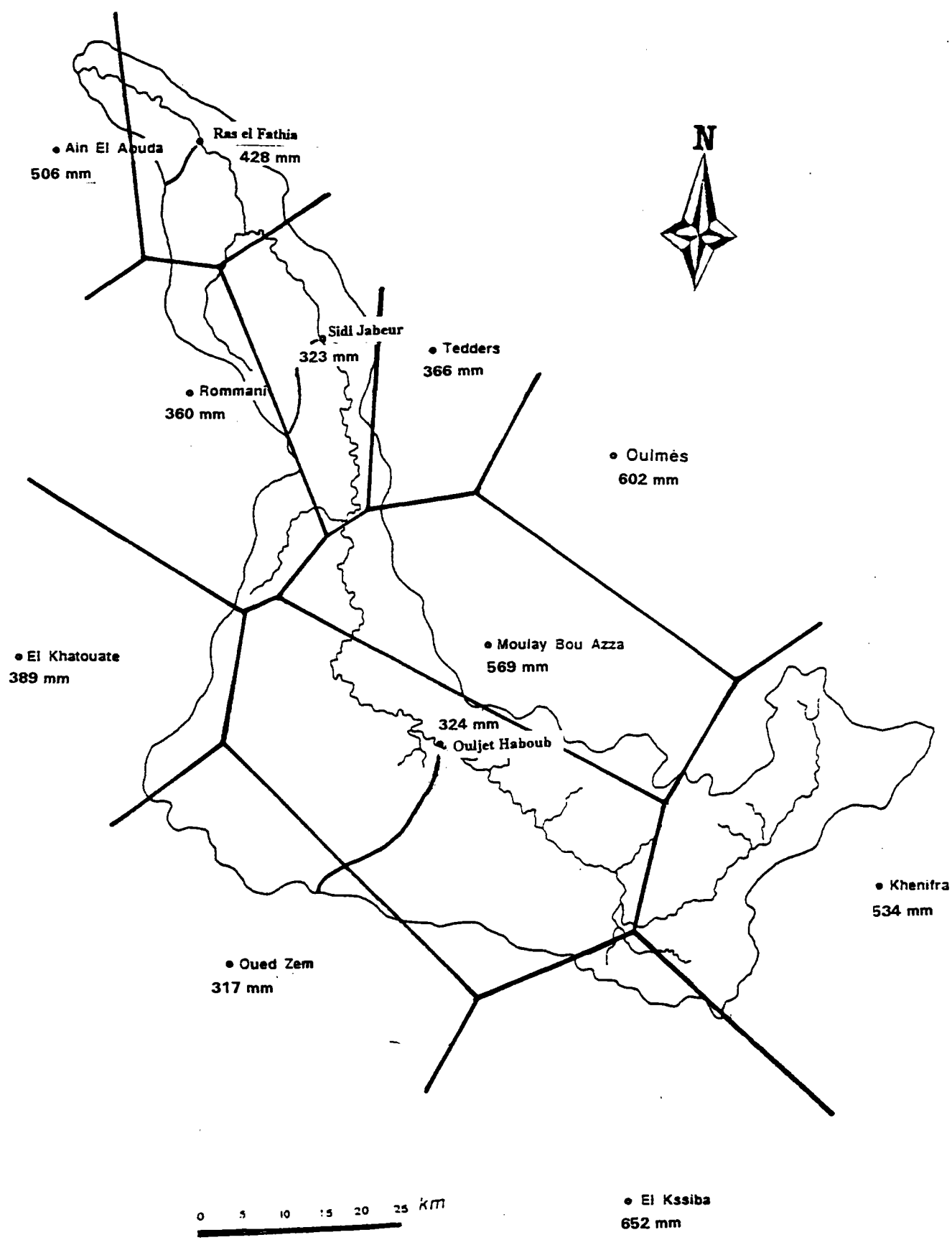
- une approche géométrique avec la méthode de Thiessen et celle des isohyètes qui ne tiennent pas compte de l'altitude; mais c'est justifié ici tout au moins sur la moitié du bassin versant de l'oued Grou où l'altitude est au-dessous de 800 m.

- une approche utilisant la relation précipitations/reliefs et nécessitant de mettre au point un modèle; c'est également justifié ici, compte tenu de la situation en altitude du bassin versant global de l'oued Grou (altitude moyenne de plus de 700 m).

1 - La méthode de Thiessen

La méthode des polygones de Thiessen évalue la hauteur moyenne des précipitations sur le bassin versant d'après la moyenne pondérée des enregistrements de plusieurs stations. Le facteur de pondération d'une station est la superficie du polygone formé par les médiatrices des segments d'union entre cette station et les stations avoisinantes (Cf. carte Fig.II-31). Cette méthode est fondée sur une simple traduction géométrique et prend en considération les stations à l'intérieur et celles proches du bassin versant, d'après l'équation suivante :

Fig. II-31: Estimation des précipitations moyennes du bassin (1972-73/85-86) :
Méthode de Thiessen



$$Pm = \sum_{i=1}^n \frac{S_i \times h_i}{A} \text{ où}$$

hi = hauteur des précipitations mensuelles enregistrée sur la station (mm).

Si = surface du polygone de la station à l'intérieur du bassin versant (km²).

A = surface totale du bassin versant (km²).

Les résultats figurent dans les tableaux suivants et en annexe II-9.

Tableau II-17 : Précipitations moyennes annuelles des bassins aux trois stations hydrométriques selon la méthode de Thiessen (1972-73/1985-86)

Année	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86
Ouljet Haboub	448	588	423	504	592	587	564	535	330	443	253	353	396	529
Sidi Jabeur	401	533	393	464	528	555	568	488	321	410	238	342	343	470
Ras el Fathia	385	519	381	455	530	529	572	477	317	398	248	345	337	452

Tableau II-18 : Précipitations moyennes mensuelles des bassins aux trois stations hydrométriques selon la méthode de Thiessen (1972-73/1985-86)

Année	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Juilt.	Août	Moyenne
Ouljet Haboub	14.4	36.9	44.7	58.3	62.8	71.6	55.8	67.5	32.6	17	2.2	3.9	468
Sidi Jabeur	12.4	36.3	41.1	56.5	60.6	63.2	52.6	61.8	30.5	9.8	1.5	3.2	429
Ras el Fathia	11.6	36.2	40.2	57.3	59.9	60.1	52.5	59.9	29.7	8.9	1.4	2.8	423

Les moyennes interannuelles pour les trois bassins sont proches avec une petite diminution progressive de l'amont vers l'aval et connaissent des variations interannuelles importantes.

2 - La méthode des isohyètes

Pour cette méthode nous avons introduit des stations supplémentaires qui nous ont permis de tracer le réseau d'isolignes. Ces derniers représentent des points sur lesquels il est tombé la même hauteur de pluies pendant une période déterminée.

Le traçage de ce réseau d'isolignes tient compte de la pluviométrie moyenne annuelle des stations prises en considération et de la distance qui les sépare entre elles (Cf. carte Fig. II-32).

La hauteur moyenne des précipitations sur le bassin versant est donc

$$P_m = \sum_{i=1}^n \frac{S_i \times P_i}{A} \text{ où :}$$

S_i = superficie comprise entre l'isohyète i et $i+1$ (km²).

$$P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

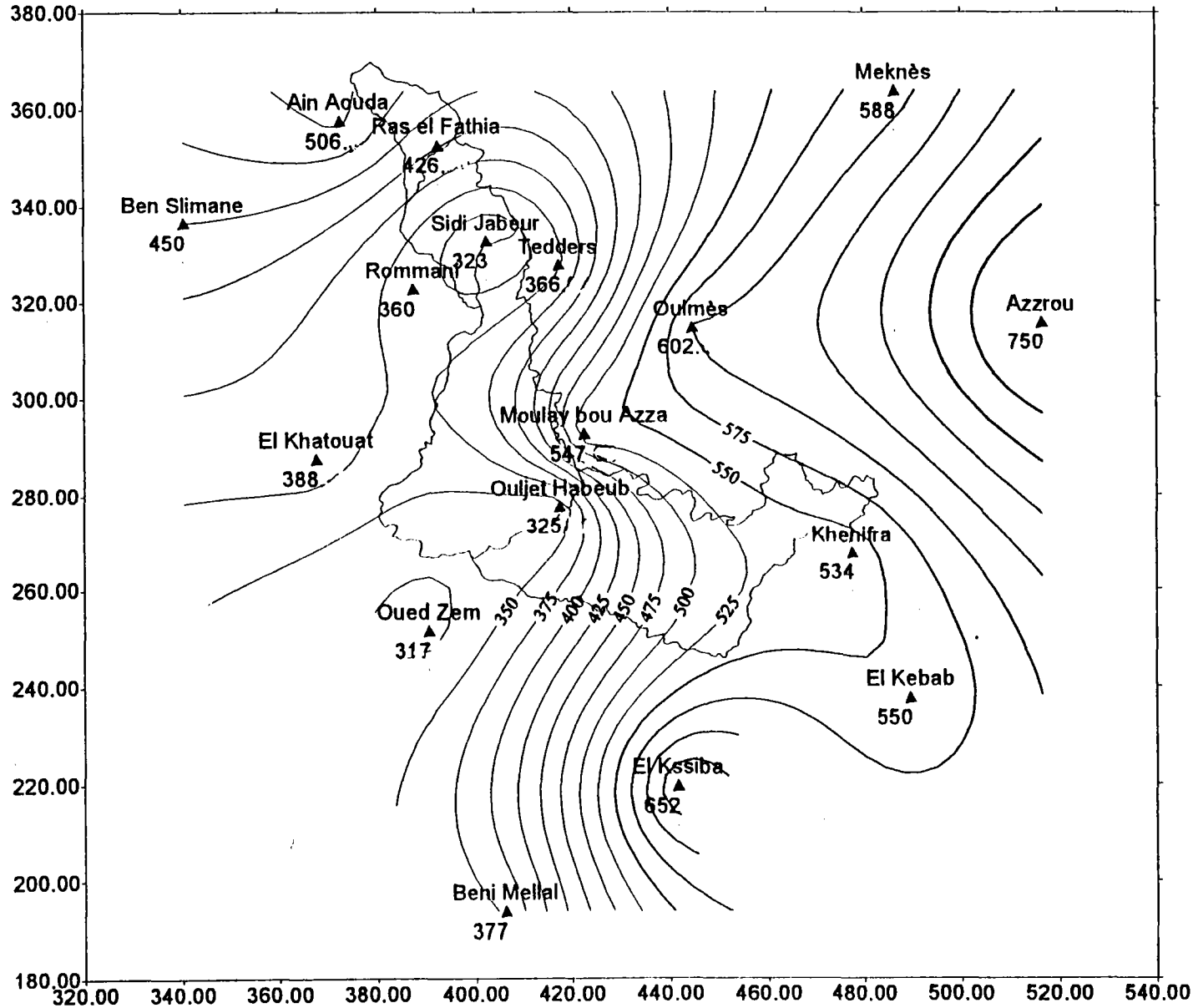
h_i = hauteur des précipitations de l'isohyète i (mm).

L'avantage de cette méthode, également géométrique, est qu'elle prend en considération la hauteur d'eau précipitée à chacune des stations.

Les résultats de cette méthode, appliquée uniquement aux moyennes annuelles, ont montré que les précipitations les plus élevées se localisent au nord-est du bassin (partie amont). La moyenne annuelle de la période est de 436 mm pour le bassin versant amont d'Ouljet Haboub. Elles diminuent progressivement vers le centre avec une dissymétrie entre les deux versants de l'oued Grou, la plaine de Smala et le fond de la vallée de l'oued Grou montrent des creux pluviométriques dans cette partie. La hauteur moyenne pour le bassin versant intermédiaire de Sidi Jabeur est de 403 mm. Vers l'aval, la moyenne du bassin versant de Ras el Fathia est de 394 mm.

En comparaison des valeurs obtenues par la méthode de Thiessen, les précipitations moyennes issues de la méthode des isohyètes sont nettement supérieures. La prise en compte de la topographie explique cet écart.

Fig. II- 32 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Isohyètes année moyenne (1972-73/85-86)



Pour le bassin versant de l'oued Grou ces méthodes nous paraissent insuffisantes car, si l'on admet qu'il existe une relation entre l'altitude et les précipitations :

- les stations sont peu nombreuses, mal réparties dans le bassin et ne rendent pas toujours compte des altitudes les plus élevées,
- le relief est très accidenté et les méthodes géométriques ne tiennent pas compte des variations locales ou régionales de l'altitude,
- les méthodes géométriques ne tiennent pas compte de l'exposition aux courants perturbés.

La réalisation d'un modèle basé sur des paramètres topographiques (altitude et exposition) nous paraît indispensable.

3 - Le modèle

Cette méthode résulte de différents travaux réalisés par le CEREG de Strasbourg. Elle associe la pluviométrie à des paramètres de types topographiques ou morphométriques et en particulier, à des altitudes extrêmes ou moyennes calculées sur des carreaux de 5 km de côté, autour des stations de mesures.

a - Méthodologie

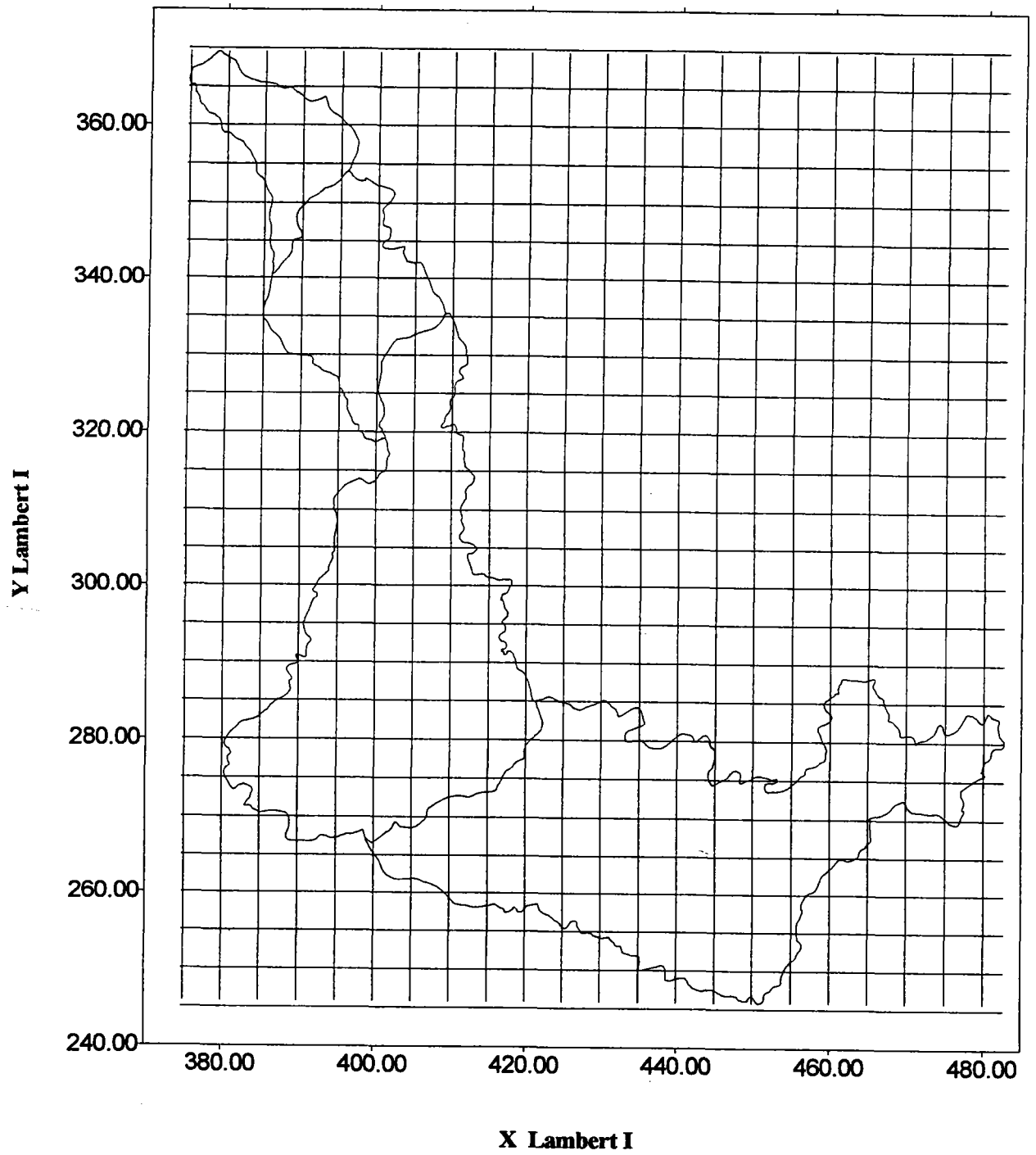
La relation entre la topographie et les hauteurs de précipitations est évidente. L'ascendance d'une masse d'air et son refroidissement provoque des précipitations, à l'inverse son affaissement entraîne son réchauffement et sa stabilisation. Les travaux de J. SCHERRER (1975) ont montré que des vallées d'une largeur inférieure à 5 km n'ont pas d'incidence sur l'affaissement d'une masse d'air. Le carreau de 5 km de côté semble donc particulièrement bien adopté pour décrire le relief dans le cadre d'un modèle de précipitations (Cf. carte Fig. II-33).

b - Réalisation d'un fichier des altitudes

Nous avons déterminé à partir de cartes topographiques au 1/100 000^{ème} les altitudes maximums, minimums, moyennes et lissées de tous les carreaux situés dans le bassin versant et à moins de 30 km des limites de celle-ci. Ce carroyage est basé sur les coordonnées Lambert I, le coin bas

Fig. II-33 : BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU

Carroyage du bassin versant selon les coordonnées Lambert I (5km)



gauche de chaque carreau correspondant à un multiple de 5 des coordonnées Lambert I. Les carreaux ont été numérotés de telle manière que l'on puisse extraire automatiquement, à partir des coordonnées d'un carreau les altitudes des carreaux environnants.

c - Détermination des variables explicatives par régression multiple

Pour chaque carreau contenant une station, nous avons extrait toutes les altitudes des carreaux proches (à moins de 30 km) selon les directions fixées par les flux dominants : nord-est, nord, nord-ouest, ouest et sud-ouest, soient 76 altitudes. Ces altitudes constituent les variables explicatives des précipitations à l'échelle annuelle et mensuelle, introduites dans une régression multiple pas à pas. D'autres variables relatives à la distance à la mer, à la crête dominante et des écarts types d'altitudes ont été introduites mais n'ont pas été retenues par la suite car les régressions ne les choisissaient pas. Ces régressions ont été réalisées avec le logiciel de statistique "Minitab". L'algorithme "Stepwise" permet d'introduire les variables explicatives tant que leur contribution reste significative par rapport à un seuil donné (fixé ici à 0,01). Les variables ont été introduites jusqu'à l'obtention d'un coefficient de détermination significatif ($R^2 > 0.8$) avec un maximum de quatre variables.

Les équations des régressions ont la forme suivante :

$$P \text{ (mm)} = a + bX_1 + cX_2 + \dots + kX_n$$

avec P: précipitations calculées pour une période i en un point j,

$X_1 \dots X_n$ = variables explicatives,

a = constante de régression et b...k = coefficients de régression.

A chaque type de précipitations, moyennes annuelles, interannuelles ou mensuelles correspond une équation, les régressions et leur coefficient sont donc différents. Ces équations ont été appliquées à chaque carreau, nous avons donc obtenu une grille où, pour chaque coordonnée Lambert X, Y multiple de 5, nous disposons d'une valeur de précipitations. Cette grille a été importée dans le logiciel "Surfer" qui a calculé la moyenne des précipitations des mailles situées à l'intérieur des limites des bassins versants que nous avons digitalisées.

d - Résultats

En année moyenne, le modèle donne des résultats très satisfaisants, avec quatre variables : X, Y Lambert, l'altitude maximale à 5 km à l'ouest et l'altitude maximale à 21 km au sud-ouest expliquent 92 % de la variance. La carte (Cf. Fig.II-34) est issue de cette équation. Elle montre que le bassin versant est caractérisé par une opposition de hautes terres mieux arrosées avec des précipitations supérieures à 500 mm et de régions plus basses ou en situation d'abri avec des moyennes inférieures à 400 mm. Les crêtes culminantes d'Aguelmous représentent la partie relativement la plus arrosée (600 à 650 mm). Les précipitations comprises entre 500 et 600 mm s'accrochent au Plateau d'Ezzhiliga, au revers de la cuesta crétacé au sud, au Bled el Gada, au Fourhal et à l'aval du bassin versant. Les précipitations les plus faibles s'observent le long de la vallée de l'oued Grou, dans la plaine de Sidi Lamine et dans la dépression triasique de Souk Jemâa à l'abri des reliefs dominants.

Les précipitations moyennes du bassin versant sont reportées dans les tableaux suivants et annexe II-10.

Tableau II-19 : Précipitations moyennes annuelles des sous bassins de l'oued Grou, modèle (1972-73/1985-86)

	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86
Ouljet Haboub	455	657	408	499	696	617	672	563	436	539	320	391	521	621
Sidi Jabeur	398	536	354	427	608	523	664	509	416	485	307	380	451	504
Ras el Fathia	388	543	336	401	610	521	676	512	380	497	311	350	429	503

Tableau II-20 : Précipitations moyennes mensuelles des sous bassins de l'oued Grou, modèle (1972-73/1985-86)

Année	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Juill.	Août	Moyenne
Ouljet Haboub	17	45.8	45.5	68.8	71.5	76.1	59.5	70	32.4	17.8	2.3	3.8	510
Sidi Jabeur	13.2	41.3	39.5	62.7	67.9	70.7	52.5	59.3	27.4	13.2	1.7	2.7	452
Ras el Fathia	12.4	41	38.6	63.4	67.3	69.6	52.2	57.7	26.6	12	1.7	2.4	443

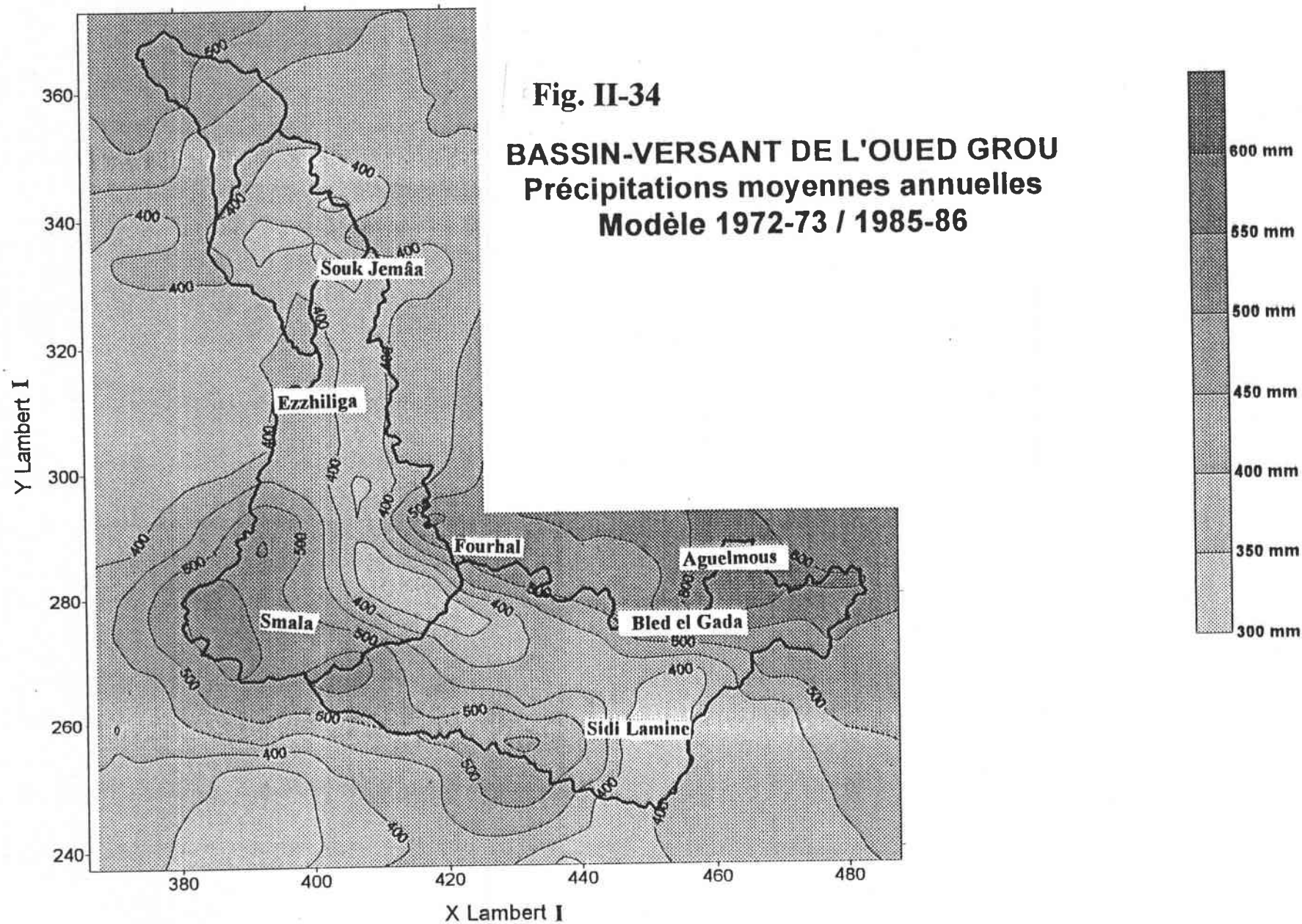


Tableau II-21 : Précipitations moyennes annuelles du bassin versant de l'oued Grou selon les trois méthodes (1972-73/85-86)

Bassin versant	P (mm) : Thiessen	P (mm) : Isohyètes	P (mm) : modèle
Ouljet Haboub	468	473	510
Sidi Jabeur	429	441	452
Ras el Fathia	423	436	443

Les écarts avec les précipitations obtenues par les autres méthodes sont importants (jusqu'à 8 %). Les précipitations calculées par le modèle ne nous paraissent pas surévaluées dans la mesure où les stations situées à l'intérieur du bassin versant sont toutes dans la vallée. Les méthodes de Thiessen et des isohyètes ne tiennent pas compte de ces effets de site. Ainsi, ces valeurs de précipitations calculées par le modèle pourront être comparées aux débits enregistrés aux stations hydrométriques.

Ce modèle a été appliqué de manière systématique aux précipitations moyennes des années particulières. Pour les 14 années de la période de référence, nous avons obtenu des coefficients de détermination compris entre 80 et 94 %. Les coefficients les plus faibles correspondent principalement aux années les plus sèches.

A l'échelle des mois moyens, le modèle a fourni des résultats globalement satisfaisants avec des coefficients compris entre 78 et 97 %. Les mois les plus secs sont, ici aussi, les plus difficiles à modéliser car, pour certains mois, les précipitations sont très faibles, notamment pour les stations proches de l'océan.

Conclusion

Pour la suite de cette étude, ce sont les précipitations issues du modèle qui seront utilisées. On peut émettre certaines réserves pour les précipitations proposées en raison de la faible densité des stations dans le bassin versant, du fait que les régressions ont été effectuées avec seulement 16 séries d'observations et que certaines stations sont très éloignées du bassin versant. Cependant, l'objectif du modèle est justement de pallier cette faiblesse du réseau de mesures. Mais le modèle donne des tendances probables sans les expliquer, car la démarche est essentiellement statistique

puisque les variables dites "explicatives" sont issues de la procédure des régressions multiples pas à pas. Il faudrait une étude de climatologie synthétique, que nous ne pouvons mener ici, pour lier les variables explicatives retenues et les facteurs des précipitations.

Ainsi, ces valeurs de précipitations calculées par le modèle pourront être comparées aux débits enregistrés aux stations hydrométriques. L'élaboration d'un bilan hydrologique, pour lequel nous avons besoin des températures et de l'évapotranspiration, permettra de les valider.

III - LA TEMPERATURE ET L'EVAPOTRANSPIRATION

Les températures régissent, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (vent, insolation, précipitations...) et avec la couverture végétale, le phénomène d'évapotranspiration. L'objectif est de proposer des données moyennes qui caractérisent le bassin et permettent d'établir une représentation du bilan hydrologique. Nous avons besoin de savoir quels rôles jouent les différents paramètres de la situation du secteur pour déterminer les facteurs de l'évapotranspiration, notamment au travers des températures.

A - LA TEMPERATURE

La température connaît des nuances régionales qui sont bien déterminées par les valeurs des températures moyennes annuelles et mensuelles. Par ailleurs, les températures moyennes annuelles augmentent du nord au sud et du littoral vers l'intérieur du pays, ce qui nous a mené à chercher un gradient thermique régional selon deux paramètres, l'altitude et la distance à la mer.

1 - L'approche régionale des températures

a - Température annuelle

Partagées entre l'influence maritime et l'influence continentale, les stations étudiées nous présentent l'image de la température de la région et ses fluctuations d'une année à l'autre. La moyenne annuelle est spatialement peu contrastée, elle se caractérise par des valeurs comprises entre 16,9 et 18 °c. Les valeurs avoisinant 18 °c se trouvent aux stations situées les plus au sud et les plus à l'intérieur des terres, Oued Zem et Beni Mellal ; en revanche, les moyennes aux alentours de 17 °c se rencontrent dans le nord (Meknès) et à proximité de la mer.

Tableau II-22 Températures moyennes interannuelles aux stations étudiées

Année	Beni Mellal	Ben Slimane	Casablanca	Kenitra	Oued Zem	Meknès
1972/73	17,6	17,6	16,8	16,9	17,3	16,6
1973/74	17,5	17,7	16,7	17,4	17,6	16,2
1974/75	17,5	16,9	16,4	16,9	17,5	16,5
1975/76	17,2	16,9	16,6	17,1	17,3	16,4
1976/77	17,5	16,0	16,7	16,9	16,9	16,2
1977/78	17,9	16,1	17,1	17,5	17,6	16,8
1978/79	18,3	17,7	17,4	17,9	18,4	17,5
1979/80	18,3	17,4	16,9	17,2	17,9	17,2
1980/81	18,3	17,7	17,0	17,4	18,1	17,3
1981/82	18,6	18,3	17,8	18,2	18,8	17,8
1982/83	18,1	16,6	17,0	17,0	17,9	16,6
1983/84	19,0	16,9	17,7	17,6	18,7	17,6
1984/85	18,6	15,7	17,3	17,4	18,1	17,5
1985/86	17,3	16,7	17,6	17,8	18,0	16,4
Moyenne	18,0	17,0	17,1	17,4	17,9	16,9
Ecart type	0,56	0,75	0,44	0,39	0,54	0,57
C.V	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03

Les températures moyennes annuelles sont presque constantes (Cf. tableau II-22), l'écart maximum interannuel de la période ne dépasse pas les 2 °c. Cette variabilité interannuelle limitée est bien exprimée par le coefficient de variation, ces valeurs sont entre 0.02 à Kenitra et 0.04 à Ben Slimane. Ceci reflète le fait d'une irrégularité peu marquée liée aux types de temps qui se succèdent dans les régions méditerranéennes, en séquences bien rythmées. Les stations littorales, Kenitra et Casablanca, varient le moins ; elles mettent en évidence l'influence maritime, facteur régulateur des températures.

D'autre part, on a vu précédemment que l'amplitude thermique moyenne annuelle était entièrement comprise entre les iso-amplitudes 10 °c et 20 °c. Les valeurs extrêmes sont aussi plus élevées à l'intérieur du pays que sur le littoral. Pour les stations littorales, l'amplitude annuelle la plus forte en année particulière atteint 13,1 °c à Casablanca et 13,6 °c à Kenitra en 1975-76, ce qui traduit l'influence tempérante de l'océan. Pour la station de Meknès du domaine de transition, l'amplitude annuelle la plus forte de la période est de 18,8 °c en 1983-84. Dans le domaine "continental", illustré par les stations d'Oued Zem et de Beni Mellal, l'éloignement de l'océan, l'altitude et la position topographique se conjuguent pour donner les plus fortes amplitudes de la région : l'amplitude annuelle particulière la plus forte de la période a dépassé 20 °c à Oued Zem et 22 °c à Beni Mellal en 1983-84.

b - Températures mensuelles

Les températures maximale et minimale moyennes mensuelles précisent la tendance et le caractère du régime thermique de chaque station au cours de l'année.

Pour les stations littorales, l'amplitude journalière est plus élevée pendant les mois de la saison froide et inversement, pour les stations les plus situées à l'intérieur, elle est plus importante durant les mois de la saison chaude (Cf. tableau II-23). Globalement, les valeurs moyennes annuelles de cette amplitude journalière moyenne sont nettement plus fortes dans le domaine "continental" (16 °c à Oued Zem et Beni Mellal) que sur le littoral (8.3 °c à Casablanca et 9.7 °c à Kenitra).

On pourrait appeler amplitude thermique maximum moyenne annuelle, l'écart entre la température maximale du mois le plus chaud et la température minimale du mois le plus froid de l'année. Cette amplitude thermique maximum

Tableau II-23 : Les températures moyennes mensuelles et annuelles aux stations 1972-73/85-86

Stations		Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aoû.	année
Casablanca	Moy. Extrême Max	27,1	25,5	23,9	19,9	18,3	19,5	20,6	21,8	22	24,6	27,4	28,1	23,2
	Moy. Extrême min	15,7	10,7	8,7	5,3	5,1	7,0	7,8	9,1	12,4	14,6	17,3	16,9	10,9
	Moyenne	21,4	18,1	16,3	12,6	11,7	13,3	14,2	15,5	17,2	19,6	22,4	22,5	17,1
Kenitra	Moy. Extrême Max	29,8	27,4	26,2	19,7	18,7	19,9	21,8	24,5	23,9	27,5	29,8	30,4	25,0
	Moy. Extrême min	15,5	11,2	8,2	4,4	4,5	6,4	7,1	9,1	12	14,5	16,9	16,8	10,6
	Moyenne	22,7	19,3	17,2	12,1	11,6	13,2	14,5	16,8	18,0	21,0	23,4	23,6	17,8
Ben Slimane	Moy. Extrême Max	32,6	31,3	28,2	20,5	19,4	19,4	24,3	25,3	26,9	29,2	32,5	34,2	27,0
	Moy. Extrême min	11,3	6,5	4,2	3,1	2,3	3,9	2,6	5,7	5,1	9,4	12,8	11,6	6,5
	Moyenne	22,0	18,9	16,2	11,8	10,9	11,7	13,5	15,5	16,0	19,3	22,7	22,9	16,8
Meknès	Moy. Extrême Max	32,8	28,6	24,9	18,8	17,8	19,6	22,3	23,5	25,5	31,1	35,8	35,2	26,3
	Moy. Extrême min	14,2	10,2	6,7	3,9	2,5	4,7	5,4	6,9	9,8	12,5	14,6	14,9	8,9
	Moyenne	23,5	19,4	15,8	11,4	10,2	12,2	13,9	15,2	17,7	21,8	25,2	25,1	17,6
Oued Zem	Moy. Extrême Max	39,5	30,8	28,1	20,9	20,9	20,7	25,3	27,1	32,5	34,3	42,0	40,4	30,2
	Moy. Extrême min	11	8,9	5,5	1,5	1,2	2,7	2,7	4,0	6,4	10,3	10,9	14,3	6,6
	Moyenne	25,3	19,9	16,8	11,2	11,1	11,7	14,0	15,6	19,5	22,3	26,5	27,4	18,4
Beri Mellal	Moy. Extrême Max	35,4	31,0	26,8	20,1	20,5	20,8	25,8	27,1	28,8	34,2	41,6	39,1	29,3
	Moy. Extrême min	13,9	8,4	4,6	1,0	1,0	2,3	4,6	4,7	9,6	13,0	15,3	15,7	7,8
	Moyenne	24,7	19,7	15,7	10,6	10,8	11,6	15,2	15,9	19,2	23,6	28,5	27,4	18,6

moyenne annuelle montre des valeurs élevées aux stations du domaine continental, Oued Zem et Beni Mellal (33 à 34 °c), faibles pour celles du domaine littoral, Casablanca et Kenitra (18 à 20 °c) et restent intermédiaires pour la station de Meknès du domaine de transition (28 °c).

De même, les valeurs des températures maximale et minimale moyennes mensuelles extrêmes donnent les mêmes résultats : les maximums extrêmes sont plus élevés pendant l'été, les valeurs dépassent 40 °c dans les stations du domaine continental, Oued Zem et Beni Mellal, 36 °c pour la station de Meknès du domaine de transition et ne dépassent pas 28 °c pour les stations du domaine littoral, Casablanca et Kenitra. Pour les minimums extrêmes, ils sont moins creusés pour le littoral que pour les stations intérieures, les mois décembre, janvier et février restent les mois les plus froids de l'année mais les températures moyennes minimales extrêmes ne sont jamais descendues au dessous de 0 °c à Oued Zem et Beni Mellal, 2 °c à Meknès et 4 °c à Casablanca et Kenitra.

La situation thermique du secteur étudié et ses variabilités spatiales et temporelles restent donc partagées entre l'influence maritime et l'influence continentale, selon la succession des différents types de temps dans la région. Or, en raison de l'absence de poste dans le bassin versant, il nous fallait trouver un moyen d'en appréhender les températures moyennes compte tenu, d'une part, de cette opposition d'influences continentale et maritime, et, d'autre part, des éventuelles relations régionales entre l'altitude et la température. Nous avons recherché un gradient thermique régional selon deux relations, l'altitude et la distance à la mer pour qu'on puisse calculer des séries de températures propres au bassin versant.

2 - Le gradient thermique

Avec l'altitude, la pression atmosphérique décroît, l'air qui s'élève se dilate et se refroidit (1 °c /100m). Ce refroidissement s'accompagne d'une augmentation du taux de saturation en vapeur d'eau et, à saturation, le refroidissement est atténué par la libération de chaleur de la réaction de condensation (de l'ordre de 0.5 °c /100 m). "En principe, le gradient thermique vertical devrait être compris entre ces deux valeurs" (E. Gille, 1985).

Nous avons essayé d'établir un gradient thermique moyen annuel et mensuel en fonction de l'altitude selon l'équation suivante :

$$T^{\circ}c = t_0 + (a \times z)$$

avec :

$$t_0 = \bar{t} - (a \times \bar{z})$$

$$a = \frac{\text{cov}(t,z)}{\text{var}(z)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (t_i \times z_i) - \bar{t} \times \bar{z}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\bar{z})^2}$$

z = l'altitude à la station (m).

A l'échelle annuelle, aucun gradient ne se dégage (Cf. Fig. II-35), au contraire la régression linéaire semble donner un gradient inverse. Par contre à l'échelle mensuelle (Cf. annexe II-11), deux grandes situations peuvent se différencier.

Tableau II-24 : Gradient thermique mensuel en °c/100 m

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Gradient	0.38	0.07	-0.17	-0.34	-0.3	-0.28	-0.17	-0.12	0.06	0.35	0.79	0.67	0.08

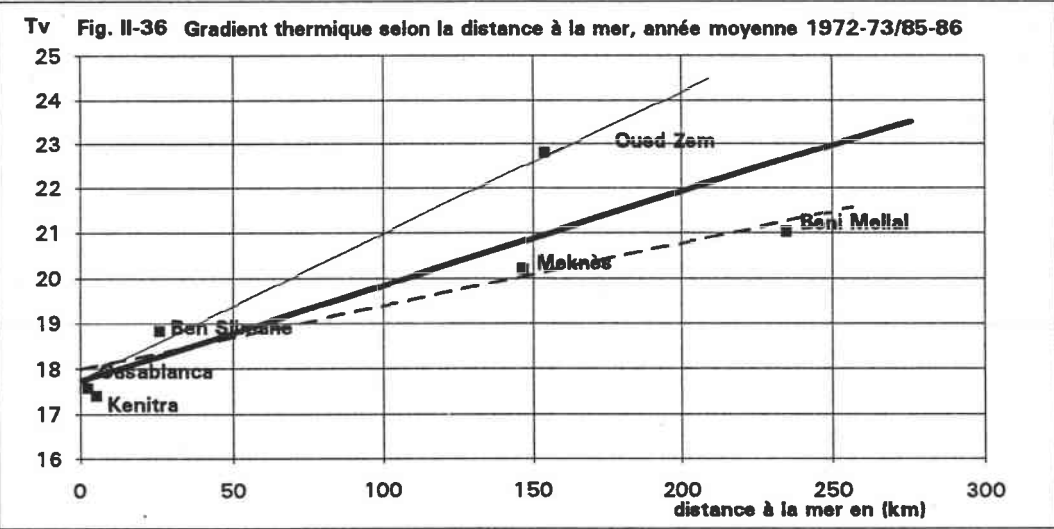
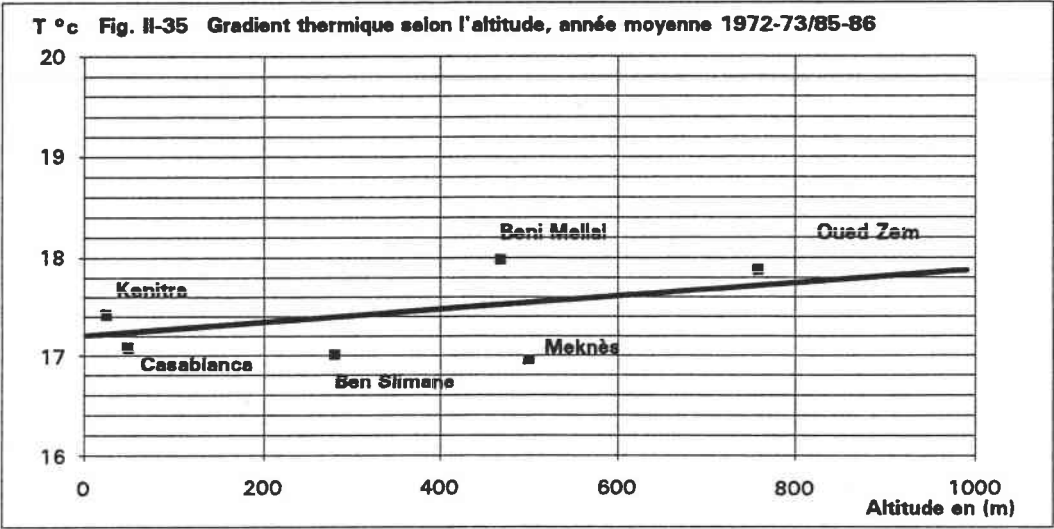
- de novembre à avril, les types de temps océaniques humides de la saison hivernale maintiennent le gradient thermique conforme. Ses valeurs sont comprises entre -0.12 et -0.34 °c/100 m,

- de mai à octobre, l'ensoleillement général lors de la saison estivale et la faible humidité ambiante favorisent le réchauffement continental et les gradients s'inversent; l'air chaud s'installe sur le continent et provoque un réchauffement pour les stations situées en altitude puisque ces stations sont aussi les stations les plus à l'intérieur. Les valeurs du gradient sont comprises entre 0.06 et 0.79 °c/100 m.

En fait, le gradient semble davantage lié à la continentalité; c'est pourquoi nous avons essayé un autre gradient thermique fondé sur la relation entre la température et la distance à la mer (Cf. Fig. II-36 et annexe II-12), en ramenant les températures des stations au niveau de la mer par la méthode de Laplace :

$$\text{température virtuelle : } T_v = T \text{ °c} + \left(\frac{0.65}{100} \times z \right)$$

z = l'altitude à la station (m).



Les résultats obtenus montrent des relations annuelles et mensuelles homogènes : le gradient est toujours positif, sauf pour le cas de Beni Mellal en décembre et janvier, mais ce gradient prend des valeurs très différentes en hiver, de l'ordre de $1.6\text{ }^{\circ}/100\text{ km}$ et en été, de l'ordre de $5\text{ }^{\circ}/100\text{ km}$. Globalement, le gradient de continentalité apparaît nettement sous forme d'une plage limitée par une bande sud-est constituée des stations de Casablanca, de Ben Slimane et d'Oued Zem et une bande nord constituée des stations de Kenitra et de Meknès. Le bassin versant de l'oued Grou serait situé, en gros, entre ces deux bandes avec une température moyenne annuelle comprise entre $16.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le bassin aval à Ras el Fathia et $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le bassin amont à Ouljet Haboub (températures ramenées à l'altitude moyenne des bassins).

Selon l'altitude, nous constatons que la série de températures du bassin versant, calculée avec le gradient mensuel (Cf. annexe II-13), donne des valeurs proches de celles mesurées à la station d'Oued Zem (Cf. Fig. II-37); de même, cette dernière reste la station la plus proche du centre du bassin versant global de l'oued Grou (Cf. carte Fig. II-1). Mais, vu l'absence de stations pour représenter les altitudes supérieures à 800 mètres, on peut se demander ce qui se passe réellement au delà de 1000 mètres tandis que les gradients thermiques proposés sont positifs et linéaires.

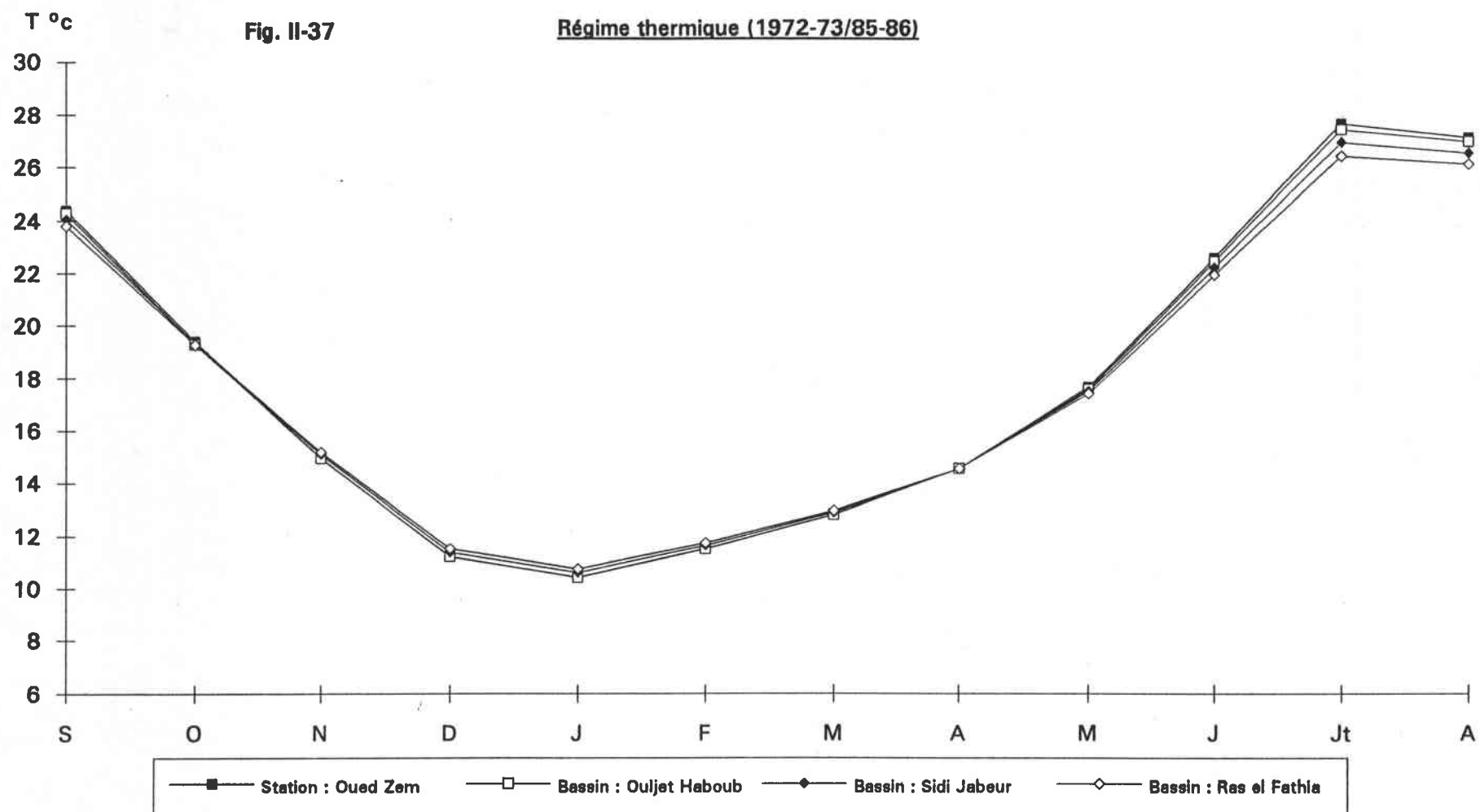
Avec la distance à la mer, le gradient thermique nous paraît logique, la relation est non linéaire et la température se stabilise lorsque la distance à la mer augmente. De même, il nous paraît normal qu'il fasse apparaître la différence de latitudes. Mais la station de Beni Mellal montre une situation aberrante, car elle ne s'intègre pas dans le schéma général, et rend ainsi toute l'hypothèse des deux bandes, s'appuyant plus ou moins sur la répartition en latitude, très fragile.

D'une façon générale, il est difficile d'affirmer qu'il existe un gradient thermique réel, mais une relation saisonnière apparaît, qui lie la température et la continentalité par l'intermédiaire de l'altitude. Finalement, cette relation sera utilisée pour le calcul des séries des températures moyennes annuelles du bassin, lesquelles nous permettront de calculer des séries de l'évapotranspiration.

B - L'EVAPOTRANSPIRATION

Dans le cadre de l'approche quantitative des termes du bilan hydrologique, deux paramètres climatiques essentiels sont retenus, les apports par

Fig. II-37

Régime thermique (1972-73/85-86)

précipitations et les pertes par évapotranspiration. Mais rappelons qu'il faut distinguer entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP) peut être définie comme la quantité d'eau qui pourrait être évapotranspirée par une surface engazonnée si la quantité d'eau disponible (les apports et les réserves en eau) est infinie. Elle dénote donc les possibilités maximales d'évapotranspiration pour une référence gazon ;

- l'évapotranspiration réelle (ETR) est celle qui se produit réellement dans la nature et qui se définit comme la somme de toutes les pertes par évaporation physique ou physiologique. Elle exprime l'apport entre la disponibilité d'eau (l'offre) et les possibilités d'évapotranspiration (la demande). Elle est liée à la capacité des réserves en eau du sol et aux types de végétation.

Nous avons calculé les valeurs de ces facteurs à partir des observations des autres éléments climatiques qui sont facilement mesurables. Parmi les formules élaborées pour le calcul et l'évaluation de l'ETP et de l'ETR, nous avons utilisé des formules s'appuyant sur des données climatiques assez communes :

ETP Thornthwaite : l'idée de base de Thornthwaite c'est qu'il existe une analogie entre la courbe des températures et celle de l'ETP tout au long de l'année ; aussi, la formule qu'il propose ne fait-elle intervenir que la température :

$ETP = f(T)$ soit :

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10T}{I} \right)^a \times k$$

$$I = \sum_{i=1}^n i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = ((6.75 \times 10^{-7}) \times I^3) - ((7.71 \times 10^{-5}) \times I^2) + (0.01792 \times I) + 0.49239$$

ETP : évapotranspiration mensuelle en mm

k : coefficient correcteur mensuel en fonction de la latitude et du mois

T : température mensuelle en °C.

ETP Turc : L. Turc fait intervenir dans sa formule des facteurs énergétiques et prend en compte, selon une base théorique, le rôle respectif de chaque paramètre : rayonnement global et température. La formule utilisée est la suivante :

$$ETP (f.75) = k \times \left(\frac{T}{T + 15} \right) \times \left[Iga \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right) + 50 \right] \times \max \left(1, 1 + \frac{65 - HR}{120} \right)$$

avec :

h = insolation

H = durée du jour

Iga = énergie solaire sans atmosphère en cal/cm³/jour

k = 0.37 en février, 0.4 pour le mois de 30 jours et 0.41 pour le mois de 31 jours.

Le dernier des trois termes de la formule représente l'influence de l'humidité relative lorsque celle-ci est inférieure à 60 %. Nous ne disposons pas de données de l'humidité relative pour le bassin versant, mais les observations faites à d'autres stations proches de la région, nous ont amené à proposer les valeurs de l'humidité relative moyennes mensuelles pour nos stations de températures en fonction de la distance à la mer.

1 - L'application aux stations

Nous avons voulu vérifier la réalité des valeurs proposées par les méthodes de Thornthwaite et de Turc et nous les avons calculées systématiquement aux stations de températures (Cf. tableau II-25 et annexes II-14 et II-15).

Les résultats montrent des écarts ahurissants de l'ordre de 500 mm/an. L'ETP Penman (Météo France) donne dans le midi de la France des valeurs supérieures à 1000 mm et les valeurs de l'ETP Turc en sont très proches. La méthode Blaney Griddle donne à Boulaouane (Maroc, Plaine de Doukkala, latitude 32° 50 N, à 60 km de la mer environ) une ETP de 1400 mm (Projet de développement et amélioration de la production céréalière en irrigué, volume I tome 2, cas de Doukkala 1993 O.R.M.V.A.D).

Compte tenu, d'une part de la difficulté d'obtenir des observations et d'autre part, de la vraisemblance de nos calculs de l'ETP par la méthode de Turc, nous avons retenu celle-ci pour estimer l'ETP moyenne sur le bassin versant de l'oued Grou.

Tableau II- 25 : Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle aux stations (1972-73/85-86)

		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
Casablanca	ETP Thornthwaite	105	71	40	26	23	29	42	54	83	106	138	128	846
	ETP (gazon)	160	88	52	44	45	51	84	111	162	212	239	222	1471
	ETP (sol nu)	112	68	46	42	42	44	57	67	97	127	144	133	979
Kenitra	ETP Thornthwaite	108	71	40	26	23	29	42	56	85	109	142	133	864
	ETP (gazon)	161	89	52	43	44	51	85	113	164	216	242	225	1486
	ETP (sol nu)	113	68	46	41	42	44	57	68	99	129	145	135	988
Ben Slimane	ETP Thornthwaite	108	71	40	25	23	28	41	53	82	106	144	133	855
	ETP (gazon)	162	89	52	42	44	49	83	109	161	213	243	226	1471
	ETP (sol nu)	113	68	46	40	41	43	56	65	96	128	146	135	978
Meknès	ETP Thornthwaite	122	75	38	23	21	27	40	52	89	126	195	169	975
	ETP (gazon)	163	88	50	40	40	47	80	109	161	216	251	232	1478
	ETP (sol nu)	114	68	44	38	38	41	54	65	96	130	151	139	978
Oued Zem	ETP Thornthwaite	119	72	39	24	21	28	40	53	85	117	184	160	943
	ETP (gazon)	168	89	50	40	41	48	81	109	165	224	261	240	1515
	ETP (sol nu)	118	69	44	38	39	41	54	65	99	134	157	144	1002
Beni Mellal	ETP Thornthwaite	118	72	38	24	21	28	41	55	87	123	177	158	941
	ETP (gazon)	168	89	50	39	40	48	83	112	168	226	260	240	1522
	ETP (sol nu)	117	69	44	37	38	42	56	67	101	136	156	144	1006

Tableau II- 26 : Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle aux bassins versants (1972-73/85-86)

		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
Oulejet Haboub	ETP Thornthwaite	123	75	38	23	20	27	40	52	88	129	204	176	994
	ETP (gazon)	168	89	50	40	41	47	81	109	165	224	260	239	1512
	ETP (sol nu)	117	69	44	38	39	41	54	65	99	134	156	143	1000
	ETP vég. méd.	117	71	50	40	41	47	73	98	132	168	182	167	1187
Sidi Jabeur	ETP Thornthwaite	122	75	38	23	21	27	40	52	89	126	195	169	975
	ETP (gazon)	167	89	51	40	41	48	81	109	164	223	259	238	1509
	ETP (sol nu)	117	69	45	38	39	41	55	65	99	134	155	143	999
	ETP vég. méd.	117	71	51	40	41	48	73	98	131	167	181	166	1185
Ras el Fathia	ETP Thornthwaite	122	74	38	24	21	27	40	52	89	124	192	169	971
	ETP (gazon)	167	89	51	40	42	48	82	109	164	221	257	236	1505
	ETP (sol nu)	117	69	45	38	39	42	55	65	98	133	154	142	996
	ETP vég. méd.	117	71	51	40	42	48	73	98	131	166	180	165	1182

2 - L'application aux bassins versants

Pour ces calculs, nous avons utilisé les températures moyennes mensuelles calculées pour chaque bassin versant à partir de l'altitude moyenne par la méthode du gradient d'altitude mensuel. L'humidité relative moyenne retenue est celle des stations d'Oued Zem et Meknès. L'ETP ainsi calculée donne des valeurs annuelles de l'ordre de 1400 mm.

Mais l'ETP référence gazon n'a pas de réalité dans le monde méditerranéen sec: d'une part, les formations végétales donnent un couvert très discontinu, et entre ces formations, le sol apparaît nu ; d'autre part, la végétation locale est adaptée à la semi-aridité (feuilles dures, réduites, vernissées, essences élaborant des huiles odorantes pour limiter la transpiration). Du fait de la variabilité de la répartition spatiale des types de couvert végétal dans le bassin versant de l'oued Grou (forêt 9 %, matorral 35 %, steppe 17 %, cultures et pâturage 40 %), il est vraisemblable que l'ETP moyenne pour le bassin versant se situe entre l'ETP gazon et l'ETP sol nu. La référence sol nu n'intègre que l'évaporation physique, on l'obtient en affectant l'ETP gazon d'un coefficient dit "cultural" allant de 0.9 l'hiver à 0.6 l'été. Nous avons utilisé une référence intermédiaire, que nous avons appelée référence végétation méditerranéenne, en donnant à ce coefficient cultural des valeurs comprises entre celles du sol nu et 1 (1 = référence gazon). Les résultats sont portées dans le tableau II-26 et dans les annexes II-16 et II-17).

L'évapotranspiration potentielle, référence végétation méditerranéenne, donne des valeurs annuelles de l'ordre de 1100 mm pour l'ensemble du bassin versant de l'oued Grou. Ces valeurs sont comprises entre celles de l'ETP gazon (1400 mm) et celles de l'ETP sol nu (950 mm).

Cette approche de la répartition du phénomène d'évapotranspiration au cours de l'année moyenne, va nous aider à comprendre les bilans hydrologiques moyens annuels des bassins versants de l'oued Grou aux différentes stations hydrométriques.

Conclusion

En conclusion de cette étude climatique, il apparaît que le bassin versant du l'oued Grou (bordure sud du Plateau Central marocain), est soumis à un climat de type "méditerranéen semi-aride" où l'influence océanique est sensible. Les traits essentiels sont les suivants : des variations interannuelles

marquées par une succession d'années sèches et d'autres humides et des variations saisonnières très marquées montrant l'alternance d'une saison humide et clémente et d'une saison sèche et chaude. Les contrastes thermiques hiver-été sont peu marqués dans la région, mais l'amplitude thermique moyenne extrême reste importante.

L'irrégularité des différents paramètres climatiques (températures, précipitations et évapotranspiration) reste un caractère fondamentale de ce climat. Cette irrégularité est par ailleurs inscrite dans la durée des saisons sèches et humides. Certaines années d'absence prolongée des précipitations entraîne une sécheresse marquée. A l'inverse, les période sèches estivales peuvent être interrompues par des orages dont tous ne sont pas pris en compte par le réseau des stations de mesure insuffisamment dense.

D'autre part, la saison hivernale pluvieuse diversement arrosée, est précoce ou tardive. Ceci contribue à définir son plus ou moins grande humidité. Les mois charnières sont caractérisés par les hauteurs d'eau les plus variables. Ainsi, il apparaît que n'importe quel mois de cette saison peut recevoir des précipitations anormalement élevées ou anormalement basses. Ces précipitations sont absorbées en grande partie par l'évapotranspiration. Le bilan hydrique qui permet de définir les apports d'origine climatique sera intégré dans le bilan hydrologique (troisième partie). Il servira pour valider ce dernier. Mais la définition de ces bilans est précédée par toute l'étude hydrologique, objet de la partie suivante.

TROISIEME PARTIE
L'HYDROLOGIE

INTRODUCTION

Le bassin versant de l'oued Grou constitue une unité géographique hétérogène. Son comportement hydrologique résulte de l'interaction des différents paramètres physiographiques auxquels s'ajoutent les facteurs climatiques. L'étude de du comportement hydrologique sera abordée à différentes échelles de temps. L'approche annuelle, saisonnière et mensuelle des débits nous permet d'appréhender les systèmes d'écoulement généraux et les particularités propres du cours d'eau. Les relations pluies, débits et déficits d'écoulement (ou évaporations) peuvent être cernées à cette échelle.

Les débits de l'oued Grou sont mesurés à trois stations hydrométriques. Ce qui nous permet de mettre en évidence les variations temporelles et spatiales. On mesure aussi la contribution des apports amont par rapport à l'écoulement total à l'aval.

L'étude hydrologique n'est pas sans poser de problèmes. Ceux rencontrés sont assez caractéristiques des régimes semi-arides où les conditions du climat déterminent assez fréquemment un assèchement des écoulements en période estivale.

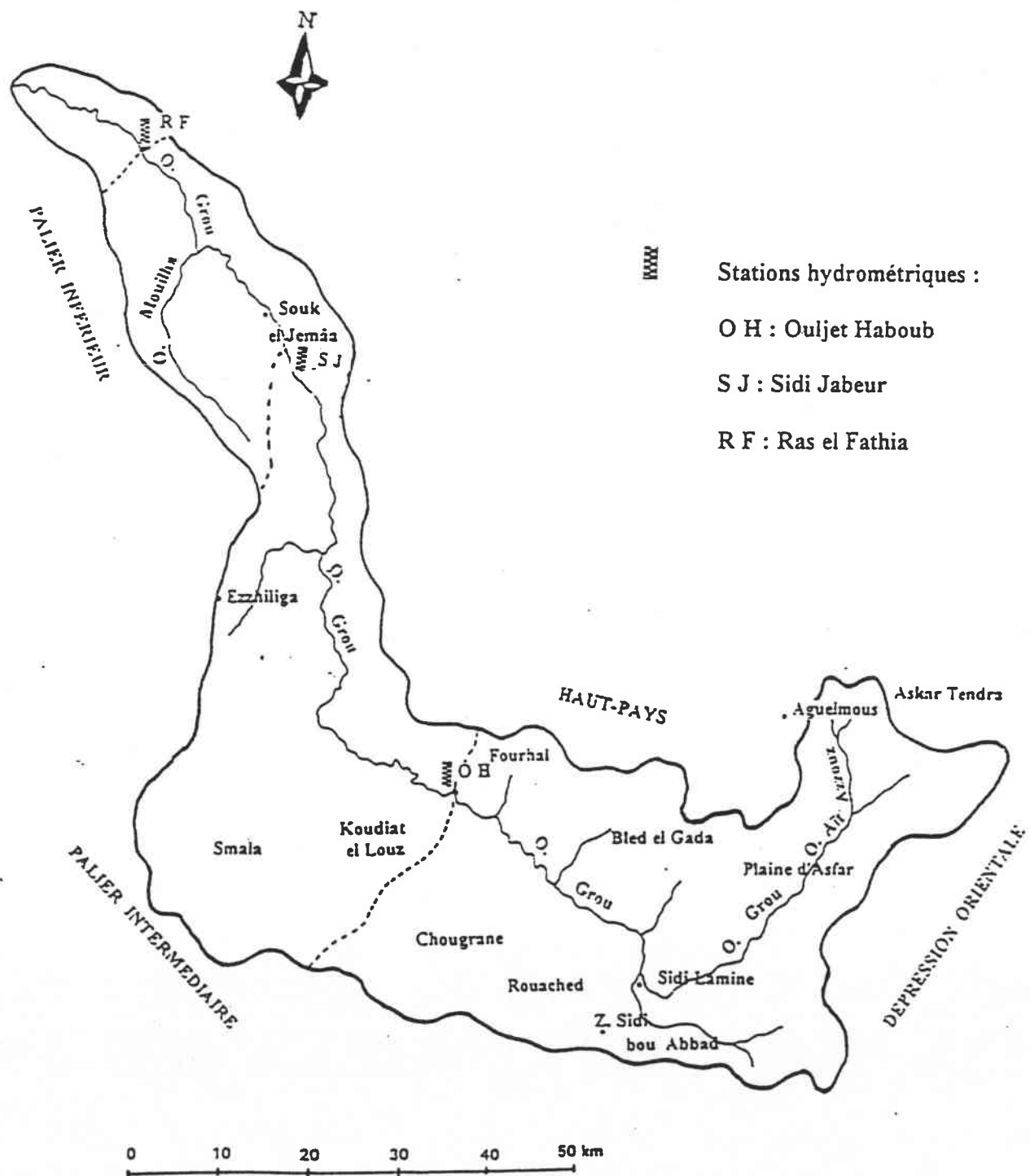
I - LES DONNEES HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU

Nous commençons par la présentation du réseau hydrométrique et la critique des données d'observations correspondant à la période d'étude qui s'étend de 1972-73 à 1985-86.

Les données hydrométriques utilisées dans l'étude hydrologique du bassin versant de l'oued Grou proviennent des mesures réalisées par le service de l'Hydraulique. Elles sont enregistrées le long de l'oued Grou à trois stations hydrométriques (Cf. carte Fig. III-1); la station d'Ouljet Haboub, située à l'amont, contrôle 42.6 % du bassin global (1627 km²), la station intermédiaire de Sidi Jabeur contrôlant 80.3 % de la surface totale du bassin (3067 km²) et la station de Ras el Fathia située sur le Grou inférieur, juste à l'amont de la retenue du barrage de Sidi Mohamed ben Abdalah, contrôlant 92.7 % du bassin versant global (3540 km²). L'équipement hydrométrique montre donc une faible densité : trois stations de mesure

Fig. III-1

BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU
RESEAU HYDROMETRIQUE



pour un bassin versant de 3820 km², dont les caractères physiques sont contrastés. Ce réseau hydrométrique est par ailleurs très jeune, la mise en place de stations hydrométriques sur le cours de l'oued Grou date du début des années soixante-dix (1971-1972).

A - LA CRITIQUE DES DONNEES

Pour critiquer l'homogénéité des données hydrométriques, nous avons utilisé la méthode des doubles cumuls et la corrélation linéaire, cette dernière permet, de plus, le comblement des lacunes (Cf. annexe III-1).

1- La méthode des doubles cumuls

La méthode des doubles cumuls entre les trois couples de stations, permet de déterminer la qualité de fonctionnement des stations hydrométriques et d'éprouver la fiabilité des données pour la période d'étude (Dubreuil 1974).

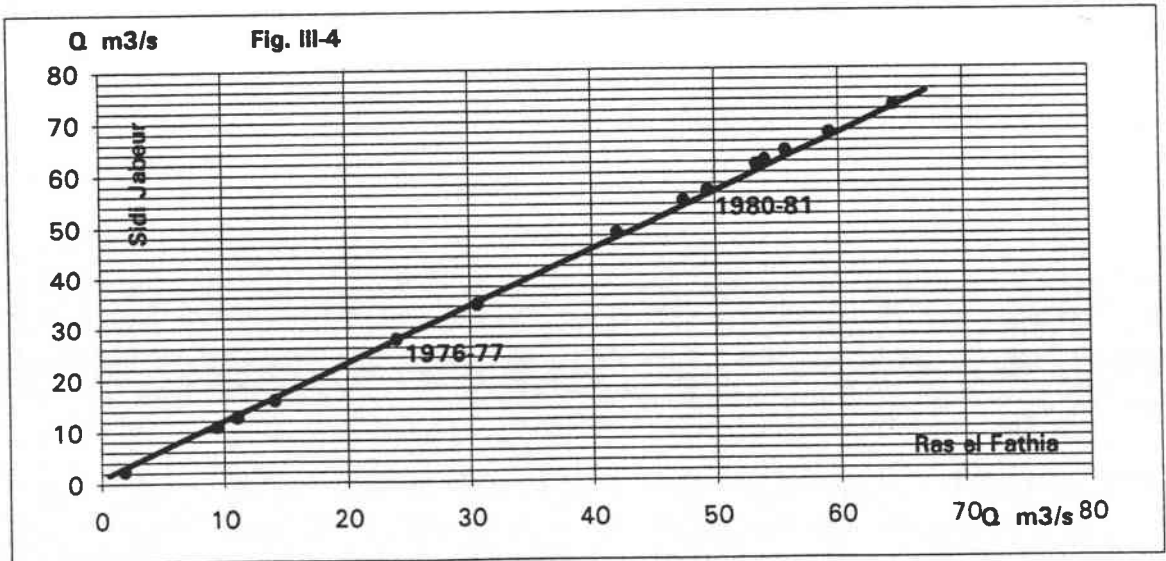
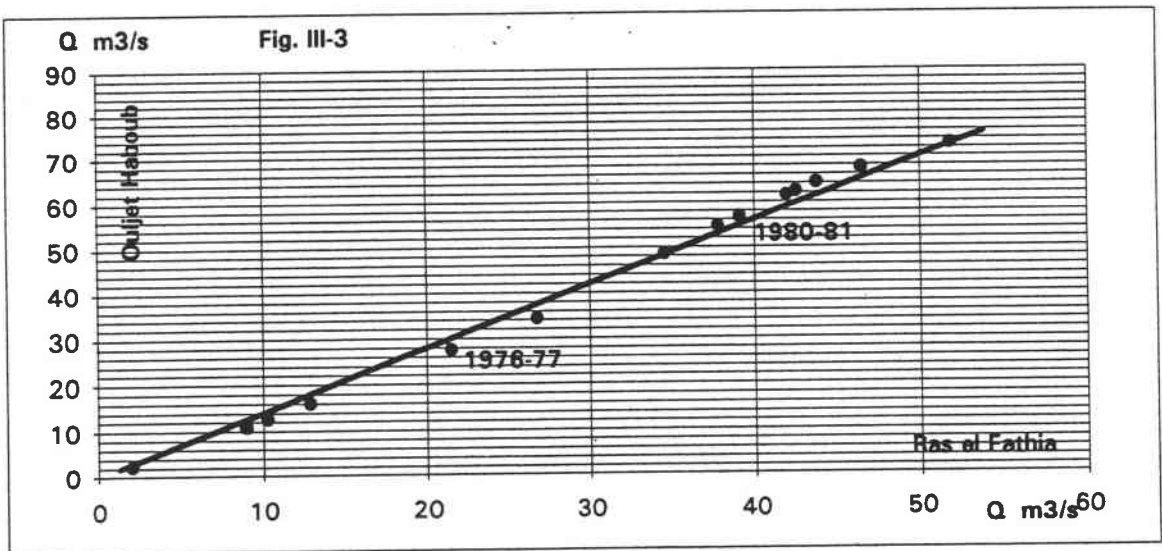
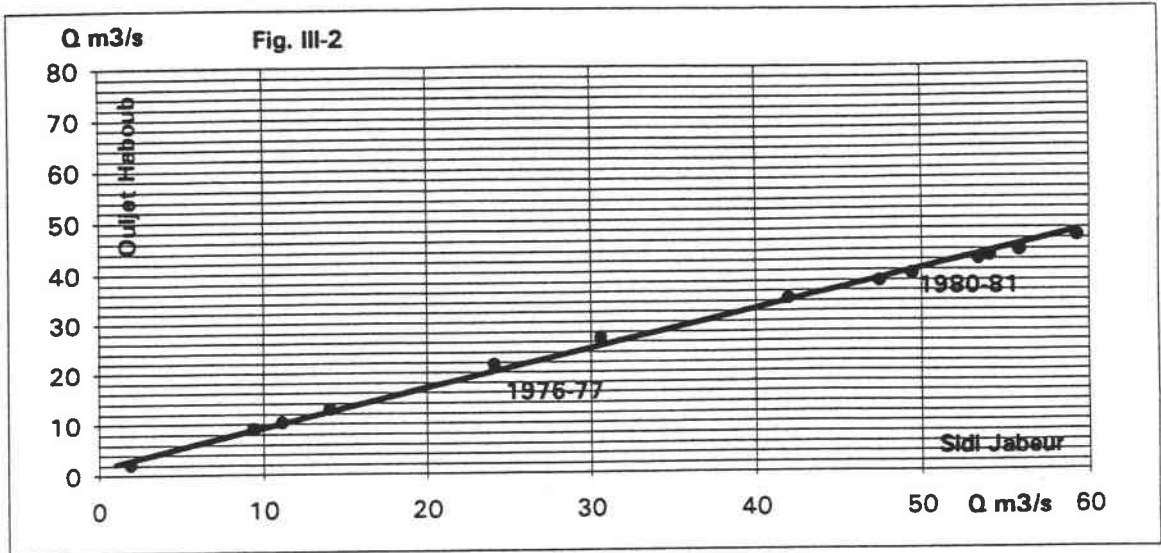
Les figures III-2 à III-4 ont montré que les points du graphe Sidi Jabeur-Ras el Fathia sont bien groupés autour d'une ligne droite. Il existe donc une bonne relation linéaire entre les débits des deux stations de mesure, ceci nous permet de conclure à une bonne homogénéité de ces deux séries d'observations.

Par contre, la station d'Ouljet Haboub s'individualise à partir de l'année 1978-79 : les relations avec les autres stations sont linéaires avant cette date, puis pour les années 1978-79 et 1979-80 les points s'écartent. Les relations semblent ensuite se stabiliser à nouveau autour de la pente de la sous-série 1972-73/1977-78. Il est possible que cette anomalie soit d'ordre climatique et puisse être rapprochée de la situation de 1985-86 où le module d'Ouljet Haboub a été supérieur à ceux des deux stations plus à aval en raison d'une crue exceptionnelle sur le bassin amont (juin 1986). On peut donc penser que le bassin amont a un comportement assez indépendant des bassins aval mais il faudrait une série d'observations plus longue pour confirmer cette hypothèse. En tout état de cause, nous admettons que l'imparfaite linéarité entre la station amont et les stations aval ressort de la variabilité normale.

2 - La corrélation et le comblement des lacunes

Pour la période d'étude commune (1972-73/85-86), la série des données à la station de Ras el Fathia, la plus récente, présente trois années manquantes

Double cumul aux stations hydrométriques de l'oued Grou



(1972-74). Pour combler cette lacune, nous avons effectué des corrélations entre les données hydrométriques de différents couples de stations. La corrélation est linéaire selon la relation suivante :

$$Y = AX + B$$

Tableau III-1 : Les coefficients de corrélation entre les stations (r) :

X	Y	r	A	B
Ouljet Haboub	Sidi Jabeur	0.965	1.20	0.147
Ouljet Haboub	Ras el Fathia	0.947	1.42	-0.089
Sidi Jabeur	Ras el Fathia	0.995	1.20	-0.342

Les résultats obtenus confirment la bonne relation entre les stations de Sidi Jabeur et de Ras el Fathia, mise en évidence par les doubles cumuls. Celles entre la station d'Ouljet Haboub et les deux autres sont les moins bien réalisées.

Nous avons effectué l'extension des données hydrométriques de la station de Ras el Fathia, aux échelles mensuelle et annuelle, à partir des données de la station de Sidi Jabeur (Cf. annexe III-1), puisque les deux stations sont proches et qu'elles verrouillent pratiquement le même bassin (3067 km², 3540 km²).

3 - Les problèmes des données journalières

Pour une critique plus poussée des données hydrométriques, on a opéré un examen des valeurs journalières mesurées pour les trois stations.

Durant les derniers jours d'octobre 1985, la station amont d'Ouljet Haboub présente des valeurs douteuses.

Les débits moyens journaliers enregistrés à cette station entre le 26^{ème} et le 28^{ème} jour du mois, font apparaître une montée des eaux de l'oued Grou qui atteignent 88 m³ en moyenne journalière le 27 octobre. Cette montée des eaux n'est pas enregistrée aux deux autres stations de Sidi Jabeur et de Ras el Fathia (Cf. Tableau suivant).

Tableau III-2 : Les valeurs douteuses des débits de l'oued Grou en m^3/s à la station d'Ouljet Haboub entre le 26 et le 28 octobre 1985-86

Station	Jours	25 octobre	26 octobre	27 octobre	28 octobre	29 octobre
Ouljet Haboub	Q m^3/s	0.238	(9.69)?	(88)?	(4.53)?	0.855
Sidi Jabeur	Q m^3/s	0.489	0.548	0.4	0.159	0.086
Ras el Fathia	Q m^3/s	0.537	0.431	0.425	0.421	0.35

Pour bien cerner cette situation, on a pu vérifier les mesures journalières des précipitations aux stations avoisinant les trois sous bassins.

Aucune station pluviométrique située dans la partie amont n'a enregistré une quantité de précipitations susceptible de provoquer une montée des eaux de l'oued Grou à une moyenne journalière de $88 \text{ m}^3/\text{s}$ (sauf 4.9 mm à Khenifra et 4.5 à Ouljet Haboub le 24 octobre 1985). Aux stations avoisinant les parties médiane et aval du bassin versant, il n'a pas plu au cours de la dernière décade d'octobre 1985 (0 mm à l'ensemble de stations). L'hypothèse d'éclatement d'un orage très localisé dans la partie amont et qui peut échapper à l'enregistrement aux stations pluviométriques est loin d'être réalisée car un débit de $88 \text{ m}^3/\text{s}$, qui représente une crue à la station amont, ne peut pas se réduire à un débit de $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ vers la station intermédiaire de Sidi Jabeur sur une distance qui ne dépasse pas les 65 Km environ.

Nous avons corrigé les valeurs douteuses de la station amont selon une corrélation des données aux deux stations intermédiaire et aval : les valeurs reconstituées n'ont pas dépassé les $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$ pour ces trois jours. La moyenne mensuelle de ce mois d'octobre à la station d'Ouljet Haboub était de $3.72 \text{ m}^3/\text{s}$ et l'annuelle était de $5.86 \text{ m}^3/\text{s}$. Après avoir corrigé les valeurs pour les trois jours, la moyenne mensuelle n'est plus que de $0.47 \text{ m}^3/\text{s}$ et l'annuelle de $5.35 \text{ m}^3/\text{s}$ (Cf. annexe III-1).

En somme, malgré ces erreurs de mesure dont il nous paraît difficile de déceler l'origine, les séries hydrométriques montrent une assez bonne fiabilité dans l'ensemble et pour les trois stations. Cependant les données journalières non enregistrées à la station de Ras el Fathia en 1972, 1973 et 1974 n'ont pas été reconstituées.

II - LE REGIME DE L'OUED GROU

Les écoulements moyens annuels de l'oued Grou aux trois stations hydrométriques sont analysés dans le cadre temporel en année hydrologique de septembre à août. Ce découpage, défini lors de l'étude climatique, a fixé l'origine de l'année d'étude au moment où les réserves sont à leur niveau minimum (fin de la période sèche).

L'analyse des débits moyens annuels et mensuels aux trois stations hydrométriques permet de définir le régime hydrologique du cours d'eau de l'oued Grou et ses variabilités temporelles et spatiales.

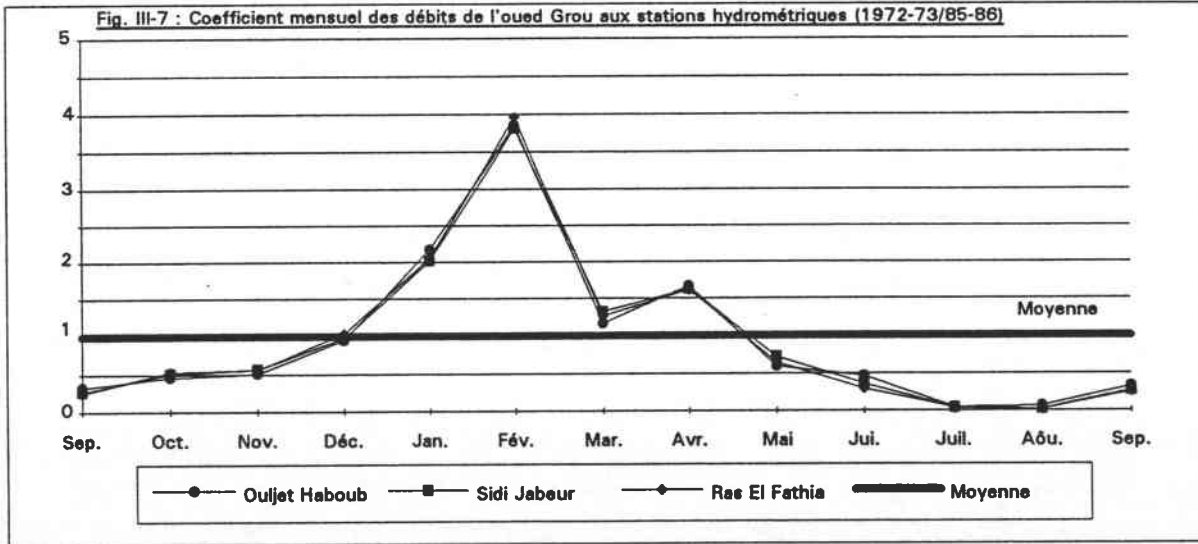
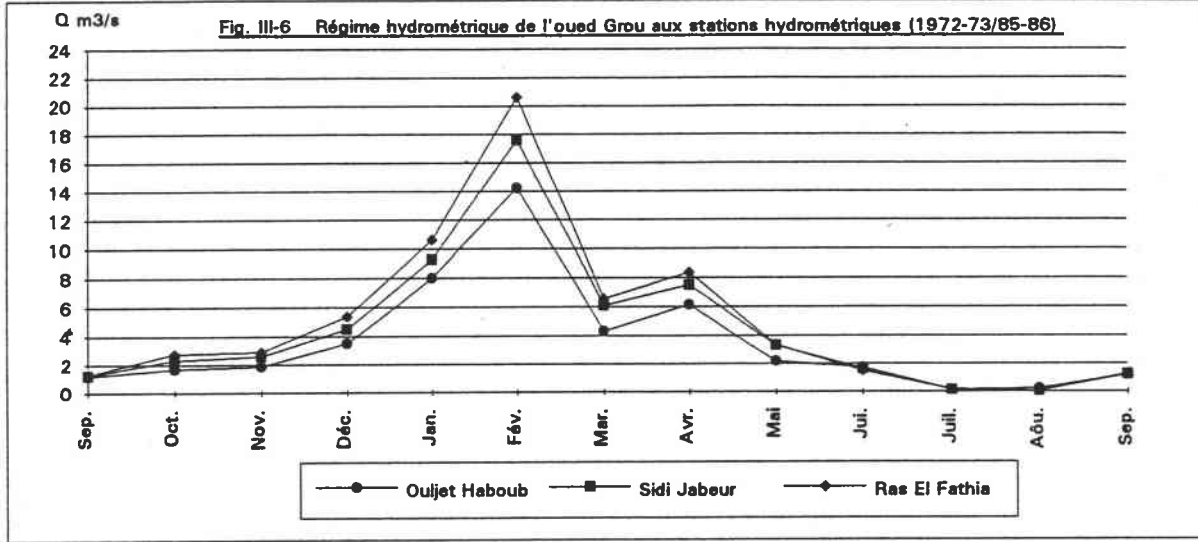
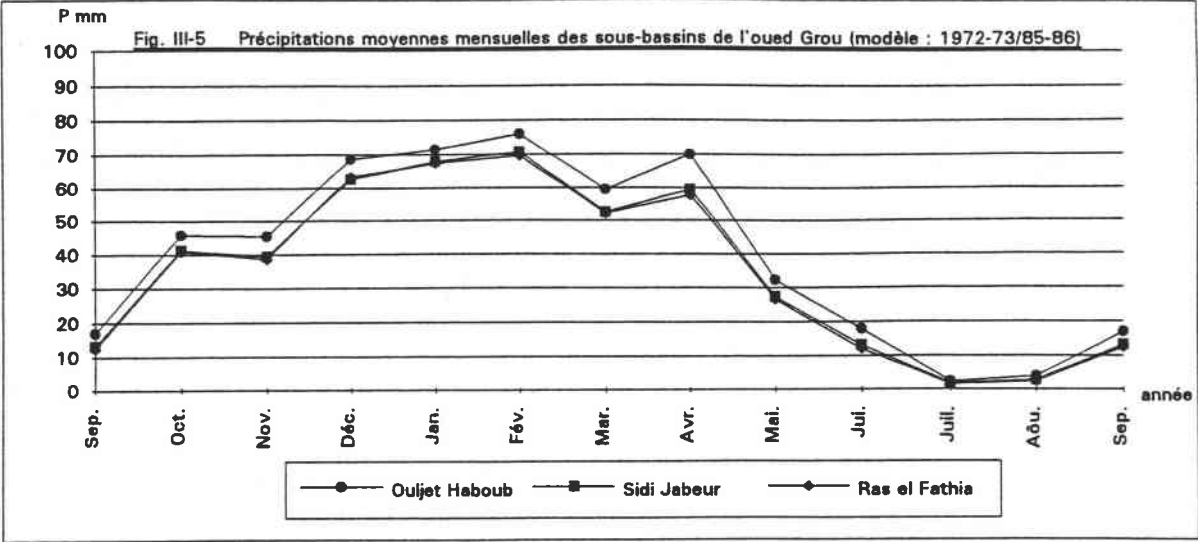
Le coefficient mensuel des débits C.m.D, qui est le rapport des débits moyens mensuels au module de la période considérée, permet de comparer les variations saisonnières du régime de l'oued Grou aux différentes stations (Cf. tableaux, annexe III-1).

A - LES HAUTES EAUX ET LES BASSES EAUX

Comme toutes les rivières du nord-ouest du Maroc, l'oued Grou se caractérise par des hautes eaux hivernales et des basses eaux estivales (Cf. Fig. III-5 et III-7). Mais il existe une nuance spatiale de la durée de ces deux saisons entre les trois bassins.

- La saison des hautes eaux se place en saison pluvieuse de décembre/janvier (décembre pour le bassin aval à Ras el Fathia et janvier pour les bassins à Sidi Jabeur et à Ouljet Haboub) jusqu'en avril. Le maximum est en février pour les trois stations. Le C.m.D marque des rapports assez élevés (jusqu'à 4, en février).

Durant cette saison, les précipitations moyennes mensuelles sont toujours supérieures à 50 mm/ mois. Elles atteignent leur maximum aussi en février pour les trois bassins versants. Il existe un minimum relatif en mars et un maximum secondaire en avril. Pendant cette saison, la courbe des débits suit approximativement celles des précipitations, ce qui montre que toutes les conditions favorisent le ruissellement direct et contribuent à la réalisation de forts débits aux trois bassins (précipitations importantes, surfaces imperméables, évapotranspiration potentielle



faible...). Les débits de cette saison représentent l'essentiel des écoulements annuels, soit 72 % du module, ce qui établit le caractère pluvial du débit hivernal pour l'ensemble du bassin de l'oued Grou.

- La saison des basses eaux, de mai à novembre/décembre, se caractérise par la faiblesse des apports pluviométriques (inférieures à 20 mm de juin à septembre), la prédominance de l'évapotranspiration potentielle intense (de 100 à 170 mm) explique la médiocrité des débits (inférieurs à 2 mm). Le minimum se localise au mois de juillet pour la station amont d'Ouljet Haboub et en août pour les stations intermédiaire de Sidi Jabeur et aval de Ras el Fathia. Les mois d'octobre, novembre et décembre appartiennent à cette période des basses eaux malgré leur intégration dans la saison pluvieuse. Ceci s'explique par l'évapotranspiration potentielle qui reste importante durant les deux premiers mois (octobre et novembre) et par la reconstitution des réserves des sols et du sous-sol qui s'effectue pendant les deux mois de novembre et décembre.

Globalement, l'oued Grou se caractérise par un régime pluvio-évaporal à deux saisons hydrologiques rythmées par le climat méditerranéen. Les précipitations hivernales assurent les écoulements de cette saison avec une évapotranspiration potentielle réduite durant cette période de l'année. La faible pluviosité combinée à une évapotranspiration intense caractérise une baisse des écoulements durant la saison estivale, aggravée par une lithologie essentiellement imperméable.

Le contraste saisonnier se trouve dans les rapports entre les débits moyens mensuels extrêmes aux trois stations hydrométriques, compris entre 87 à Ouljet Haboub et 320 à Sidi Jabeur, ils montrent un régime très excessif. Ceci s'explique d'une part par le contraste entre la saison pluvieuse et la saison estivale, et d'autre part par la nature imperméable de la lithologie (dépourvue de nappes) qui favorise l'écoulement direct en saison pluvieuse et qui ne permet pas le soutien des écoulements de surface en saison estivale.

B - L'ABONDANCE ET LE PROFIL HYDROLOGIQUE DE L'OUED GROU

L'oued Grou est parmi les moins abondants des cours d'eau pérennes du Maroc : c'est un cours d'eau fortement indigent, à l'abondance spécifique largement inférieure à 10 l/s/km² (Cf. tableau III-3). Les modules aux trois stations hydrométriques, pour la période d'étude (1972-73/1985-86), montrent une faible

progression de l'amont vers l'aval, en relation avec la taille du bassin versant (Cf. Fig. III-8).

Tableau III-3 : Modules moyens annuels de l'oued Grou aux différentes stations hydrométriques (1972-73/1985-86)

bassin versant	S (km ²)	Roche perméable (%)	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (mm)
Ouljet Haboub	1627	8	3,70	2,27	71.8
Bassin versant intermédiaire de Sidi Jabeur	1440	2	0.91	0.63	19.9
Sidi Jabeur	3067	10	4,61	1,50	47.4
Bassin versant intermédiaire Ras el Fathia	473	3	0.59	1.25	39.4
Ras el Fathia	3540	13	5.20	1,47	46.3

avec :

$$\text{Débit spécifique : } q \text{ (l / s / km}^2\text{)} = \left(\frac{Q \text{ (m}^3 \text{ / s)}}{S \text{ (km}^2\text{)}} \right) \times 10^3$$

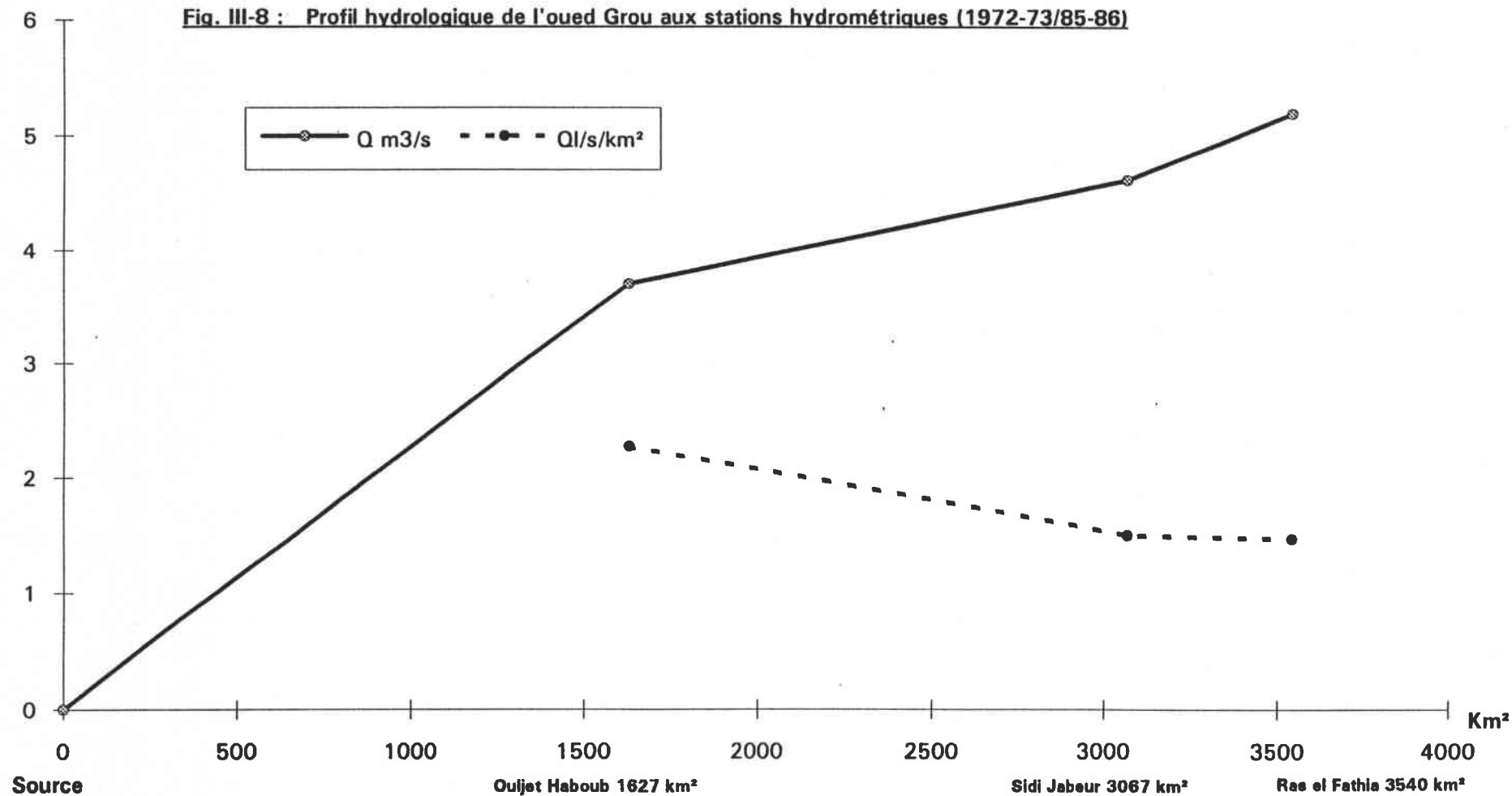
$$\text{Lame d'eau écoulée } E \text{ (mm)} = q \text{ (l / s / km}^2\text{)} \times \Delta T 10^{-6} \text{ seconde}$$

$$\text{Constante de temps } \Delta T = \text{nombre de jours du pas de temps} \times 86400 \text{ secondes / jour}$$

et S = surface du bassin versant en km².

En effet, on constate que l'apport du bassin versant de l'oued Grou connaît des variations spatiales très importantes. A la station amont d'Ouljet Haboub, le module annuel représente 71 % des écoulements mesurés à la station aval de Ras el Fathia, pour 46 % de la surface. Les apports des bassins intermédiaire et aval sont très modestes ; cependant, les rendements du bassin versant intermédiaire de Sidi

Fig. III-8 : Profil hydrologique de l'oued Grou aux stations hydrométriques (1972-73/85-86)



Jabeur sont 2 fois plus faibles que ceux du bassin intermédiaire de Ras el Fathia : si l'on écarte la possibilité d'une mauvaise estimation des débits à l'une des deux stations, on peut voir dans cet écart le rôle des surfaces plus perméables du bassin intermédiaire de Ras el Fathia (+ 3 %). Mais on ne peut, à priori, écarter l'hypothèse d'une surestimation ou d'une sous-estimation systématiques de l'une ou de l'autre station.

Cette variation spatiale de l'écoulement à l'échelle du bassin versant de l'oued Grou permet, en effet, la comparaison des bassins d'étendues différentes, elle synthétise l'interaction des divers facteurs physiques (Indices de forme et de relief perméabilité, densité de drainage...) et climatiques. Néanmoins, l'évolution globale entre l'amont et l'aval, traduit bien les effets du caractère semi-aride agissant sur plus des 3/4 du bassin versant, se manifestant par des faibles précipitations et une évapotranspiration potentielle importante qui dépasse les 1100 mm.

Aux variations spatiales du module global, s'ajoute une irrégularité interannuelle caractérisant l'écoulement de l'oued Grou, artère caractéristique de la bordure sud et sud-ouest du Plateau Central marocain.

C - L'IRREGULARITE DES DEBITS MOYENS ANNUELS

Les modules annuels des débits de l'oued Grou varient considérablement d'une année à l'autre et montrent des écarts importants comme l'indiquent les valeurs du tableau III-4 . L'année 1976-77 est l'année la plus abondante à la station amont d'Ouljet Haboub (8.73 m³/s). A la station intermédiaire de Sidi Jabeur et à celle de Ras el Fathia située plus vers l'aval, le maximum est enregistré en 1978-79. L'année la plus sèche est 1982-83 pour les trois stations. Cette coïncidence entre les trois stations pour l'année la plus sèche est due à la sécheresse exceptionnelle qui a affecté l'ensemble du Maroc plus de quatre années successives (1980-1985).

L'irrégularité du régime peut être approchée de deux manières : par une quantification statistique et par une recherche d'une éventuelle organisation chronologique de l'évolution des débits.

1 - La quantification statistique de l'irrégularité

Le coefficient d'irrégularité ou d'immodération (R) traduit le rapport du débit moyen de l'année la plus abondante et le débit moyen de l'année la plus maigre de la période (Cf. tableau suivant).

Tableau III-4 : Les débits moyens annuels des années extrêmes de la période d'étude (1972-73/85-86)

Stations	module m ³ /s (1972-1986)	année la plus sèche			année la plus humide		
		année	P (mm)	Q m ³ /s	année	P (mm)	Q m ³ /s
Ouljet Haboub	3.70	1982-83	320	0,59	1976-77	696	8.73
Sidi Jabeur	4.61	1982-83	307	0,71	1978-79	664	12.04
Ras el Fathia	5.20	1982-83	311	0,87	1978-79	676	14.82

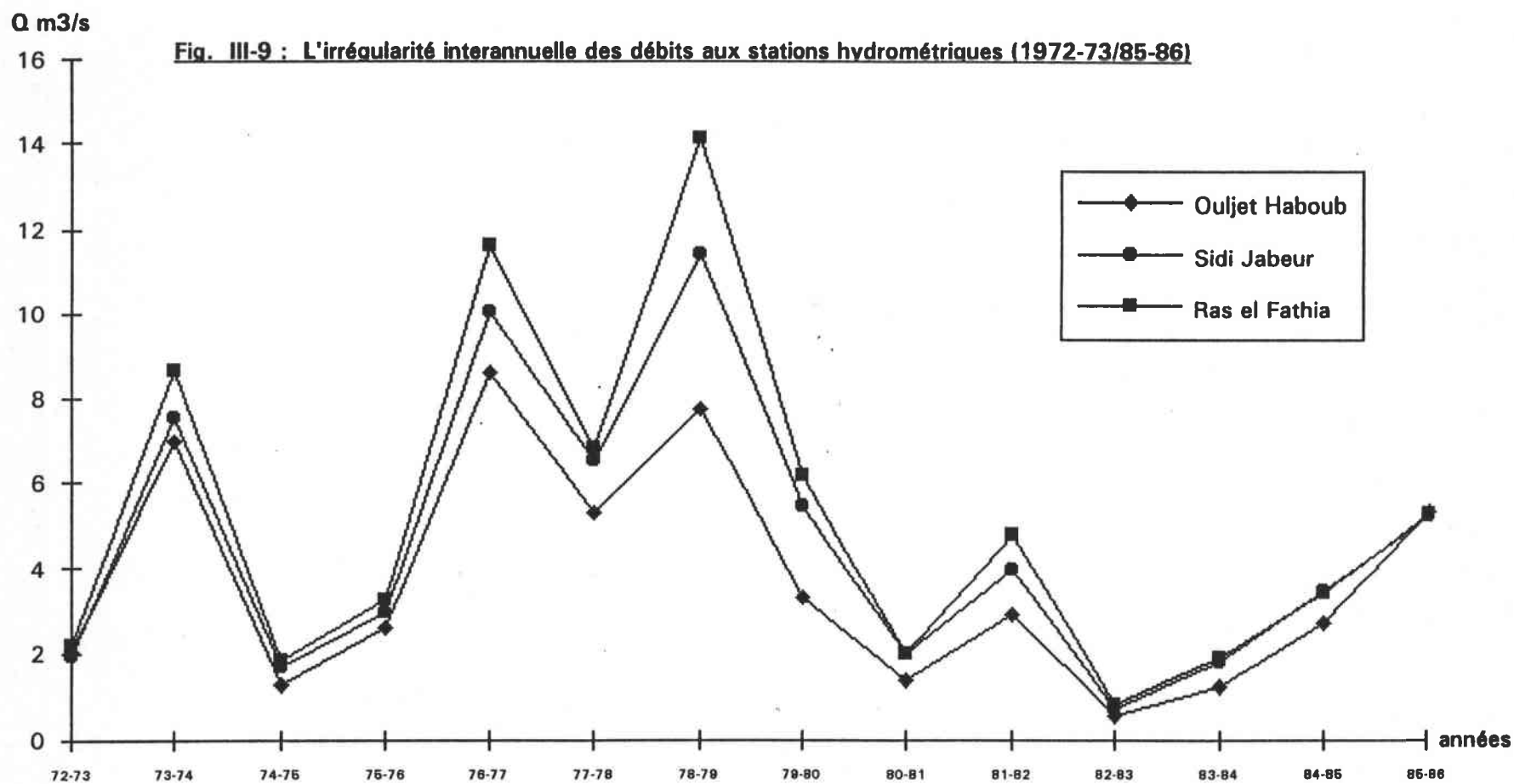
Les valeurs du coefficient d'irrégularité sont de l'ordre de 15 à 17. L'amplitude des variations des débits moyens annuels est plus forte que celle des précipitations, le rapport entre les années d'extrêmes pluviométriques étant inférieur à 2.2 pour les trois bassins versants. Les écoulements montrent leur forte liaison avec les précipitations, desquelles il faut soustraire l'évapotranspiration. Le rendement hydrologique du bassin versant est important en année de fortes précipitations ; inversement, en année sèche, les écoulements sont très médiocres.

L'irrégularité interannuelle (Cf. Fig. III-9) est montrée également par les valeurs de l'écart type ou mieux, par le coefficient de variation (C.V. de l'ordre de 0.7). La forte variabilité caractérise l'ensemble du bassin versant de l'oued Grou. Elle est particulièrement accentuée pour la période d'étude car il s'agit d'une période climatique hétérogène (années humides et années sèches).

2 - L'organisation chronologique de l'irrégularité

La représentation graphique de l'hydraulicité et les méthodes du simple cumul et du CUSUM (Cf. Fig. III-10 à III-12 et annexes II-2 et III-3) permettent à la fois de contrôler l'évolution des écoulements au cours de la période d'étude et de mettre en évidence, pour les différents bassins versants, les séquences humides et les séquences sèches.

Les résultats obtenus par le CUSUM ont montré que les courbes des données hydrométriques ne dépassent pas les limites de la bande passante optimum à aucune station, ce qui semble donc montrer que ces stations ont des données



généralement homogènes pour la période d'étude. D'après les graphiques de l'hydraulicité du CUSUM et du simple cumul (Cf. Fig. III-10 à III-12 et annexe III-3), on constate que les points se repartissent selon plusieurs segments de droite montrant des tendances très certainement liées à des fluctuations climatiques (succession d'années sèches ou d'années humides). Ainsi, les trois graphiques nous présentent les mêmes caractéristiques avec deux grandes cassures autour de 1975-76 et 1980-81. Ces deux cassures sont dues à la succession d'une séquence contrastée jusqu'en 1975-76, puis une séquence humide à partir de 1976-77 et une séquence sèche bien marquée à partir de 1980-81 (1979-80 pour le bassin amont à Ouljet Haboub).

Il ressort aussi, de cette étude des modules annuels, que les stations étudiées ont des variations interannuelles de débits comparables. Cette variabilité, forte dans l'ensemble, est bien liée à l'alimentation pluviale de l'oued Grou. L'absence d'apports des réserves en eaux souterraines (bassin essentiellement imperméable) accentue encore le phénomène, notamment durant les années sèches, ce qui explique que les contrastes des modules aux différentes stations sont bien liés aux fluctuations climatiques de la période d'étude.

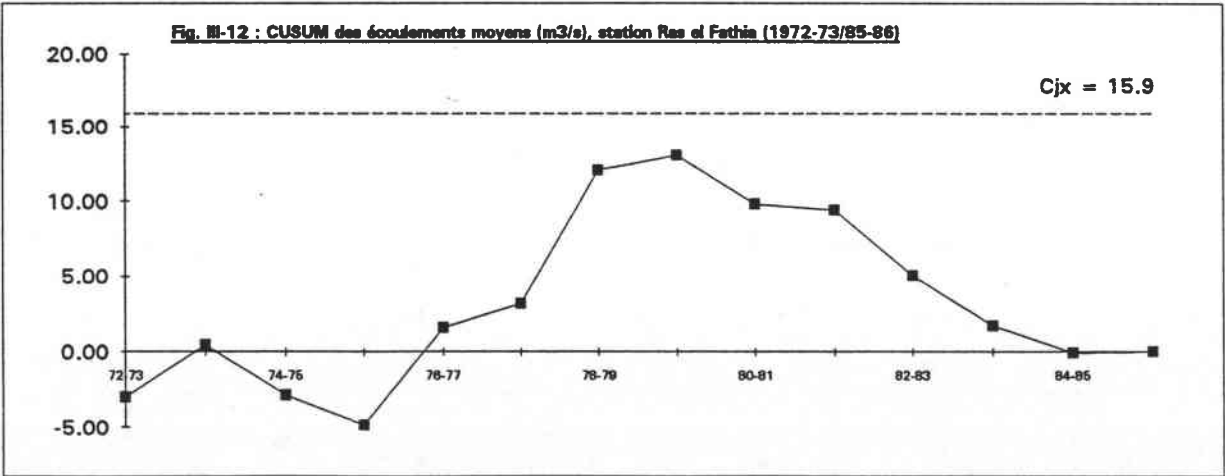
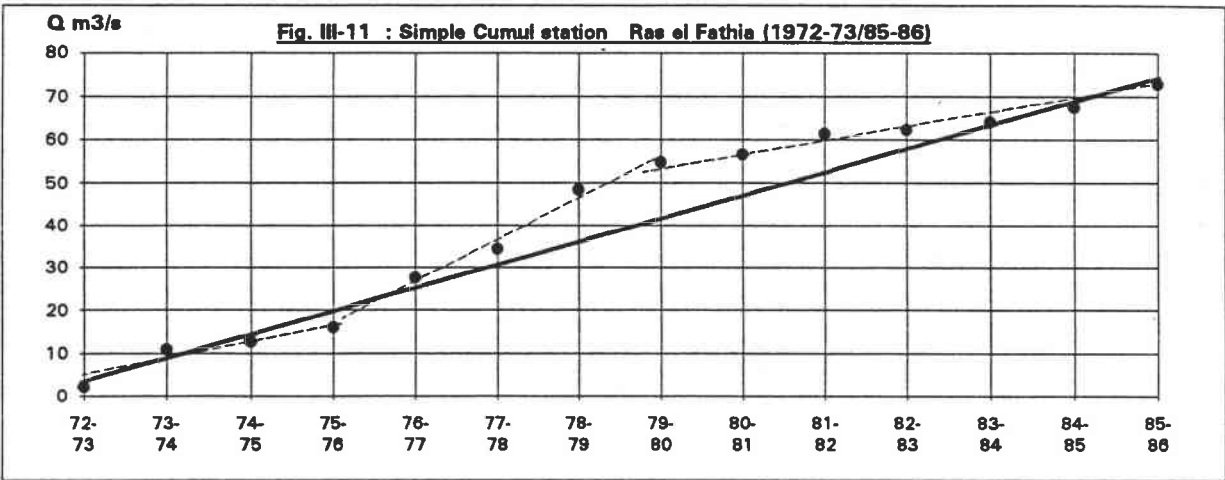
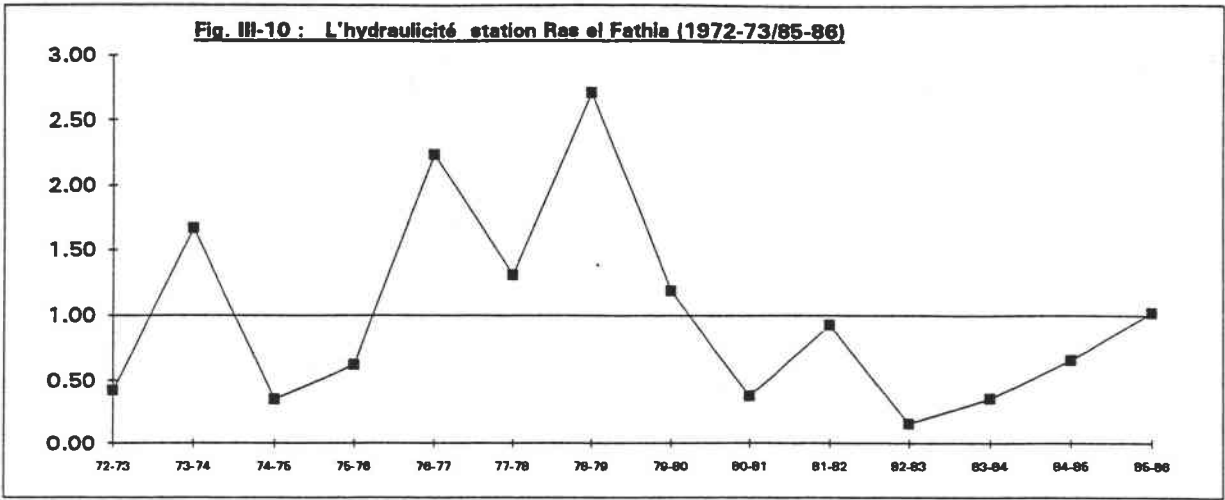
Cependant, ces considérations générales ne peuvent pas aboutir à une approche complète du comportement hydrologique de l'ensemble du bassin versant de l'oued Grou. Il est donc nécessaire d'étudier l'évolution des débits à l'échelle mensuelle.

D - L'IRREGULARITE DES DEBITS MOYENS MENSUELS

L'hétérogénéité de la période d'observation (1972-73/1985-86) paraît plus évidente encore à l'échelle mensuelle pour les trois stations hydrométriques. En fait, les débits moyens mensuels de l'oued Grou paraissent largement déterminés par cette hétérogénéité de la période d'étude (succession des années humides et des années sèches).

Les coefficients de variation des débits moyens mensuels donnent des valeurs élevées, supérieures à 1 pour tous les mois de l'année aux trois stations.

Ce sont les débits moyens mensuels de juin à octobre qui varient le plus pour les trois stations (Cf. tableaux, annexes III-1 et III-2). Le mois de mars connaît le plus faible coefficient de variation, les débits durant ce mois paraissent plus réguliers aux trois stations.



Les mois hivernaux, de janvier à avril, ont aussi des coefficients de variations importants : ils sont entre 1.02 et 1.85 pour les trois stations.

De même, la comparaison des courbes des débits des années extrêmes (les deux années les plus abondantes, 1976-77 et 1978-79, et l'année 1982-83, la plus sèche aux trois stations) montre bien ce contraste entre les débits du même mois. Il est plus marqué pour les mois des hautes eaux que pour les mois des basses eaux (Cf. Fig. III-13 à III-15). L'irrégularité est donc conditionnée par les débits de la saison des hautes eaux pour l'ensemble. Il est alors bien reliée à celle des précipitations.

Pour terminer l'étude de la variabilité des débits aux stations hydrométriques, il est important d'en préciser l'aspect statistique par une étude fréquentielle des débits.

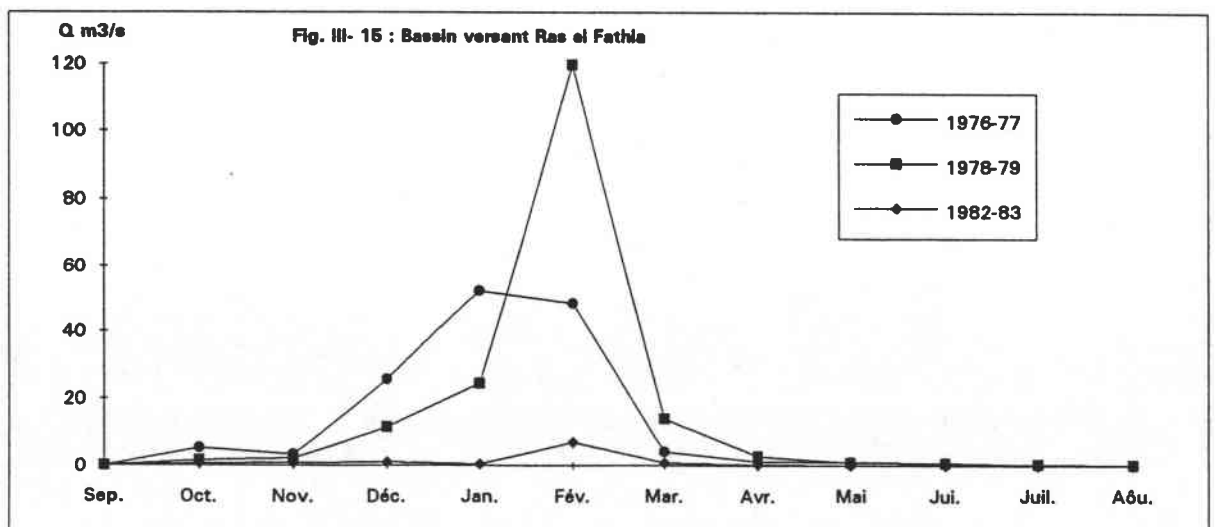
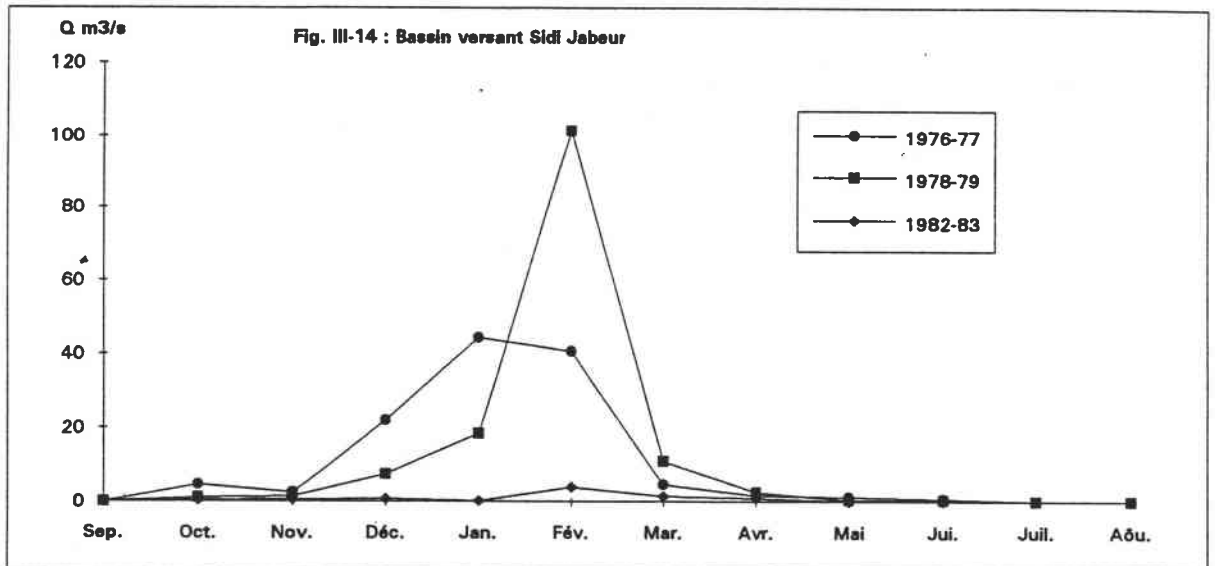
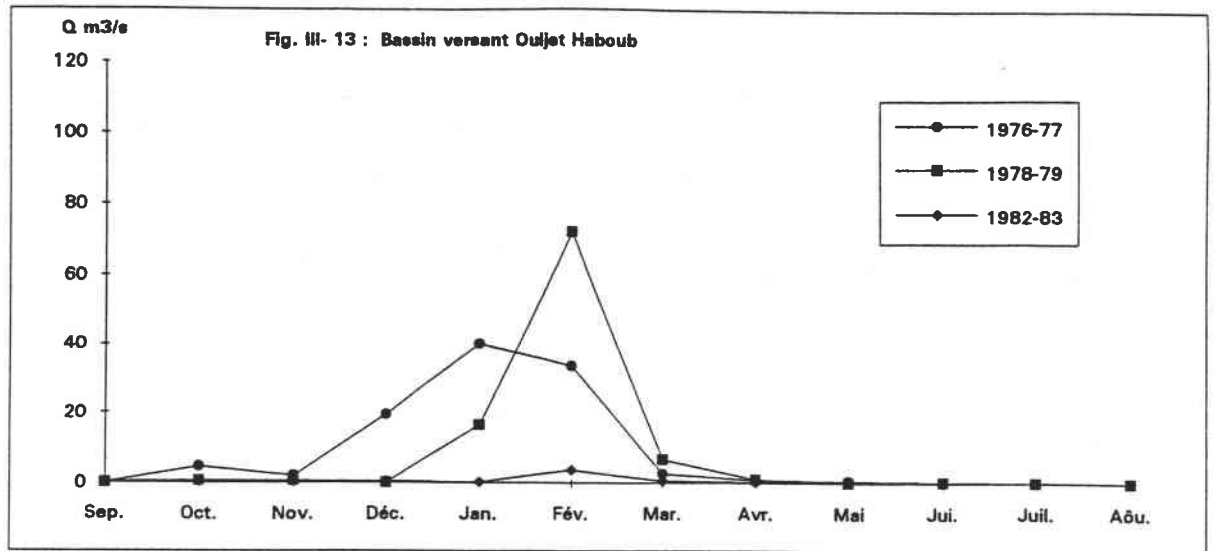
E - L'ETUDE FREQUENTIELLE DES ECOULEMENTS

L'étude fréquentielle permet de compléter la connaissance de l'irrégularité interannuelle de l'écoulement de l'oued Grou aux trois stations hydrométriques. Le calcul des valeurs fréquentielles nécessite une étude préalable de la fonction de répartition s'ajustant le mieux à la distribution des échantillons ; cette fonction permet de déterminer les débits caractéristiques pour les fréquences de dépassement 1/5 et 1/10, tant vers l'humide que vers le sec.

Pour une étude comparative entre les lames d'eau précipitées sur le bassin versant et l'écoulement, nous avons utilisé dans notre analyse statistique les valeurs des lames d'eau écoulées en millimètres (E). Le test des lois d'ajustement des modules annuels des échantillons a montré que la loi Log-normale donne le meilleur ajustement pour les débits aux trois stations à l'échelle annuelle, mensuelle et saisonnière. Quant aux précipitations annuelles des bassins calculées à l'aide du modèle de répartition spatiale, elles semblent suivre une la loi normale. Le choix de la loi s'appuie sur les valeurs du test d'adéquation de Kolmogrov-Smirnov (*D*) et sur l'écart type résiduel (Voir deuxième partie, climat).

En considérant que l'on calcule des débits fréquents sur une période contrastée composée exclusivement d'années sèches et d'années humides, les écarts entre les débits fréquents caractéristiques décennaux secs et humides sont importants à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle.

Débits moyens mensuels des années extrêmes



1 - Les débits fréquents caractéristiques annuels

Les figures (Cf. Fig. III-16 à III-17 et annexe III-4) visualisent les ajustements des débits et des précipitations annuelles. Ainsi, on a extrait pour les différents bassins versants les valeurs fréquentielles caractéristiques pour les fréquences de dépassement 1/5, 1/10, tant vers l'humide que vers le sec (Cf. tableaux : III-5 à III-7).

Les résultats montrent que le rapport entre les débits caractéristiques des fréquences décennales humide (0.9) et sèche (0.1) est compris entre 7,5 à Sidi Jabeur, 8.6 à Ouljet Haboub et 10 à Ras el Fathia :

- vers l'humide, les débits sont importants à l'ensemble de stations. L'accroissement des écoulements est plus rapide que celui des précipitations ; les rapports sont de l'ordre de 1.4 pour les précipitations et de l'ordre de 2.8 pour les débits. Pour la période de retour de 5 ans, les débits sont dépassés 3 fois pour l'ensemble des stations (1973-74, 1976-77 et 1978-79). Pour la période de retour de 10 ans, les débits sont dépassés deux fois aux stations intermédiaire de Sidi Jabeur et aval de Ras el Fathia, (1976-77 et 1978-79) et une fois à la station amont d'Ouljet Haboub (1976-77). La durée de retour théorique de la valeur observée la plus élevée est plus forte sur le bassin aval à Ras el Fathia : 18 ans (14 ans pour Sidi Jabeur et 12 ans pour Ouljet Haboub) ; ces valeurs restent globalement proches de la durée de la période d'étude (14 ans).

- vers le sec, les écoulements décroissent plus vite que les apports pluviométriques dans l'ensemble du bassins versant (65 % pour les débits et 25 % pour les précipitations). Pour la période de retour de 5 ans, les débits sont dépassés 4 fois à la station amont d'Ouljet Haboub et aval de Ras el Fathia, 3 fois à la station intermédiaire de Sidi Jabeur. Pour la période de retour de 10 ans, les débits sont dépassés une seule fois pour les trois stations en 1982-83. La durée de retour théorique de la valeur observée la plus faible, qui correspond à l'année 1982-83 exceptionnellement sèche, est plus longue sur le bassin intermédiaire à Sidi Jabeur : 53 ans (42 ans pour Ouljet Haboub et 37 ans pour Ras el Fathia). Ceci évoque le comportement particulier de ce secteur où globalement les écoulements sont les moins bien soutenus.

Ajustement des précipitations et débits moyens annuels du bassin versant de l'oued Grou (1972-73/85-86)

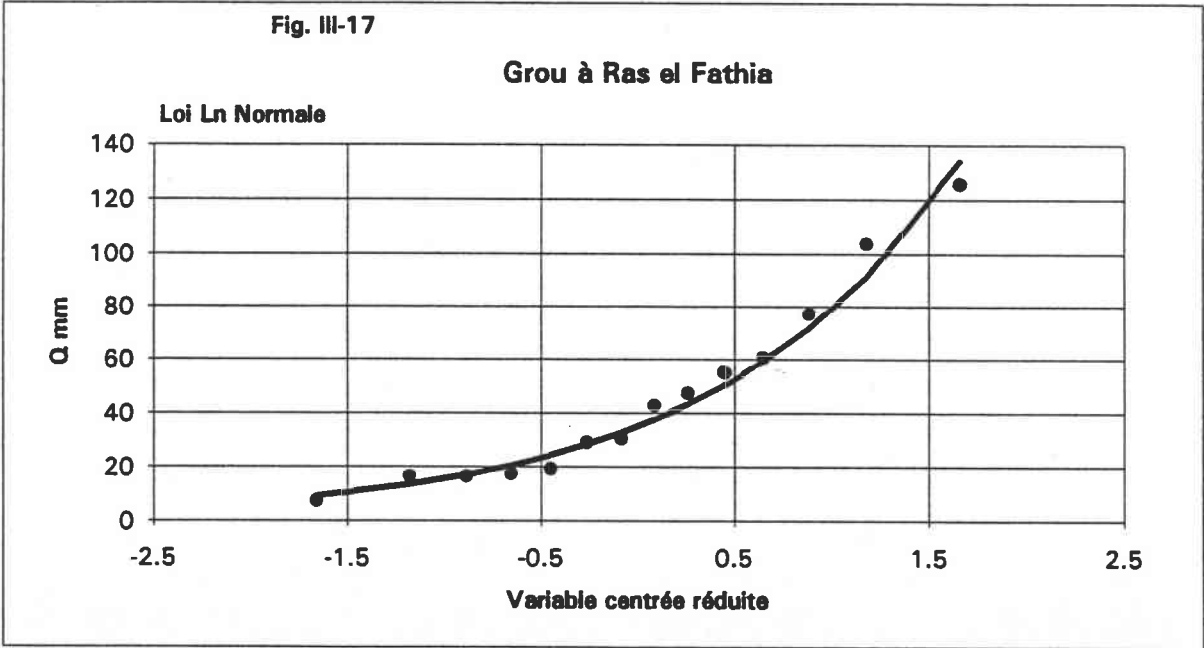
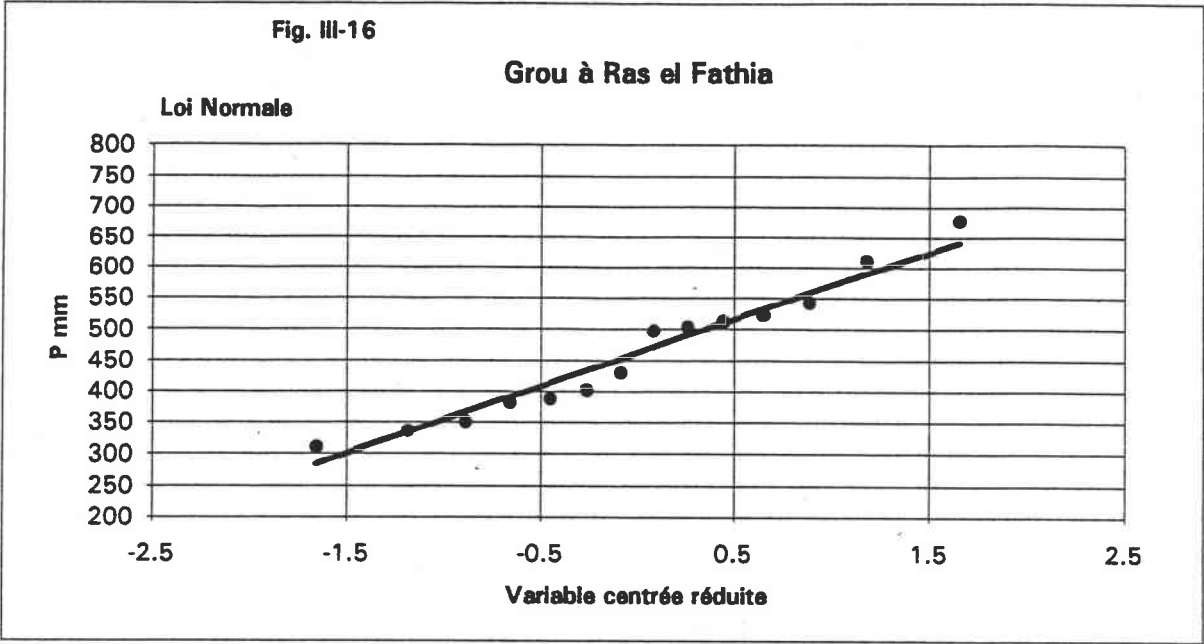


Tableau III-5 : Ajustements des Précipitations annuelles caractéristiques à une loi Normale (1972-73/85-86)

Bassin versant	Moyenne	d*	Mode	Ecart type résiduel	Fréquences						Année la plus humide			Année la plus sèche			
					F 0,1	F 0,2	Médiane	F 0,8	F 0,9	P (mm)	année	Fréquences	Durée de retour	P (mm)	année	Fréquences	Durée de retour
Oueljet Haboub	628	0.107	489	25.2	380	431	528	626	677	696	76-77	0.926	14	320	82-83	0.036	28
Sidi Jabeur	469	0.068	439	11.4	343	386	469	551	594	664	78-79	0.977	43	307	82-83	0.060	20
Ras el Fathia	461	0.132	426	17.1	323	370	461	552	599	676	78 - 79	0.977	43	311	82-83	0.082	12

Tableau III-6 : Ajustements des lames d'eau écoulées annuelles caractéristiques à une loi Log-normale (1972-73/85-86)

Stations	Moyenne	d*	Mode	Ecart type résiduel	Fréquences						Année la plus humide			Année la plus sèche			
					F 0,1	F 0,2	Médiane	F 0,8	F 0,9	Q (mm)	année	Fréquences	Durée de retour	Q (mm)	année	Fréquences	Durée de retour
Oueljet Haboub	71.8	0.106	28.4	16.2	19.4	27.7	64.7	108	155	167	76-77	0.915	12	11.1	82-83	0.024	42
Sidi Jabeur	47.4	0.092	19.3	6.79	13.1	18.6	36.4	71.3	101	117	78-79	0.929	14	7.0	82-83	0.019	53
Ras el Fathia	46.3	0.092	18.1	6.16	12.4	17.7	34.9	69.1	98.6	126	78-79	0.943	18	7.4	82-83	0.027	37

Tableau III-7 : Ajustements des débits annuels caractéristiques à une loi Log-normale (1972-73/85-86)

Stations	Moyenne	d*	Mode	Ecart type résiduel	Fréquences						Année la plus humide			Année la plus sèche			
					F 0,1	F 0,2	Médiane	F 0,8	F 0,9	Q (m3/s)	année	Fréquences	Durée de retour	Q (m3/s)	année	Fréquences	Durée de retour
Oueljet Haboub	3.70	0.106	1.5	0.79	0.9	1.5	3.3	5.7	7.2	8.61	76-77	0.915	12	0.67	82-83	0.024	42
Sidi Jabeur	4.61	0.092	1.9	0.66	1.3	1.8	3.5	6.9	9.8	11.4	78-79	0.929	14	0.68	82-83	0.019	53
Ras el Fathia	6.20	0.092	2	0.68	1.4	2.0	3.9	7.8	11.1	14.1	78-79	0.943	18	0.83	82-83	0.027	37

Tableau III-8 : Ajustements des lames d'eau écoulées saisonnières caractéristiques à une loi Log-normale : saison hivernale (1972-73/85-86)

Stations	Moyenne	d*	Mode	Ecart type résiduel	Fréquences						Année la plus humide			Année la plus sèche			
					F 0,1	F 0,2	Médiane	F 0,8	F 0,9	Q (mm)	année	Fréquences	Durée de retour	Q (mm)	année	Fréquences	Durée de retour
Oueljet Haboub	51.4	0.140	6.67	24.8	6.22	10.7	30.3	85.8	148	147	78-79	0.9	10	2.93	80-81	0.029	35
Sidi Jabeur	33.7	0.128	5.85	8.81	4.94	8.11	21.0	64.4	89.3	108	78-79	0.927	14	2.95	83-84	0.041	24
Ras el Fathia	33.3	0.082	5.99	6.68	4.97	8.10	20.7	62.8	86	113	78-79	0.937	16	2.84	80-81	0.037	27

Tableau III-9 : Ajustements des lames d'eau écoulées saisonnières caractéristiques à une loi Log-normale : saison estivale (1972-73/85-86)

Stations	Moyenne	d*	Mode	Ecart type résiduel	Fréquences						Année la plus humide			Année la plus sèche			
					F 0,1	F 0,2	Médiane	F 0,8	F 0,9	Q (mm)	année	Fréquences	Durée de retour	Q (mm)	année	Fréquences	Durée de retour
Oueljet Haboub	20.4	0.142	7.14	6.29	5.01	7.35	15.4	32.2	47.9	45.3	76-77	0.891	9	2.73	78-79	0.024	42
Sidi Jabeur	13.7	0.109	6.33	3.48	4.26	6.92	11.2	21.1	29.4	27.2	76-77	0.88	8	1.64	82-83	0.006	167
Ras el Fathia	13.1	0.147	5.94	2.76	4	5.58	10.6	20.1	28	28.6	79-80	0.906	11	1.68	82-83	0.006	167

d* Test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov

Cette étude statistique montre que les modules annuels évoluent globalement dans le même sens que les précipitations annuelles. Mais ce caractère ne saurait pas à lui seul expliquer l'évolution des modules en années particulières. L'évolution dépend aussi des différents facteurs physiographiques accentuant l'influence des irrégularités interannuelles climatiques, aux différentes parties du bassin versant.

2 - Les débits fréquents caractéristiques des hautes et basses eaux

Du fait du caractère sec de la saison des basses eaux, certains mois (juillet, août et septembre) ont des débits moyens mensuels nuls en années particulières. Il nous paraît intéressant d'étudier les débits fréquents de cette saison et ceux de la saison des hautes eaux pour une étude comparative aux trois stations. D'autre part, dans le milieu méditerranéen sub-aride, il est intéressant de caractériser la sévérité de la saison des basses eaux toute entière. Ceci permettra de comprendre plus facilement les débits mensuels d'étiage que nous analysons plus loin. Les résultats sont reportés dans les tableaux : III-8 et III-9.

Les hautes eaux : le rapport entre les débits caractéristiques des fréquences décennales humide (0.9) et sèche (0.1) est compris entre 23.8 à Ouljet Haboub, 18,1 à Sidi Jabeur et 17.3 à Ras el Fathia :

- vers l'humide, les écoulements sont abondants. Pour la période de retour de 5 ans, les débits fréquents sont dépassés 3 fois, à l'ensemble de stations. Pour la période de retour de 10 ans, ils sont dépassés une seule fois, en 1978-79, pour les trois stations. La durée de retour théorique de la valeur observée la plus élevée est plus forte sur le bassin aval à Ras el Fathia : 16 ans (14 ans pour Sidi Jabeur et 10 ans pour Ouljet Haboub). Ces valeurs comme celles obtenues pour les débits moyens annuels sont proches de la durée de la période d'étude.

- vers le sec, les débits de la période de retour de 5 ans sont dépassés 3 fois pour les trois stations. Pour la fréquence 0.1, ils sont dépassés 2 fois aux trois stations, en 1980-81 et 1983-84. La durée de retour théorique de la valeur observée la plus élevée est plus forte sur le bassin amont à Ouljet Haboub : 35 ans (27 ans pour Ras el Fathia et 24 ans pour Sidi Jabeur).

Les basses eaux : le rapport entre les débits caractéristiques décennaux secs et humides est entre 9.4 à Ouljet Haboub, 7 à Ras el Fathia et 6.8 à Sidi Jabeur :

- vers l'humide, les débits de la période de retour de 5 ans sont dépassés 4 fois à la station amont d'Ouljet Haboub, 3 fois à la station aval de Ras el Fathia et 2 fois à la station intermédiaire de Sidi Jabeur. Pour la période de retour de 10 ans, ils ne sont dépassés qu'une seule fois à Ras el Fathia. La durée de retour théorique de la valeur observée la plus élevée est plus grande sur le bassin aval à Ras el Fathia : 11 ans (9 ans pour Ouljet Haboub et 8 ans pour Sidi Jabeur).

- en basses eaux sévères, les débits caractéristiques de la période de retour de 5 ans sont dépassés 2 fois pour l'ensemble des stations. Pour la fréquence 0.1, ils sont dépassés 2 fois à la station amont d'Ouljet Haboub et celle intermédiaire de Sidi Jabeur et une seule fois à la station aval de Ras el Fathia. La durée de retour théorique de la valeur observée la plus basse est plus forte sur les bassins de Sidi Jabeur et de Ras el Fathia : 167 ans (42 ans pour Ouljet Haboub). Ce qui s'explique par la forte variabilité de la période d'étude et le degré de la sécheresse exceptionnelle de l'année 1982-83.

Aussi peut-on retenir de cette étude quelques indications quant au comportement des différentes parties du bassin. La partie amont est celle où les débits saisonniers sont en général les plus élevés, en saison de hautes et basses eaux. Les débits extrêmes les plus observés s'y manifestent les plus rarement (temps de retour le plus long). Vers l'aval, les comportements sont plus variables. Les valeurs extrêmes des débits saisonniers observés ont les durées de retour les plus courtes à Ras el Fathia à l'extrême aval du bassin. C'est donc là que les conditions extrêmes semblent se reproduire le plus fréquemment.

3 - Les débits fréquentiels mensuels

Pour rendre possible les calculs de l'étude fréquentielle des débits mensuels, compte tenu de l'existence des débits nuls, nous avons procédé en deux temps :

- une étude statistique sur les débits non nuls,
- une reconstitution des fréquences par le calcul suivant :

$$F_{rec.} = F_{exp. \text{ des débits nuls}} + (F_{car.} \times F_{exp. \text{ des débits non nuls}})$$

$$\text{et } \ln Q_F = (\text{Moyenne } \ln Q) \pm u (\text{Ecart type } \ln Q)$$

avec :

F_{rec} : Fréquence reconstituée,

F_{exp} : Fréquence expérimentale

F_{car} : Fréquence caractéristique

Ln : Log des valeurs

u : variable de Gauss

exemple : F reconstituée $(0.9) = 0.29 + (0.86 \times 0.71)$

ou encore F reconstituée $(0.929) = 0.29 + (0.9 \times 0.71)$

L'analyse des figures III-18 à III-20 et les valeurs du tableau III-10 montre que les écarts relatifs entre les débits fréquentiels sont très importants, ce qui reflète le caractère de forte irrégularité des débits moyens mensuels entre les années humides et les années sèches; le rapport des débits fréquentiels décennaux secs et humides prend des valeurs élevées concernant les mois des hautes eaux. Pour la période des basses eaux, le rapport n'a pas de signification puisque les valeurs tendent vers l'infini dès que le débit tend vers 0.

Ceci montre encore que les débits fréquentiels dépendent de la pluviométrie correspondante, car la quasi inexistence de nappes ne permet pas le soutien des débits lorsqu'il ne pleut plus. Inversement durant la période estivale sèche toutes les conditions sont favorables pour des faibles débits. Pour les mois secs, l'étude rejoint celle des débits d'étiage, ci-après.

L'étude du régime de l'oued Grou a fait apparaître une grande irrégularité des débits dans le temps ainsi que dans l'espace. Conditionnée par celles des précipitations, elle correspond à la réponse d'un cours d'eau qui draine un bassin essentiellement imperméable. Ce sont là les caractéristiques principales du comportement hydrologique du cours d'eau. Nous allons les retrouver en étudiant les débits extrêmes qui font référence, pour des pas de temps plus courts, à des événements précis. Ainsi, en années particulières par exemple, l'oued Grou est complètement à sec durant plusieurs jours (144 jours en 1983). Nous allons donc analyser ces débits extrêmes du point de vue de leur genèse, de leur évolution dans le

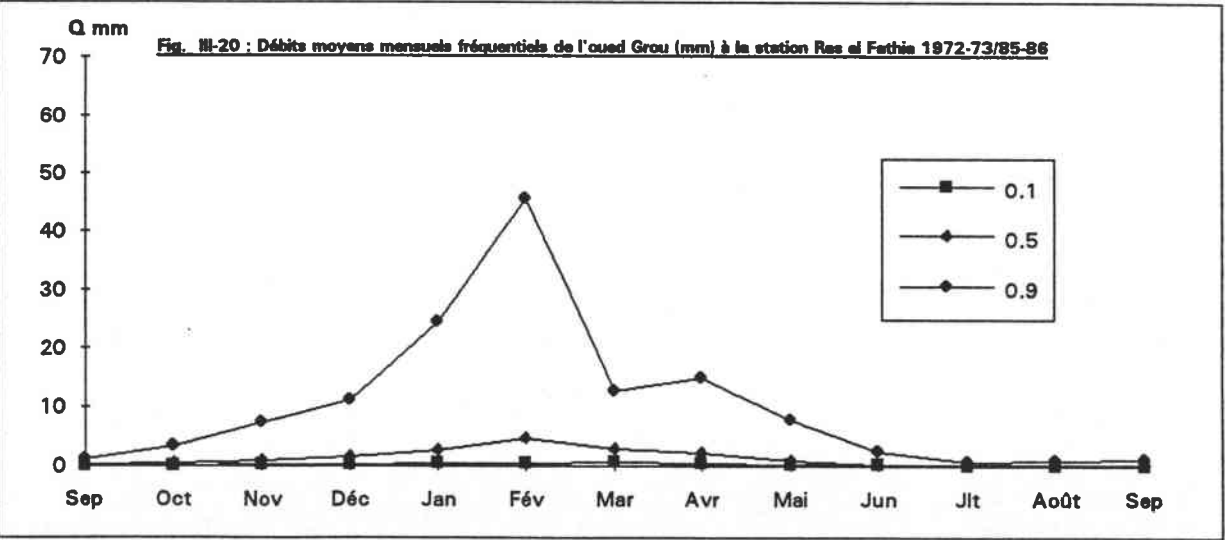
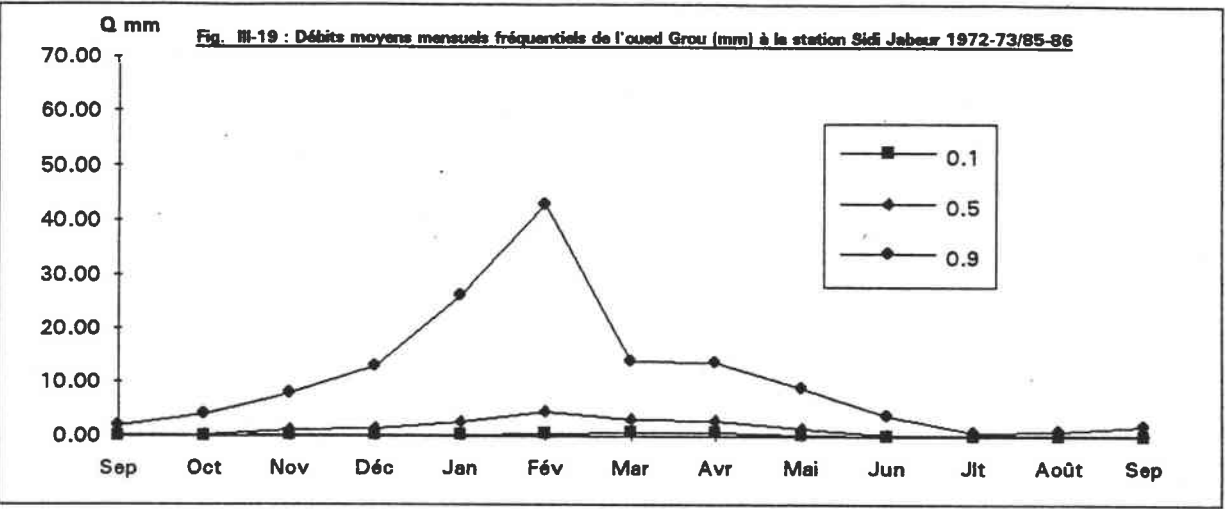
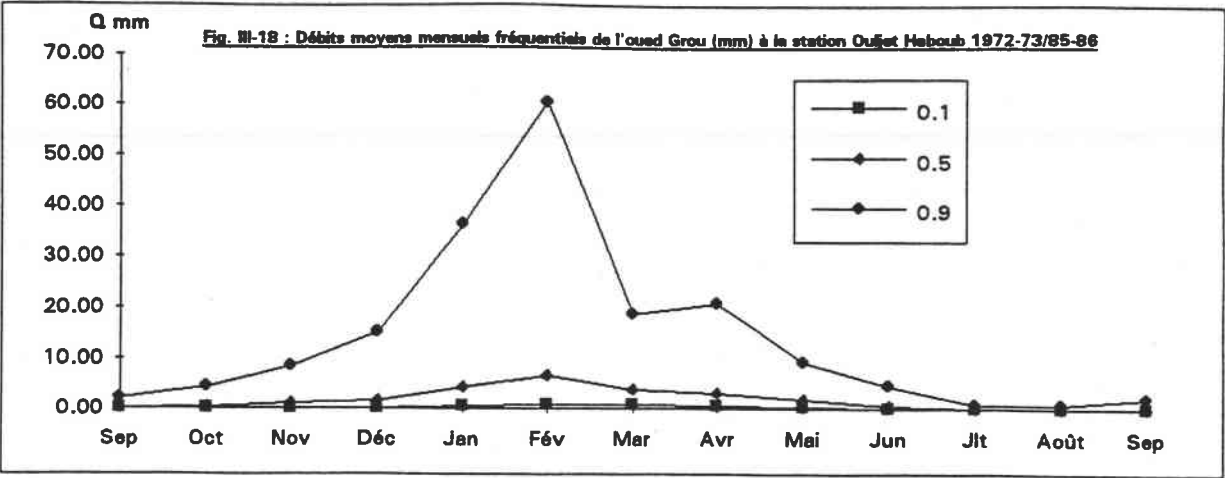


Tableau III-10 : Ecoulements et précipitations moyens mensuels fréquentiels aux bassins-versants : 1972-73/85-86

Bassin-versant		Fréquences	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jlt	Août
Ouljet Haboub	E mm	0.1	0.01	0.02	0.11	0.16	0.53	0.75	0.85	0.49	0.33	0.092	0.012	0.02
		0.5	0.02	0.37	1.15	1.54	4.35	6.72	3.99	3.18	1.75	0.66	0.11	0.13
		0.9	0.54	14.01	12.80	15.22	36.52	60.64	18.78	20.77	9.31	4.78	0.81	0.93
Ouljet Haboub	P mm	0.1	6.8	14.5	6.2	10.1	16.2	27.9	25.6	28.9	25.1	15.8	4.3	6.8
		0.5	15.1	34.5	28.5	32.8	47.1	56.9	44.4	57.8	41.8	25.9	6.1	7.8
		0.9	33.5	82.1	131.1	106.7	137.1	115.9	77.1	141.6	69.6	42.7	8.3	8.9
Sidi Jabeur	E mm	0.1	0.00	0.01	0.09	0.12	0.23	0.5	0.7	0.6	0.2	0.01	0.01	0.01
		0.5	0.05	0.25	1.1	1.3	2.5	4.5	3.1	2.9	1.3	0.19	0.07	0.09
		0.9	0.95	11.54	7.9	12.7	26.1	42.9	13.8	13.5	8.7	3.8	0.79	0.86
Sidi Jabeur	P mm	0.1	5.8	22.3	12.8	11.2	18.5	24.3	26.7	27.8	25.9	6.1	2.8	3.7
		0.5	11.6	41.8	33.6	37.4	44.6	51.5	48.1	55.0	43.4	12.8	4.6	5.2
		0.9	23.4	78.2	88.1	124.6	107.4	108.8	86.8	129.8	74.2	27.1	7.6	7.3
Ras el Fathia	E mm	0.1	0.01	0.02	0.11	0.21	0.31	0.45	0.66	0.34	0.06	0.03	0.01	0.01
		0.5	0.21	0.35	0.89	1.47	2.70	4.48	2.89	2.23	0.83	0.25	0.06	0.05
		0.9	1.03	9.3	7.2	11.1	24.3	45.6	12.7	14.9	11.8	2.4	0.4	0.98
Ras el Fathia	P mm	0.1	6.1	22.7	14.4	12.6	19.1	25.4	28.2	28.6	30.7	7.4	2.8	4.8
		0.5	12.3	42.5	35.5	38.9	45.2	52.6	49.9	56.7	48.3	14.4	4.2	5.7
		0.9	25.1	79.5	89.2	128.3	108.9	109.2	88.2	131.7	76.1	28.2	6.3	6.6

temps et dans l'espace et de leur fréquence.

III LES DEBITS EXTRÊMES : LES CRUES

Les crues sont des situations particulières du comportement des cours d'eaux qui représentent des gonflements hydrométriques, débordant ou non, qui affectent, sans périodicité le plus souvent, les écoulements. Elles sont des phénomènes fréquents et irréguliers qui peuvent se produire en toute saison, tant en saison de hautes eaux qu'en saison de basses eaux et donnent les débits les plus forts de l'année. Cette étude des débits de crue permet de caractériser la réaction de l'oued Grou aux précipitations importantes à des échelles de temps différentes allant de quelques heures à plusieurs jours; ainsi, certains épisodes de crue remarquables seront analysés plus précisément.

Si c'est l'abondance des précipitations qui engendrent bien les crues, leur intensité est favorisée par l'interaction de différents facteurs essentiels pour le ruissellement direct : secteur imperméable, mais aussi convergence avec les autres facteurs physiographiques et climatiques des bassins versants favorisant le ruissellement direct (forme, pentes, hiérarchisation du réseau hydrographique, densité de drainage, couvert végétal, sols...). L'étude des crues sera analysée à partir des données des précipitations journalières, débits moyens journaliers maximums et des débits instantanés maximums de saison hivernale et de saison estivale.

A - LES DEBITS MAXIMUMS ANNUELS

Le débit maximal de l'année peut être étudié à partir du débit moyen mensuel maximal, du débit moyen journalier maximal et du débit instantané maximal.

1- Les caractéristiques générales du débit moyen mensuel maximal de l'année (Q_{mxa})

Le débit moyen mensuel maximal de l'année (Q_{mxa}) se produit le plus fréquemment en février, janvier et avril pour les trois stations, mais sur les 14 ans de la période de mesure, 5 mois sont concernés, puisque certaines années, le débit est mesuré en mars ou en novembre. Ce dernier appartient en moyenne à la période de basses eaux. (Cf. tableau III-11). Ceci rend compte de la variabilité des débits moyens mensuels.

Tableau III-11 Les débits moyens mensuels maximums (Q max) de l'oued Grou en m³/s 1972-73/85-86.

Ouljet Haboub 1627 Km ²			Sidi Jabeur 3067 Km ²			Ras el Fathia 3540 Km ²		
Année	Mois	Qm ³ /s	Année	Mois	Qm ³ /s	Année	Mois	Qm ³ /s
1982-83	Février	3.82	1982-83	Février	3.92	1982-83	Février	6.96
1974-75	Avril	4.93	1974-75	Avril	6.56	1974-75	Avril	9.49
1983-84	Novembre	6.05	1983-84	Novembre	7.72	1983-83	Novembre	9.64
1980-81	Novembre	6.33	1972-73	Janvier	8.41	1972-73	Janvier	11.49
1972-73	Février	8.48	1980-81	Novembre	10.88	1980-81	Novembre	16.11
1979-80	Mars	11.29	1975-76	Avril	14.93	1975-76	Avril	23.63
1975-76	Avril	13.59	1981-82	Avril	20.28	1979-80	Mars	24.44
1981-82	Avril	13.98	1985-86	Janvier	24.16	1981-82	Avril	28.33
1984-85	Janvier	25.48	1979-80	Février	24.34	1984-85	Janvier	29.71
1985-86	Février	26.9	1984-85	Janvier	28.57	1985-86	Février	46.25
1977-78	Février	38.6	1973-74	Avril	43.23	1977-78	Février	50.82
1976-77	Janvier	40.08	1977-78	Février	43.43	1973-74	Avril	50.82
1973-74	Avril	42.41	1976-77	Janvier	44.27	1976-77	Janvier	52.38
1978-79	Février	72.27	1978-79	Février	101.35	1978-79	Février	119.62

Pour l'étude statistique, nous avons calculé les débits fréquents selon, la loi Log-normale où la distribution paraît satisfaisante.

Tableau III-12 : Débits moyens mensuels moyens maximums (Q_{mx}) fréquents (loi Log-normale) (m^3/s)

Période de retour	Mode		2 ans		5 ans		10 ans	
Débits	$Q \text{ m}^3/s$	$l/s/km^2$	$Q \text{ m}^3/s$	$l/s/km^2$	$Q \text{ m}^3/s$	$l/s/km^2$	$Q \text{ m}^3/s$	$l/s/km^2$
Ouljet Haboub 1627 km^2	6,6	4,06	15,4	9,46	33,6	20,7	50,4	31
Sidi Jabeur 3067 km^2	8,4	2,7	19,1	6,22	40,6	13,2	60,4	19,7
Ras el Fathia 3540 km^2	12,9	3,6	25,3	7,15	50,3	14,2	72,2	20,4

Les résultats montrent que les débits fréquents maximums s'accroissent de l'amont vers l'aval. Pour la fréquence décennale (0.9), ils sont dépassés une seule fois pour les trois stations en février 1978-79. La durée de retour théorique de la valeur observée la plus élevée est plus forte sur le bassin aval à Ras el Fathia 35 ans (31 pour le bassin intermédiaire à Sidi Jabeur et 25 ans pour le bassin amont à Ouljet Haboub).

Les débits moyens mensuels maximums par année présentent des grandes variations dans le temps et dans l'espace durant la période d'étude. Quel que soit la fréquence, les débits n'augmentent que de 20 à 24%, entre l'amont et le bassin de Sidi Jabeur pour un accroissement de superficie de 88%. L'amont apparaît ainsi à nouveau comme la partie la plus productive. On constate par ailleurs, que la part de l'accroissement des débits a tendance à s'homogénéiser lorsque la fréquence diminue. Ceci est le plus net entre les bassins de Sidi Jabeur et de Ras el Fathia. Les apports y représentent 32% en F 1/2 et s'abaissent à 20% en F 1/10. Aussi pour les événements les plus rares, les écarts entre les différentes parties du bassin ont tendance à se réduire. On peut supposer que cela correspond alors à des précipitations généralisées à l'ensemble du bassin. Mais ces débits moyens mensuels maximums restent loin d'être représentatifs de l'évolution des écoulements en crue. Pour déterminer l'événement à l'échelle des saisons, nous avons utilisé les débits moyens journaliers

maximums et les débits instantanés maximums de saison hivernale et de saison estivale.

2 - Les débits instantanés maximums et les débits moyens journaliers maximums

Les tableaux III-13 à III-15 donnent une image de la distribution annuelle pour les valeurs des débits moyens journaliers maximums et instantanés maximums de crue de l'oued Grou aux trois stations hydrométriques, ainsi que la date des événements. Les crues les plus fréquentes sont celles de la saison hivernale (9 crues sur 14 ans), elles coïncident avec les mois les plus pluvieux de l'année (janvier, février et avril).

Les débits de pointe sont les plus élevés en amont : en valeurs spécifiques, ils vont de 51 à 707 l/s/km² à Ouljet Haboub. Vers l'aval, ils se stabilisent : ils vont de 24 à 231 l/s/km² à Sidi Jabeur et de 24 à 215 l/s/km² à Ras el Fathia.

Cependant, certaines crues surviennent en période estivale mai, juin et septembre. La crue du 5 et 6 juin 1986 est la plus forte de toute la période d'observation.

Le rapport du débit instantané maximal sur le débit moyen journalier maximal montre la variabilité des crues et la forte irrégularité de l'écoulement au cours d'une journée de crue. A la station d'Ouljet Haboub, il peut atteindre des valeurs remarquables qui s'élèvent en période estivale à 8,2 (septembre 1980). En période hivernale il n'est que de 2,1 (février 1977). Aux autres stations les valeurs restent moyennes, elles sont entre 1,3 et 3,4 à la station de Sidi Jabeur et entre 1,2 et 3,5 à celle de Ras el Fathia, les rapports les plus forts pour ces deux stations sont aussi marqués en saison de basses eaux (novembre 1983). Ceci montre le caractère plus brutal des crues à l'amont du bassin, mais également une atténuation des contrastes vers l'aval qui apparaît cependant largement influencé par les apports amont.

B - LA PUISSANCE ET LA DUREE DE RECURRENCE DES MAXIMA INSTANTANES

1 - Le coefficient de puissance de crue H

La puissance d'une crue peut être caractérisée par un coefficient de la

Débits instantanés et journaliers maximums de l'oued Grou aux trois stations (m3/s) 1972-73/85-86

Tableau III-13 : Station Ouljet Haboub (1627 km²)

Année	Date	Q instantané max.	Q journalier max.	Q instantané /Q journalier	C. P : (H)
1972-73	18/01/1973	123	97.6	1.3	3.0
1973-74	13/04/1974	420	291	1.4	10.4
1974-75	14/06/1975	88.6	31.7	2.8	2.2
1975-76	13/04/1976	117	77.4	1.5	2.9
1976-77	15/02/1977	635	302	2.1	15.7
1977-78	12/02/1978	879	512	1.7	21.8
1978-79	15/02/1979	545	318	1.7	13.5
1979-80	14/09/1979	564	120	4.7	14.0
1980-81	27/09/1980	648	79.2	8.2	16.1
1981-82	09/05/1982	254	101	2.5	6.3
1982-83	15/02/1983	82.7	37.9	2.2	2.1
1983-84	04/11/1983	97.2	36.8	2.6	2.4
1984-85	05/01/1985	278	167	1.7	6.9
1985-86	05/06/1986	1150	164	7.0	28.5

Tableau III-14 : Station Sidi Jabeur (3067 km²)

Année	Date	Q instantané max.	Q journalier max.	Q instantané /Q journalier	C. P : (H)
1972-73	18/01/1973	106	73.7	1.4	1.9
1973-74	13/04/1974	341	244	1.4	6.2
1974-75	15/06/1975	188	64.2	2.9	3.4
1975-76	13/04/1976	148	68.1	2.2	2.7
1976-77	15/02/1977	457	197	2.3	8.3
1977-78	12/02/1978	663	497	1.3	12.0
1978-79	16/02/1979	707	541	1.3	12.8
1979-80	14/09/1979	408	136	3.0	7.4
1980-81	28/09/1980	242	103	2.3	4.4
1981-82	09/05/1982	216	99.9	2.2	3.9
1982-83	16/02/1983	69.9	43.8	1.6	1.3
1983-84	05/11/1983	104	30.5	3.4	1.9
1984-85	07/01/1985	285	171	1.7	5.1
1985-86	06/06/1986	504	169	3.0	9.1

Tableau III-15 : Station Ras el Fathia (3540 km²) *

Année	Date	Q instantané max.	Q journalier max.	Q instantané /Q journalier	C. P : (H)
1974-75	15/06/1975	196	68.3	2.9	3.3
1975-76	13/04/1976	152	72.7	2.1	2.6
1976-77	15/02/1977	500	199	2.5	8.4
1977-78	12/02/1978	762	554	1.4	12.8
1978-79	15/02/1979	740	595	1.2	12.4
1979-80	14/09/1979	431	158	2.7	7.2
1980-81	28/09/1980	247	99	2.5	4.2
1981-82	10/05/1982	235	132	1.8	3.9
1982-83	16/02/1983	85.7	46.4	1.8	1.4
1983-84	05/11/1983	121	34.1	3.5	2.0
1984-85	08/01/1985	295	177	1.7	5.0
1985-86	06/06/1986	415	134	3.1	7.0

* la station Ras el Fathia (1974-75/82-83)

formule de Myer-Coutagne-Pardé :

$$Q = H\sqrt{A} \quad \text{avec} \quad H = \frac{Q}{\sqrt{A}}$$

Q : étant le débit maximal instantané (m^3/s).

A : surface du bassin versant en km^2 .

Le coefficient de puissance de crue H de Myer-Coutagne-Pardé (H comme situation hydrologique) est un critère d'approche qui permet de mettre en évidence les fortes variations de puissance des crues d'une station à l'autre et de comparer les crues maximales de saison hivernale et de saison estivale des différents bassins versants pour la période d'étude. La valeur de H révèle l'intensité de la crue d'une station pour laquelle le terme $\sqrt{A}$ est invariable (Cf. tableaux III-13 à III-15).

En théorie, la formule de Myer-Coutagne-Pardé laisse supposer qu'on obtient une seule valeur du coefficient de puissance des crues de l'amont vers l'aval, mais ce n'est pas le cas dans le bassin versant de l'oued Grou. Les valeurs du coefficient H montrent une variabilité de puissance de crue entre le bassin versant amont d'Ouljet Haboub et les deux bassins versants, intermédiaire de Sidi Jabeur et aval de Ras el Fathia. Ces derniers ont des coefficients H presque identiques. Ceci signifie que le bassin versant amont représente un secteur hydrologique et surtout climatique à part. Le rapport de ces coefficients H avec ceux du bassin intermédiaire vont parfois du simple au triple (1.1 en avril 1976 à 3.1 en juin 1986). Ceci s'explique par la variabilité des crues, leur genèse (liée essentiellement à la variabilité spatiale des averses) et leur propagation de l'amont vers l'aval.

Les valeurs de H sont les plus élevées pour les crues de saison hivernale (22 à la station d'Ouljet Haboub et 13 à celles de Ras el Fathia et Sidi Jabeur). Celles des autres crues sont plus basses, sauf en juin 1986 à la station amont d'Ouljet Haboub (28.5) où l'on trouve la plus forte valeur de débit instantané de toute la période d'étude ($1150 \text{ m}^3/\text{s}$). Selon cette valeur de H à Ouljet Haboub (28,5), les débits de pointe estimés pour cette crue seraient de l'ordre de $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station intermédiaire de Sidi Jabeur et de $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station aval de Ras el Fathia. En fait, ils sont bien inférieurs (504 et $415 \text{ m}^3/\text{s}$). Ceci montre que cette crue de juin a été déterminée à l'amont par un important orage. La propagation de l'onde de crue a permis surtout une réalimentation des écoulements vers l'aval, et un gonflement du

débit moyen journalier. La pointe de crue y est de ce fait fortement laminée.

Par ailleurs, on peut caractériser la variabilité des crues à une station par le rapport du coefficient de puissance le plus élevé sur le plus faible, ces valeurs vont de 7 à Sidi Jabeur à 14 Ouljet Haboub. Cette disparité confirme la grande hétérogénéité des crues sur le bassin versant. Notons que quelques crues (4 fois/14 ans) ont des coefficients H proches pour les trois bassins, ce qui est une probabilité trop faible pour valider la loi de Myer sur le bassin de l'oued Grou en contexte méditerranéen.

2 - L'approche fréquentielle des crues annuelles

Comme il a été mentionné précédemment, le régime de l'oued Grou dans les différentes parties du bassin versant est caractérisé par une forte irrégularité saisonnière. De ce fait, nous avons testé certaines lois de probabilité pour ajuster les courbes de fréquences des crues. La loi Log-normale s'est avérée la plus fiable et la plus adéquate.

Nous avons estimé aux trois stations les débits instantanés maximums et les débits journaliers moyens maximums de fréquence biennale, quinquennale, décennale tels qu'ils figurent dans les tableaux suivants (période 1972-73/85-86 aux stations d'Ouljet Haboub et de Sidi Jabeur, 1974-75/85-86 à celle de Ras el Fathia).

Tableau III-16 : Débits journaliers moyens maximums fréquentiels en m^3/s , loi Log-normale

Fréquences	mode	0.5	0.8	0.9
Période de retour		2 ans	5 ans	10 ans
Ouljet Haboub	56.2	120	249	365
Sidi Jabeur	61.7	125	253	366
Ras el Fathia	45.9	109	239	359

Tableau III-17 : Débits instantanés maximums fréquentiels en m^3/s , loi Log-normale

Fréquences	mode	0.5	0.8	0.9
Période de retour		2 ans	5 ans	10 ans
Ouljet Haboub	126	296	644	965
Sidi Jabeur	152	255	467	640
Ras el Fathia	131	239	459	644

Tableau III-18 : Débits spécifiques instantanés maximums fréquentiels en l/s/km^2 , loi Log-normale

Fréquences	mode	0.5	0.8	0.9
Période de retour		2 ans	5 ans	10 ans
Ouljet Haboub	77.3	182	396	593
Sidi Jabeur	49.4	83	152	209
Ras el Fathia	49.1	75.4	131	174

D'après les résultats des tableaux précédents on remarque que :

- les débits fréquentiels de pointe ont tendance à décroître de l'amont vers l'aval,
- le rapport entre les débits fréquentiels de pointe biennaux et décennaux est très important, ces valeurs sont comprises entre 2.5 à Sidi Jabeur et 3.3 à Ouljet Haboub.
- la durée de récurrence calculée pour le débit de pointe de la crue de juin 1986 ($1150 \text{ m}^3/\text{s}$ à Ouljet Haboub) est de 14 ans.

- les débits moyens journaliers fréquentiels sont proches aux trois stations et les rapports entre les valeurs des fréquences biennales et décennales restent aussi importants et proches de ceux des débits de pointe (2.4 à Sidi Jabeur et 3.3 à Ras el Fathia),

- les débits de pointe exprimés en valeur spécifique montrent aussi un étalement de la pointe de crue et quoiqu'il en soit, les débits spécifiques fréquentiels diminuent tous de l'amont vers l'aval.

Ainsi, le comportement hydrologique de l'oued Grou connaît une variabilité entre l'amont et l'aval. Ceci nous amène à étudier la genèse et la propagation des crues de l'oued Grou aux trois stations hydrométriques.

C - LES CARACTERES GENERAUX DE LA GENESE ET LA PROPAGATION DES CRUES

La genèse des crues sur le bassin de l'oued Grou dépend à l'évidence de la durée et de l'intensité de l'événement pluvieux. Les crues de saison hivernale, les plus fréquentes, se produisent surtout en février et à un degré moindre en janvier et avril. Leur diversité et leur répartition restent liées à la nature et à la répartition des averses durant cette saison.

Les crues de saison estivale se caractérisent par des durées et des extensions spatiales plus faibles que celles des crues de saison hivernale. Elles sont liées généralement à des averses localisées et limitées dans le temps, et peuvent atteindre des débits instantanés jamais connu en période de hautes eaux, ce qui est le cas du bassin versant amont à la station d'Ouljet Haboub : $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ le 05/06/1986. Les crues de saison estivale se produisent le plus fréquemment en début et en fin de saison, et plus précisément en juin et en septembre. Celles de fin de saison se caractérisent par une gravité plus élevée en raison de la forte intensité des averses sur un sol presque nu (interception quasi nulle).

Cette étroite liaison entre les averses et les crues se retrouve encore dans la propagation de l'onde de crue. Les données des tableaux III-16 à III-18 montrent qu'on assiste le plus souvent à la simple translation d'un volume de crue de l'amont vers l'aval.

Statistiquement, tel qu'il ressort de l'analyse, le scénario moyen est le suivant :

- formation de l'onde de crue dans le bassin amont à Ouljet Haboub où les débits de pointe fréquentiels atteignent des valeurs plus élevées qu'à l'aval,

- étalement de la pointe de crue et diminution du débit de pointe entre la station amont d'Ouljet Haboub et les deux stations aval : cela se produit 9 fois/14 ans entre Ouljet Haboub et Sidi Jabeur et 6 fois/12 ans entre Ouljet Haboub et Ras el Fathia, mais cette diminution du débit de pointe entre la station amont et les stations aval apparaît de façon systématique dans les débits fréquentiels. Des débits moyens journaliers très proches sont observés aux trois stations en valeurs fréquentielles, ce qui laisse entendre, qu'en général en journalier, le volume de crue amont est simplement transféré à l'aval sans augmentation, et qu'on n'observe qu'une déformation de l'hydrogramme.

De cette étude de la propagation des crues et de l'analyse statistique, on pourrait retenir que, sur le bassin versant de l'oued Grou, les averses génératrices de grandes crues se produisent essentiellement dans le bassin versant amont d'Ouljet Haboub qui, en raison de sa morphométrie (plus compact), constitue un bassin versant idéal de réception des précipitations et de concentration des eaux de ruissellement; les secteurs aval, plus allongés avec un cours principal encaissé, sont au contraire favorable au laminage de la pointe de crue et à la déformation de l'hydrogramme avec conservation des volumes. Mais cette vision est incomplète et masque la complexité des événements de crue : c'est pourquoi nous proposons d'étudier quelques crues exemplaires, les deux plus fortes de chacune des deux saisons estivale et hivernale .

D - L'ANALYSE DE QUELQUES CRUES

Plutôt que traiter de façon synthétique les paramètres de la formation et de la propagation des crues, nous avons choisi de détailler le comportement des bassins versants en crue à travers quatre épisodes où apparaissent l'ensemble des caractères des crues de l'oued Grou :

- les deux crues de saison hivernale (février 1978 et février 1979);
- les deux crues de saison estivale (septembre 1979 et juin 1986).

L'analyse de ces exemples de crue s'appuie non seulement sur les débits

mais aussi sur les volumes d'écoulement de la crue. Ceux-ci s'obtiennent par décomposition de l'hydrogramme de crue en écoulement de crue et en écoulement de base. Ainsi, on soustrait du volume écoulé total pendant la crue, le volume correspondant à l'écoulement de base moyen.

$$\text{Ecoulement de base moyen} = \left(\frac{Q_a + Q_x}{2} \right) \times T_\Delta$$

avec :

Q_a : Débit moyen du jour précédent la crue

Q_x : Débit moyen du jour après la crue

$T_\Delta = 86400 \text{ secondes} \times \text{nombre de jours de la crue.}$

Ce volume d'écoulement de crue peut ainsi être comparé directement aux précipitations de cet événement sur le bassin versant selon le rapport suivant :

$$Cec = \frac{P}{Lec}$$

Cec : Coefficient d'écoulement de crue

P : Précipitations moyennes du bassin calculées (mm)

Lec : Lane d'eau équivalente d'écoulement de crue (mm).

1 - L'exemple de deux épisodes de crue de saison hivernale

Les crues de février 1978 et de février 1979 ont été les épisodes de crue de saison hivernale les plus représentatifs de la période d'étude.

L'analyse des hydrogrammes des crues de février 1978 et de février 1979 est intéressante dans la mesure où ils montrent des caractéristiques différentes, avec des montées de niveau d'eau distinctes, liées à des averses de nature différente.

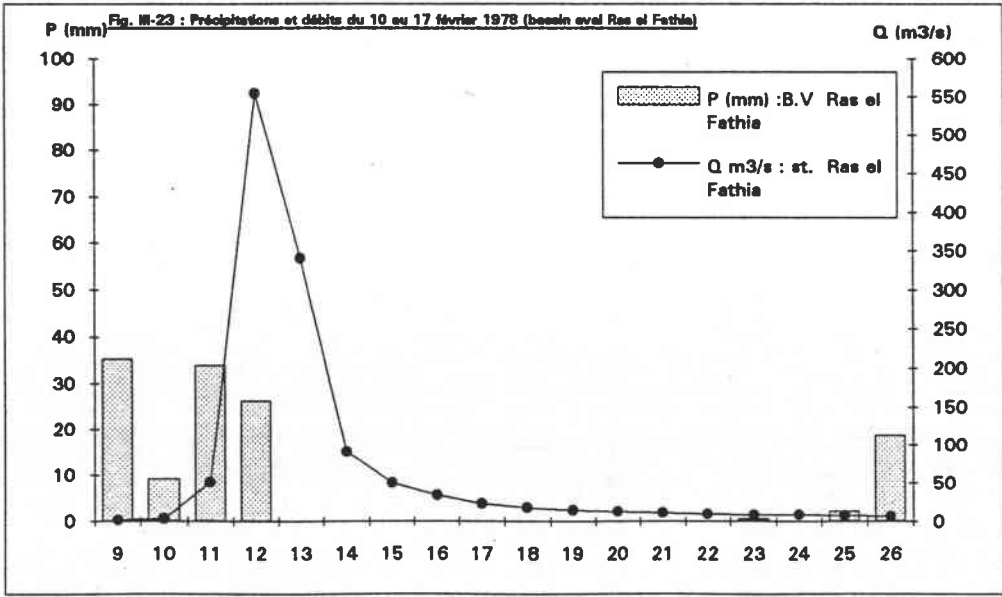
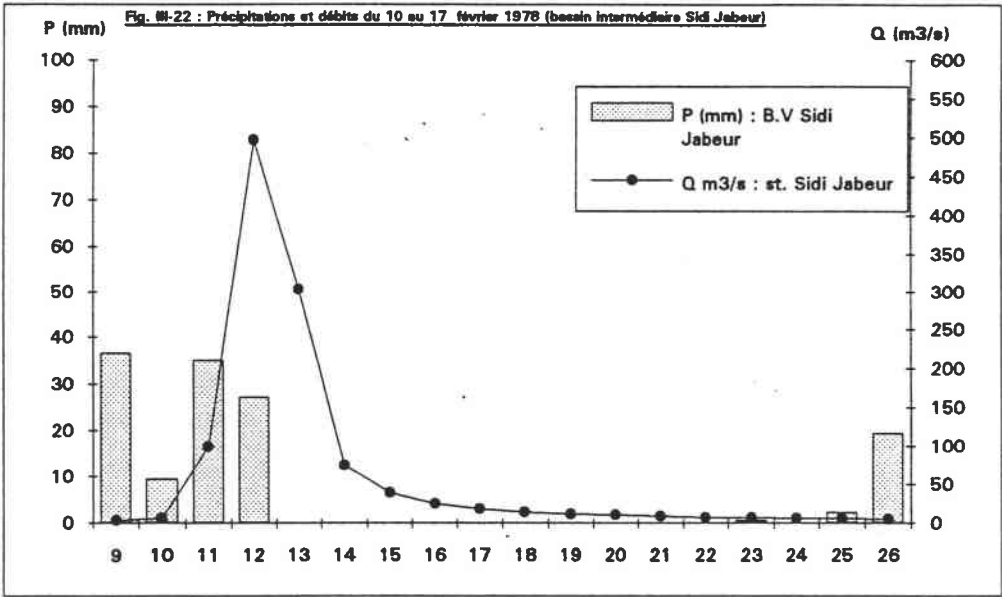
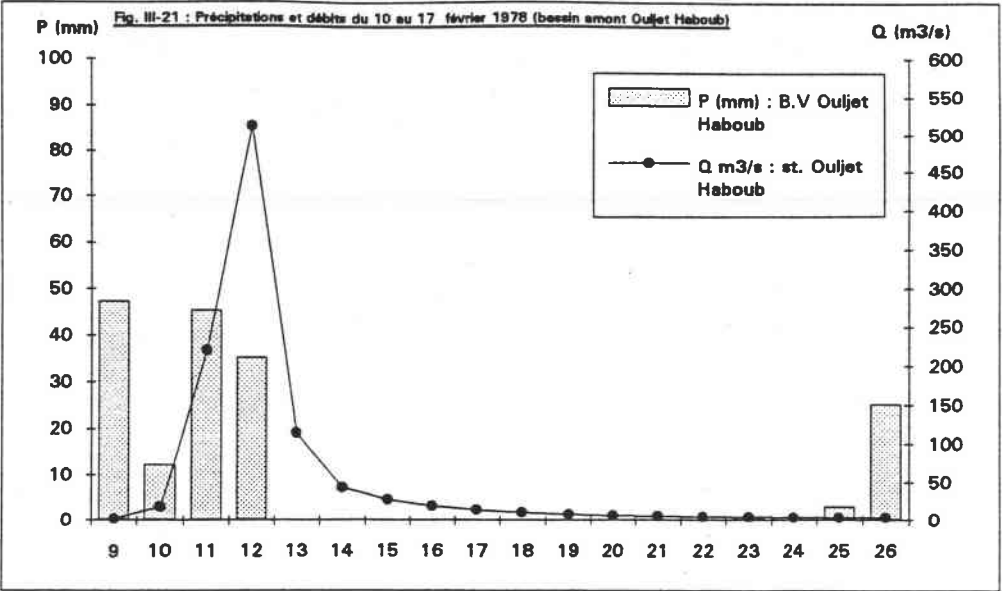
a - la crue de février 1978 : les courbes des hydrogrammes des trois stations ont une allure d'ensemble semblable (Cf. Fig. III-21 à III-23).

Tableau III-19 : Les précipitations, les lames d'eau écoulées et le coefficient d'écoulement de la crue du 10 au 17 février 1978

Bassin versant	Ouljet Haboub	Sidi Jabeur	Ras el Fathia
Précipitations (mm)	122	111	107
Débit moyen maximal journalier (m ³ /s)	512	497	595
Débit de pointe (m ³ /s)	879	663	762
Volume de crue (hm ³)	82.1	88.5	99.3
Lame d'écoulement de crue (mm)	44.5	25.6	25
Coefficient d'écoulement (%)	36	23	23

Les maximums de l'onde de crue ont été enregistrés le 12 février pour les trois stations. On observe une montée brutale de l'écoulement entre le 10^{ème} et le 12^{ème} jour du mois, liée à la succession des averses entre le 9 et le 13 février.

Cette crue est plus accentuée à l'amont du bassin en débit de pointe et moins agressive vers l'aval. Le coefficient d'écoulement est de 36 % à Ouljet Haboub et de 23 % à Sidi Jabeur et Ras el Fathia. A ceci s'ajoute que les valeurs des débits spécifiques de pointe montrent un laminage de l'amont vers l'aval : 540 l/s/km² à la station amont d'Ouljet Haboub, 216 l/s/km² à la station intermédiaire de Sidi Jabeur et 215 l/s/km² à la station aval de Ras el Fathia. Inversement, les volumes de crue augmentent de l'amont vers l'aval (+7 % entre Ouljet Haboub et Sidi Jabeur, +20 % entre Ouljet Haboub et Ras el Fathia et +12 % entre Sidi Jabeur et Ras el Fathia). Le rapport du volume moyen journalier maximum au volume total de la crue est compris entre 48 % à Sidi Jabeur et 53 % à Ouljet Haboub. Ceci s'explique par la part importante du volume moyen journalier dans le volume total de la crue, et par la variabilité spatiale des averses sur le bassin versant. La réponse hydrologique de



chaque bassin versant à la réalisation des crues, notamment entre l'aval et l'amont apparaît également. Les rapports des débits instantanés maximums aux débits moyens journaliers maximums sont entre 1.3 à Sidi Jabeur et 1.7 à Ouljet Haboub, avec des coefficients de puissance de crue H respectifs compris entre 12 et 21.8, ceci montre l'hétérogénéité de cette crue.

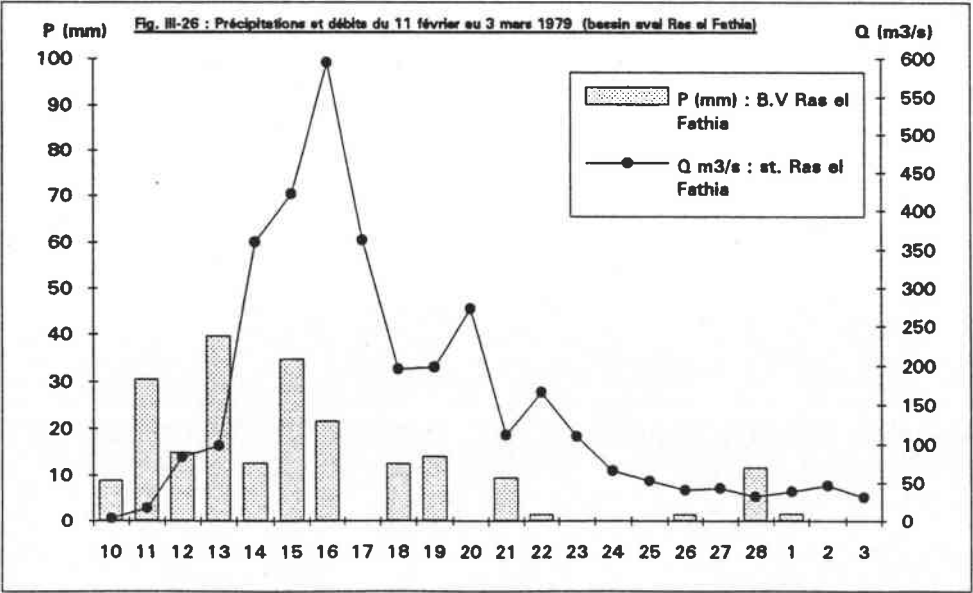
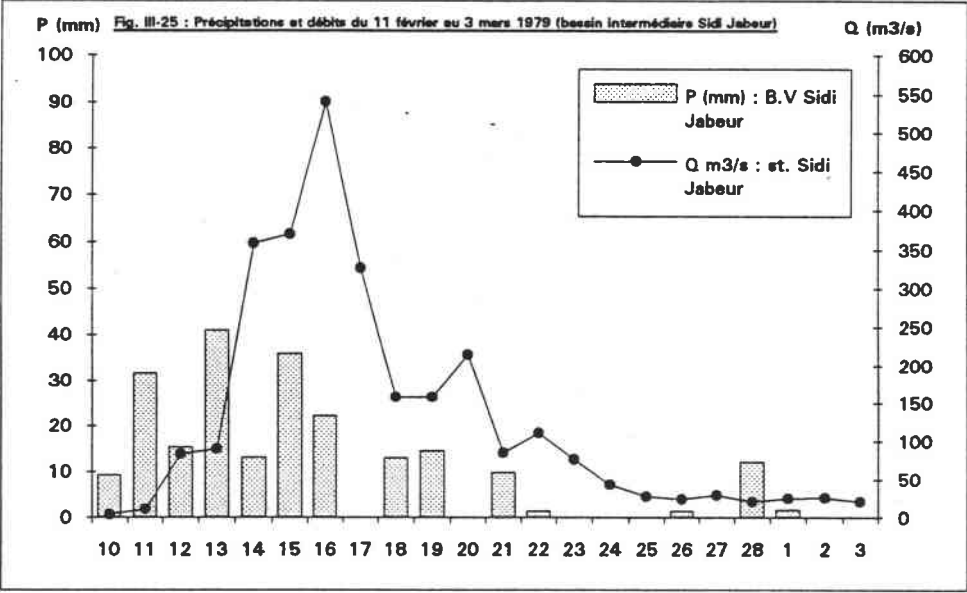
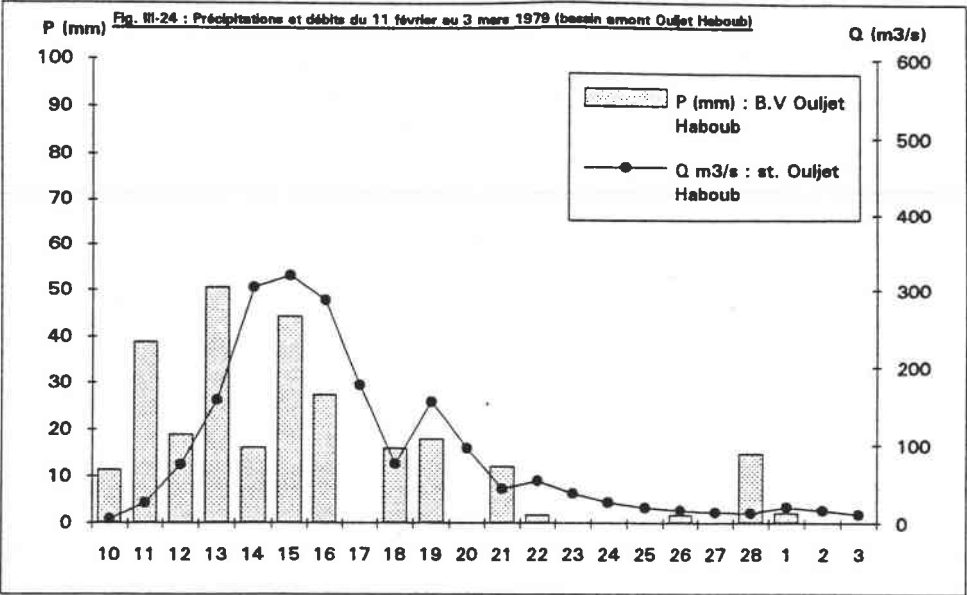
La décrue s'est faite de façon identique . Elle dure plusieurs jours avant le rétablissement du débit de base aux différentes stations.

b - la crue de février 1979 : Elle est provoquée par des précipitations plus abondantes et plus durables. Les averses se sont succédées sur une douzaine de jours. Le cumul des précipitations atteint plus de 200 mm dans tout le bassin (Cf. Fig. III- 24 à III-26).

Tableau III-20 : Les précipitations, les lames d'eau écoulées et le coefficient d'écoulement de la crue du 11 février au 3 mars 1979.

Bassin versant	Ouljet Haboub	Sidi Jabeur	Ras el Fathia
Précipitations (mm)	245	223	215
Débit moyen maximal journalier (m^3/s)	318	541	595
Débit de pointe (m^3/s)	545	707	740
Volume de crue (hm^3)	156	230	276
Lame d'écoulement de crue (mm)	92	71	75
Coefficient d'écoulement (%)	37	32	35

Ce type de crue est souvent à pointes multiples. On observe pour cet épisode un ou deux maximums secondaires lors de la décrue comptabilisés dans le calcul du volume de crue. Les hydrogrammes montrent que les débits à la station aval de Ras el Fathia suivent ceux de la station intermédiaire de Sidi Jabeur avec des montées et des descentes de crues identiques. Les pointes de crue, qui atteignent des valeurs élevées (707 et 740 m^3/s), y sont observées au cours de la journée du 16



février (les débits moyens journaliers sont de 541 à 550 m³/s). A la station amont d'Ouljet Haboub, la pointe de crue moins forte qu'à l'aval (545 m³/s) est atteinte dès le 15 février. Du fait des caractéristiques du bassin amont, mais surtout des fortes averses successives, les débits très élevés, autour de 300 m³/s, se maintiennent pendant trois jours.

Le débit de pointe augmente de l'amont vers l'aval, mais on peut noter que celui-ci survient avec un jour de retard aux deux stations aval. Ceci s'explique par la structure spatiale et temporelle des précipitations génératrices des montées d'eau dans chaque secteur. C'est un cas de propagation complexe où se combinent les apports locaux et la progression de la pointe venant de l'amont.

Le coefficient d'écoulement de cette crue varie peu, il est de l'ordre de 37 % à Ouljet Haboub, 32 % à Sidi Jabeur et 35 % à Ras el Fathia. Le volume de crue augmente de l'amont vers l'aval (+47 % entre Ouljet Haboub et Sidi Jabeur, +77 % entre Ouljet Haboub et Ras el Fathia et +20 % entre Sidi Jabeur et Ras el Fathia), mais la lame écoulée reste la plus élevée à Ouljet Haboub. Le rapport du volume journalier maximum au volume total de la crue ne dépasse pas 20 % aux trois stations. Les rapports des débits instantanés maximums aux débits moyens journaliers maximums oscillent de 1 à 2, et le coefficient de puissance H calculé est entre 12,4 à Ras el Fathia et 13.5 à Ouljet Haboub (H quasiment identique : production homogène de l'amont vers l'aval, cas où la loi de Myer, $Q = H\sqrt{A}$, s'applique).

A partir du 24^{ème} jour du mois, les débits décroissent d'une façon identique pour se stabiliser au niveau des débits de base de la saison à la fin du mois. Cette crue, du fait de ses caractéristiques, semble assez significative de la saison hivernale. Elle intervient lorsque la totalité des écoulements sont déjà gonflés et que le ruissellement est généralisé à l'ensemble du bassin.

2 - L'exemple de deux épisodes de crue de saison estivale

Les crues de septembre 1979 et juin 1986 sont des exemples de crue de cette saison estivale les plus fortes de toute la période d'étude. Elles sont liées généralement à des averses exceptionnelles, brèves et intenses.

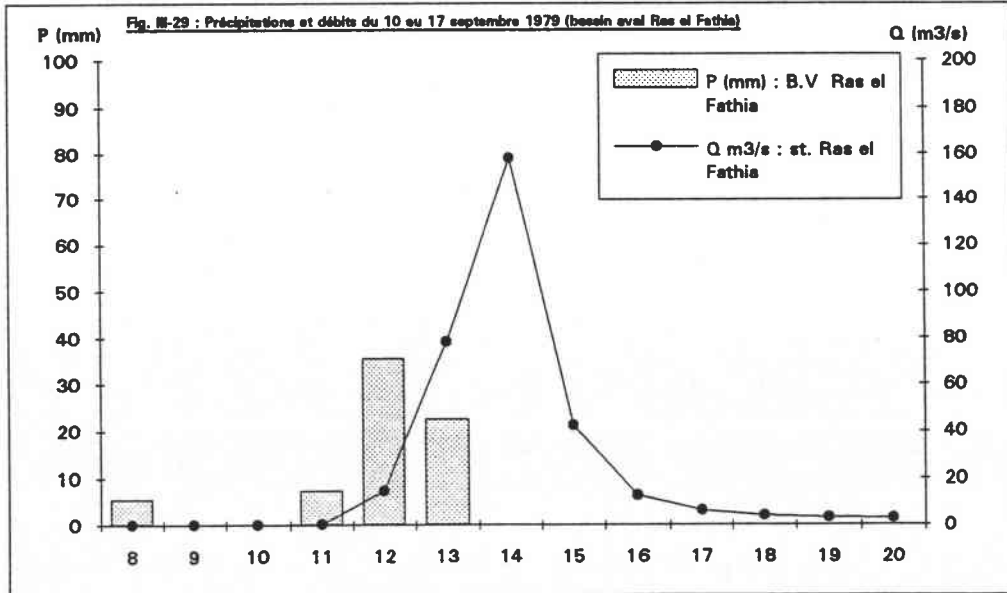
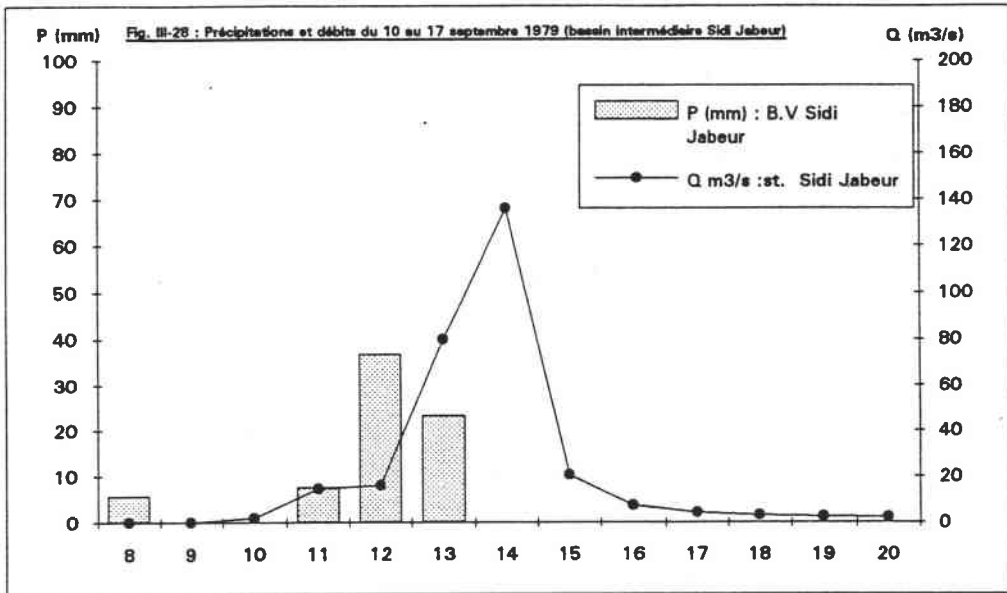
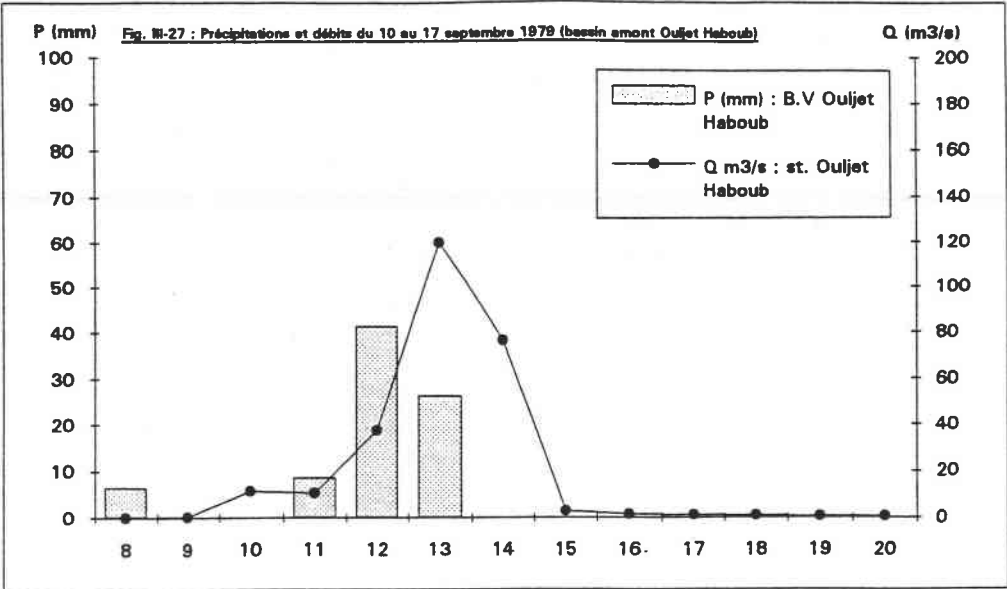
a - la crue de septembre 1979 : L'étude des courbes des hydrogrammes relatifs à cette crue permet de souligner l'effet des averses de fin de saison estivale sur la montée des écoulements, malgré les fortes possibilités de l'évapotranspiration potentielle (Fig. n°: III-27 à III-29). Cette crue a été provoquée par des précipitations qui tombent pour l'essentiel le 12 septembre (≈ 40 mm de pluie) et le 13 septembre (≈ 20 mm de pluie).

Tableau III-21 : Les précipitations, les lames d'eau écoulées et le coefficient d'écoulement de la crue du 10 au 17 septembre 1979

Bassin versant	Ouljet Haboub	Sidi Jabeur	Ras el Fathia
Précipitations (mm)	76	68	65
Débit moyen maximal journalier (m^3/s)	120	136	158
Débit de pointe (m^3/s)	564	408	431
Volume de crue (hm^3)	22.2	23.7	26.1
Lame d'écoulement de crue (mm)	13.4	7.3	6.9
Coefficient d'écoulement (%)	18	11	11

A la station d'Ouljet Haboub, le maximum journalier de crue est marqué le 13 septembre ($120 \text{ m}^3/\text{s}$), avec un débit de pointe de $564 \text{ m}^3/\text{s}$ (347 l/s/km^2), proche de celui mesuré en 1979. A la station de Sidi Jabeur et à celle de Ras el Fathia, les maximums de crue sont enregistrés le 14 septembre. Les débits de pointe y sont plus faibles de $408 \text{ m}^3/\text{s}$ (133 l/s/km^2) à Sidi Jabeur et de $431 \text{ m}^3/\text{s}$ (122 l/s/km^2) à Ras el Fathia.

Le coefficient d'écoulement de cette crue diminue de l'amont vers l'aval, il est de 18 % à Ouljet Haboub, de 11 % à Sidi Jabeur et à Ras el Fathia. Le volume de crue augmente légèrement de l'amont vers l'aval (+7 % entre Ouljet Haboub et Sidi Jabeur, +17 % entre Ouljet Haboub et Ras el Fathia et +10 % entre Sidi Jabeur et Ras el Fathia). Le rapport du volume journalier maximal au volume total de la crue est compris entre 46 % à Ouljet Haboub et 52 % à Ras el Fathia, et les rapports des débits instantanés maximums aux débits moyens journaliers maximums sont compris



entre 4.7 à Ouljet Haboub et 2.7 à Ras el Fathia. La soudaineté de la crue et son caractère éphémère apparaissent clairement dans ces chiffres et la distinguent des crues de saison hivernale. Le coefficient de puissance H montre une hétérogénéité de la crue de l'amont vers l'aval : ses valeurs sont entre 14 à Ouljet Haboub et 7.2 à Ras el Fathia.

Les courbes des hydrogrammes relatives à cette crue aux trois stations donnent une image de l'évolution rapide de la montée des eaux en fin de saison estivale. Le laminage de la pointe de crue s'est fait de façon plus efficace qu'en saison hivernale en raison du caractère plus bref de l'épisode pluvieux et vraisemblablement de l'absence de préparation des sols par des averses antérieures. La décrue s'est étendue sur 2 jours, avant le rétablissement du débit de base du mois aux trois stations.

b - la crue de juin 1986 : cette crue a pris un caractère de réelle gravité dans la mesure où le débit instantané enregistré le 05/06/86, atteint $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station d'Ouljet Haboub, soit un débit spécifique de l'ordre de $706,8 \text{ l/s/km}^2$, un coefficient de puissance H de 28,5 et un rapport du débit instantané au débit moyen journalier maximal de l'ordre de 7.

Tableau III-22 : Les précipitations, les lames d'eau écoulées et le coefficient d'écoulement de la crue de 2 au 13 juin 1986

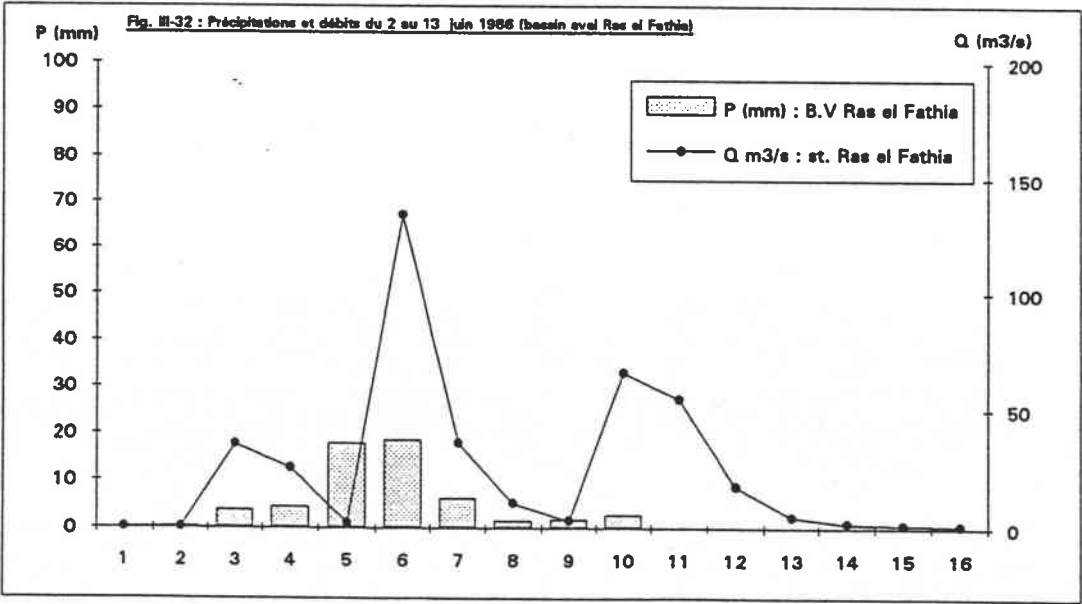
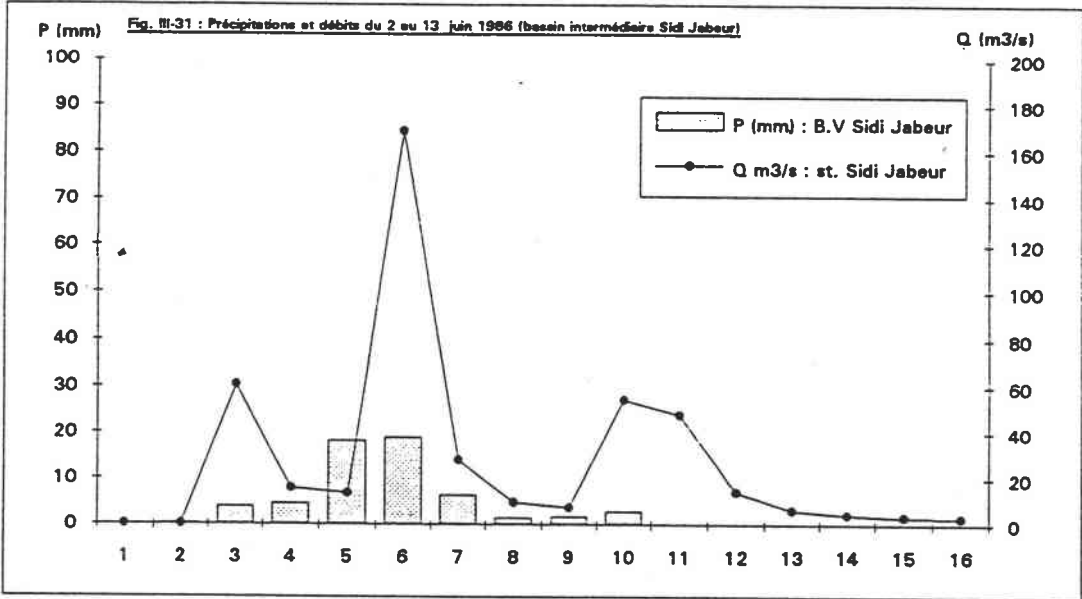
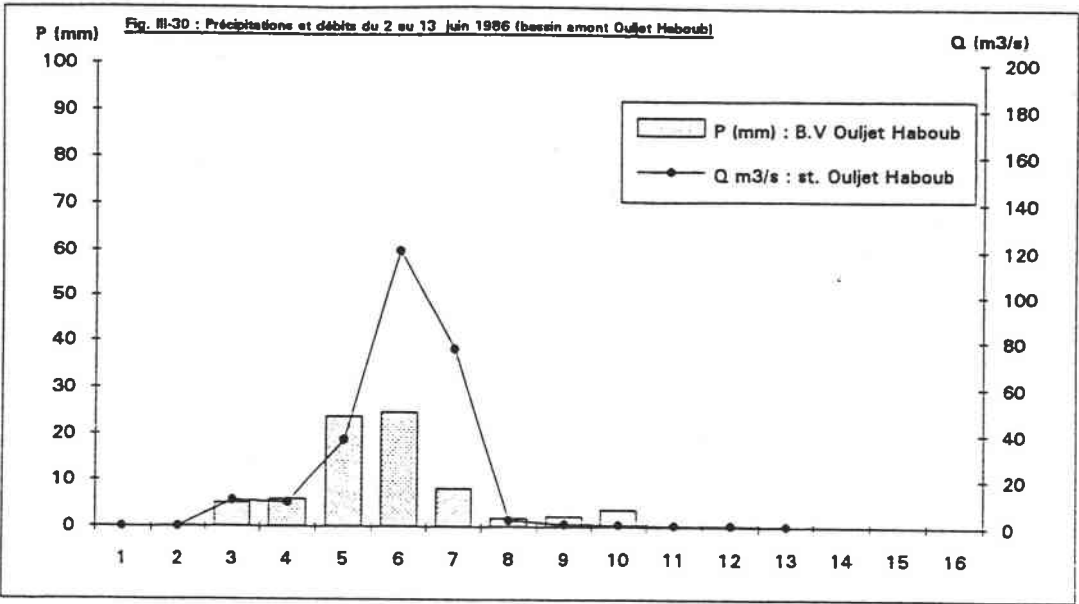
Bassin versant	Ouljet Haboub	Sidi Jabeur	Ras el Fathia
Précipitations (mm)	64	58	56
Débit moyen maximal journalier (m^3/s)	164	169	134
Débits de pointe (m^3/s)	1150	504	415
Volume de crue (hm^3)	41.7	35.9	33.3
Lame d'écoulement de crue (mm)	25.1	11.2	9.2
Coefficient d'écoulement (%)	39	19	16

Les courbes des hydrogrammes relatifs à cette crue laissent apparaître des montées du niveau d'eau dues à la succession des averses intenses et exceptionnelles en début de saison estivale (Cf. Fig. : III-30 à III-32).

A la station de Sidi Jabeur et à celle de Ras el Fathia, on note l'effet des averses préparatoires enregistrées le 2^{ème} et le 3^{ème} jour du mois qui ont entraîné une petite montée des eaux, mal enregistrée à l'amont, durant le 2 et le 3 juin. D'autres averses plus intenses leur succèdent le 5 et le 6 juin dans la partie amont du bassin versant. Elle engendrent une montée brutale de l'écoulement en déterminant les maxima instantanés le 5 juin à la station d'Ouljet Haboub (1150 m³/s, soit 707 l/s/km²) et le 6 juin à celles de Sidi Jabeur et de Ras el Fathia avec des valeurs respectives de 504 m³/s (164 l/s/km²) et 415 m³/s (117 l/s/km²). Le débit de pointe montre un laminage de l'amont vers l'aval très importante. Il faut vraisemblablement attribuer ce débit de pointe exceptionnel à Ouljet Haboub à des précipitations orageuses non enregistrées aux stations de mesure. La variation forte du coefficient d'écoulement de crue d'amont vers l'aval (39 % à Ouljet Haboub, 19 % à Sidi Jabeur et 16 % à Ras el Fathia) de même que la diminution dans le même sens du volume d'écoulement de crue (-16 % entre Ouljet Haboub et Sidi Jabeur, -25 % entre Ouljet Haboub et Ras el Fathia et -7 % entre Sidi Jabeur et Ras el Fathia) étayent cette hypothèse. Le rapport de volume journalier maximal au volume total de la crue est compris entre 34 % à Ouljet Haboub et 40 % à Sidi Jabeur. Les rapports des débits instantanés maximums aux débits moyens journaliers maximums sont entre 3 à Sidi Jabeur et Ras el Fathia et 7 à Ouljet Haboub. Les valeurs du coefficient de puissance H montrent aussi le laminage continu de l'amont vers l'aval. Ils oscillent entre 28,5 à Ouljet Haboub et 7 à Ras el Fathia : cette forte diminution des valeurs de H ne peut pas s'expliquer par la distribution spatiale des seules précipitations enregistrées.

Cependant cette crue est la seule des quatre exemples qui nous permet d'estimer le temps de transfert de l'onde de crue : 7 heures entre Ouljet Haboub et Sidi Jabeur (9 km/h) et 5 heures entre Sidi Jabeur et Ras el Fathia (5 km/h).

La baisse des eaux se fait sur 3 jours consécutifs. On observe une autre averse qui a engendré une montée des eaux à l'aval, du 9 au 11 juin. Cette montée à l'aval ne peut à nouveau s'expliquer par les précipitations enregistrées aux stations : celles-ci sont globalement identiques sur les trois bassins. Or les débits journaliers continuent de décroître à Ouljet Haboub. Vers le 14^{ème} jour du mois les débits de base de la saison se rétablissent aux stations aval.



On se heurte donc pour analyser cette crue à l'insuffisante précision de la mesure des précipitations. Des averses localisées ne semblent pas être prises en compte.

Ainsi, l'évolution distincte de ces crues, de saisons hivernale et de saisons estivale, est due aux caractéristiques différentes des averses (intensité et extension spatio-temporelle) se produisant sur un ensemble imperméable, aux pentes assez fortes et très peu protégées par un couvert végétal discontinu. Ceci provoque la montée rapide et brutale du niveau des cours d'eau.

Cependant, il est quasi certain que les précipitations (notamment en saison chaude) sont largement sous-estimées en raison de la faiblesse du réseau pluviométrique. Dans de telles conditions, il est impossible de mener une étude plus poussée des paramètres de la formation de la crue et toute tentative de bilan hydrologique (Cf. plus loin) doit s'accompagner des plus grandes réserves.

La phase de décrue est presque identique aux trois bassins et combine l'arrêt des averses et l'absence du soutien de l'écoulement par les eaux des nappes.

IV - LES DEBITS EXTRÊMES : LES ETIAGES

Pour les besoins en eaux et l'aménagement des cours d'eau, il est très important de connaître les périodes d'étiage, leur fréquence et leur répartition spatio-temporelle. Même si on peut distinguer les étiages des basses eaux, il se pose là encore le problème de détermination d'une limite précise entre ces deux états du cycle hydrologique.

Les étiages représentent les débits les plus faibles durant l'année en période de déficit de l'alimentation : l'absence des précipitations et une évapotranspiration potentielle importante favorisent la forte décroissance des écoulements en phase de tarissement. Les étiages sont très prononcés, durables et restent des phénomènes annuelles, qu'on peut appréhender à l'échelle du mois. Leur évolution dans le temps et leur répartition spatiale rendent compte de l'hydrologie de l'oued Grou (présence de nappes, capacité des aquifères, perméabilité). Les facteurs physiographiques dans les différents secteurs favorisent, à l'étiage, une absence presque totale de soutien des nappes et un important prélèvement par évapotranspiration.

L'étude des étiages impose l'analyse de diverses variables telles que les débits moyens mensuels minimums (Q_{mna}) et les débits moyens journaliers minimums. Les débits moyens journaliers les plus faibles d'une année particulière sont nuls, le cours d'eau est complètement à sec. Les débits moyens mensuels minimums observés aux trois stations durant la période d'étude vont de 0 à 0.194 m³/s à Ouljet Haboub, de 0 à 0.107 m³/s à Sidi Jabeur et de 0 à 0.078 m³/s à Ras el Fathia (Cf. tableau III-23). Nous considérons comme valeurs significatives de l'étiage les valeurs les plus basses observées, différentes de 0, précédant l'assèchement complet du cours d'eau.

Certaines années sèches ont même des débits moyens mensuels nuls, comme nous l'avons déjà montré en analysant les débits saisonniers moyens. L'oued a été complètement à sec durant 144 jours en 1983. Il nous paraît intéressant d'extraire et d'analyser l'information contenue dans le débit d'étiage plutôt que de traiter simplement le débit d'étiage lui-même. Nous avons donc retenu la durée d'étiage à débit nul comme également significative.

A - LA SEVERITE ET LA DUREE DE RECURRENCE DES ETIAGES

Le débit mensuel d'étiage se produit le plus fréquemment aux trois stations en juillet, août et septembre. Il coïncide généralement avec le mois au cours duquel l'ETP atteint son maximum et pendant lequel l'apport pluviométrique est relativement faible ou nul.

1- L'indice de sévérité

L'indice de sévérité (SN) est le rapport du débit mensuel minimal d'une année particulière au module de la période d'étude :

$$SN \text{ (\%)} = \frac{\text{débit mensuel minimal}}{\text{Module}} \times 100$$

Il met en évidence l'importance du phénomène de sécheresse en année particulière (Cf. tableau: III-23).

Les valeurs extrêmes de l'indice de sévérité d'étiage rendent compte aussi de l'hétérogénéité des débits mensuels, elles vont de 0 à 5.24 % à la station amont d'Ouljet Haboub, de 0 à 2.32 % à celle intermédiaire de Sidi Jabeur et de 0 à 1.37 % à la station aval de Ras el Fathia. Ceci montre d'une part que le débit d'étiage nul est marqué dans des années d'étiage sévère. Selon la répartition des précipitations au cours de l'année, ce ne sont pas automatiquement des années sèches,

Tableau III-23 : Indice de sévérité des étiages moyens mensuels de l'oued Grou aux stations hydrométriques (1972-73/85-86)

Stations	Ouljet Haboub 1627 km² (3.70 m3/s)				Sidi Jabeur 3067 km² (4.61 m3/s)				Ras el Fathia 3540 km² (5.20 m3/s)			
Fréquence	Année	Mois	Q m3/s	SN %	Année	Mois	Q m3/s	SN %	Année	Mois	Q m3/s	SN %
0.05	1973-74	Août	0.000	0.00	1973-74	Septembre	0.000	0.00	1981-82	Août	0.000	0.00
0.12	1974-76	Août	0.000	0.00	1976-76	Août	0.000	0.00	1977-78	Août	0.001	0.02
0.19	1978-79	Août	0.000	0.00	1976-77	Septembre	0.000	0.00	1978-79	Septembre	0.001	0.02
0.26	1982-83	Août	0.000	0.00	1977-78	Juillet	0.000	0.00	1982-83	Septembre	0.001	0.02
0.33	1976-76	Août	0.001	0.03	1978-79	Septembre	0.000	0.00	1976-76	Août	0.002	0.04
0.4	1972-73	Septembre	0.002	0.05	1979-80	Juillet	0.000	0.00	1976-77	Septembre	0.005	0.10
0.47	1984-85	Septembre	0.002	0.05	1980-81	Août	0.000	0.00	1974-75	Août	0.006	0.12
0.53	1977-78	Juillet	0.005	0.14	1981-82	Août	0.000	0.00	1983-84	Août	0.007	0.13
0.6	1976-77	Août	0.040	1.08	1982-83	Août	0.000	0.00	1984-85	Août	0.007	0.13
0.67	1986-86	Juillet	0.120	3.24	1983-84	Juillet	0.000	0.00	1972-73	Septembre	0.036	0.69
0.74	1983-84	Septembre	0.135	3.65	1984-85	Septembre	0.000	0.00	1973-74	Septembre	0.037	0.71
0.81	1980-81	Juillet	0.174	4.70	1972-73	Septembre	0.001	0.02	1979-80	Août	0.055	1.06
0.88	1981-82	Août	0.178	4.81	1974-75	Août	0.009	0.20	1980-81	Juillet	0.070	1.35
0.95	1979-80	Juillet	0.194	5.24	1986-86	Juillet	0.107	2.32	1986-86	Juillet	0.071	1.37

Moyenne
Ecart type
C.V

0.06	1.64
0.07	1.77
0.07	1.90

0.01	0.18
0.01	0.20
0.01	0.21

0.02	0.41
0.02	0.44
0.02	0.47

l'étiage peut être marqué aussi en année humide.

2 - La durée des débits nuls

Les étiages mensuels (Q_{mna}) les plus sévères sont nuls (0 l/s) et sont plus fréquents à la station intermédiaire de Sidi Jabeur (11 ans/14 années). Ils concernent 4 années à la station amont d'Ouljet Haboub et une année (1982-83) à celle aval de Ras el Fathia.

A l'échelle journalière, les étiages nuls (0 l/s) sont aussi plus fréquents à la station intermédiaire de Sidi Jabeur (Cf. tableau III-24) : pour 5 années sur 14 ans la durée d'étiage y a dépassé 100 jours successifs, le nombre maximal étant de 144 jours successifs (presque 5 mois) du 10 juin au 30 octobre 1983. A la station amont d'Ouljet Haboub, le nombre de jours maximal de la durée d'étiage est de 93 jours (3 mois successifs, du 17 juillet au 17 octobre 1974). A la station aval de Ras el Fathia, l'étiage nul se produit seulement deux fois durant la période (en 1977-78 et 1981-82) et la durée n'a pas dépassé 34 jours successifs (du 7 août au 9 septembre 1982). Ceci montre que l'étiage est moins sévère à l'aval qu'à l'amont (34 jours contre 93 jours), mais le bassin intermédiaire à Sidi Jabeur paraît le plus sensible à l'étiage. Ceci nous permet de poser le problème de la fiabilité des mesures à cette station pour les plus faibles débits : soit la station de Sidi Jabeur est mal tarée pour les très faibles débits, soit il existe un inféro-flux non négligeable dans cette partie du cours d'eau où la vallée s'élargit dans la dépression triasique argileuse du Souk Jemâa, au débouché des gorges inscrites dans les schistes calcaires du Dévonien. Il est probable que les deux phénomènes y sont associés.

En général, la sévérité des débits d'étiages est marquée par une irrégularité interannuelle.

3 - Les débits d'étiages mensuels fréquents

Du fait que le cours d'eau s'assèche complètement durant la période estivale et que les débits moyens journaliers sont nuls, l'étude des débits fréquents d'étiage ne peut avoir une grande signification. Nous l'avons tout de même retenue pour ses indications sur la dynamique d'étiage et sur les débits extrêmes alors soutenus par les nappes. Nous avons appliqué aux débits non nuls différentes lois. La loi Racine-Gumbel offre le meilleur ajustement pour la station de Ras el Fathia. Pour celle d'Ouljet Haboub c'est la loi de Fréchet (Log-Gumbel) qui convient le mieux

Tableau III-24 Durée d'étiage sévère de l'oued Grou aux stations hydrométriques $q = 0$ l/s (1972-73/85-86)

Année	Ouljet Haboub		Sidi Jabeur		Ras el Fathia	
	Date	nombre de jours	Date	nombre de jours	Date	nombre de jours
1972-73		0	4 oct-14 oct	14	-	-
1973-74	17 jult-17 oct	93	5 sep-5 nov	62	-	-
1974-75	27 jult-2 sep	38		0	*	*
1975-76		0	4 sep-17 déc	105		0
1976-77		0	5 août-8 sep	35		0
1977-78		0	19 jun-11 oct	115	2 août-24 août	12
1978-79	31 jult-8 sep	40	8 août-6 sep	30		0
1979-80		0	6 jun-13 sep	100		0
1980-81		0	17 jult-25 oct	107		0
1981-82		0	3 août-20 oct	79	7 août-9 sep	34
1982-83	28 jult-11 sep	46	10 jun-30 oct	144		0
1983-84	19 mai-10 août	53		0		0
1984-85		0	14 jun-14 jult	31		0
1985-86		0	11 jult-2 août	23		0

(-) pas de mesure

* année incomplète

(Cf. Fig. III-33 et III-34). Mais le petit nombre des valeurs non nulles limite l'intérêt de l'ajustement (10 valeurs pour la station amont d'Ouljet Haboub, 13 valeurs pour celle aval de Ras el Fathia). Pour la station intermédiaire de Sidi Jabeur qui présente 11 valeurs nulles, l'ajustement n'a aucune signification. Les résultats obtenus sont portés dans le tableau suivant.

Tableau III-25 : Débits d'étiages fréquents en m³/s

	Vers le sec		Médiane	Vers l'humide	
Fréquences	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9
Période de retour	10 ans	5 ans	2 ans	5 ans	10 ans
Ouljet Haboub *	0,000	0,000	0,071	0,147	0,188
Ras el Fathia *	0,001	0,003	0,008	0,040	0,050

* Ouljet Haboub : Loi Racine-Gumbel

* Ras el Fathia : Loi Log-Gumbel (Fréchet)

L'approche statistique confirme que l'écoulement en étiage est mal soutenu dans l'ensemble du bassin versant de l'oued Grou, le débit fréquentiel caractéristique maximal de l'étiage ne dépasse pas les 200 litres/s à la station amont d'Ouljet Haboub et 50 litres/s à la station aval de Ras el Fathia. Les rapports entre le débit caractéristique de fréquence 0,9 et la médiane est de 2,6. A Ouljet Haboub, la période de retour du débit nul est 3,5 ans, et à Ras el Fathia, il est supérieur à 10 ans. La sévérité des étiages de l'oued Grou est donc bien en conformité avec les caractéristiques du bassin versant. Elle souligne le caractère périodique des écoulements, ainsi que certaines années, leur discontinuité spatiale. Pour mieux rendre compte de l'évolution continue du rendement de nappe, il nous paraît nécessaire d'appliquer des méthodes permettant l'observation du débit de base.

B - L'ÉCOULEMENT DE BASE

Le débit de base constitue un aspect hydrologique particulier en période sèche. Sa détermination se fait par décomposition des hydrogrammes des débits journaliers, en débit de ruissellement et débit de base. Plusieurs méthodes ont été

Ajustements des débits d'étiage de l'oued Grou (1972-73/85-86)

Fig. III-33

Grou à Ouljet Haboub

Loi Racine Gumbel

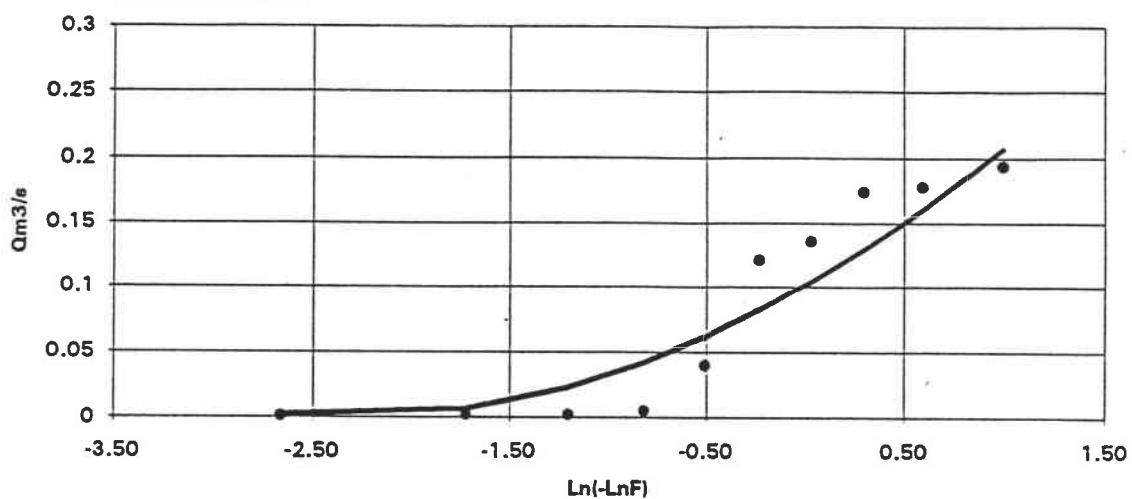
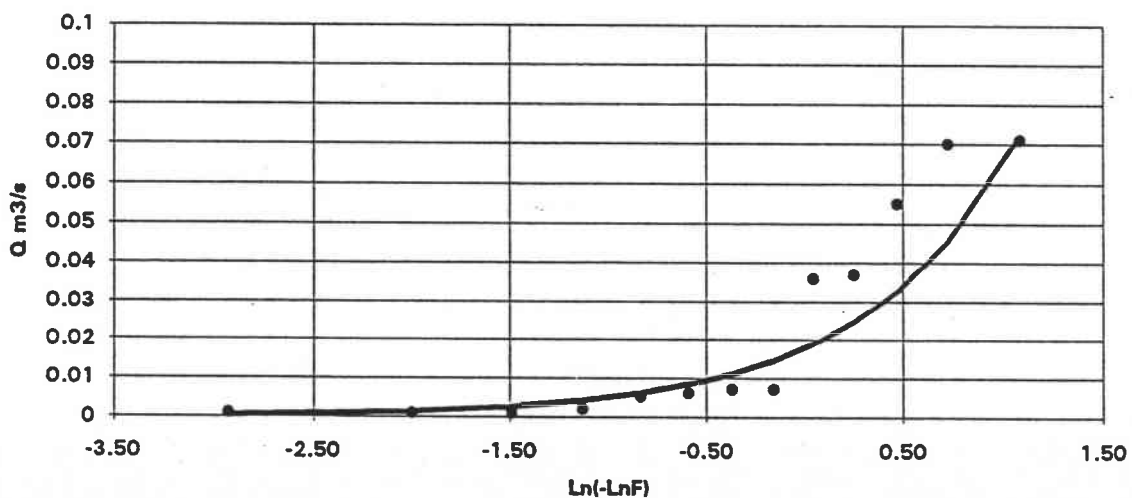


Fig. III-34

Grou à Ras el Fathia

Loi Ln Gumbel (Frechet)



prises en œuvre pour la séparation de ces deux débits à partir de la décomposition de l'hydrogramme (H. Schoeller 1962, Roche 1963, Dubreuil 1974).

Pour représenter les poids relatifs de ces deux écoulements de l'oued Grou, on a utilisé deux méthodes :

- la méthode de la variable "Indice d'écoulement de base : IEB" (Lvovich, 1982). Son intérêt est d'évaluer la part de débit de base dans l'écoulement total d'un hydrogramme selon une décomposition automatique de débits moyens journaliers, " il permet en effet de paramétrer l'influence des conditions géologiques du bassin versant sur l'écoulement de base. Il s'agit bien d'un indice qui ne prétend pas quantifier avec exactitude la vidange des nappes souterraines." (J. Humbert et U. Kaden);

- la méthode statistique (Gamez et Zumstein, 1994)) portant sur des chroniques pluriannuelles des débits journaliers classés.

1- La méthode de l'indice d'écoulement de base (IEB)

On considère chaque chronique des débits journaliers non classés comme une suite de quintuplets ; on retient pour chaque quintuplet, la plus faible valeur. Puis, on conserve celles de ces valeurs précédentes qui sont inférieures aux deux valeurs qui les encadrent dans le temps, divisées par 0,9. La ligne qui joint ces différents points englobe un volume annuel correspondant à l'écoulement de base. L'indice d'écoulement de base IEB est donc le rapport entre ce volume et le volume total de l'écoulement. Nous retiendrons la valeur de l'IEB exprimée en pourcentage.

Nous avons calculé cette variable à l'échelle de l'ensemble de la période pour les trois stations (Cf. tableau III-26) et en année particulière (Cf. tableaux III-27 à III-29).

Tableau III-26 : Indice d'écoulement de base de l'oued Grou aux stations hydrométriques

	Période	Module (m ³ /s)	Volume total (Million m ³)	Volume de base (Million m ³)	IEB %
Ouljet Haboub	1972-73/85-86	3.54	1.68	0.231	14
	1974-75/85-86	3.39	1.39	0.175	13
Sidi Jabeur	1972-73/85-86	4.42	2.09	0.292	14
	1974-75/85-86	4.38	1.80	0.242	13
Ras el Fathia	1972-73/85-86	--	--	--	--
	1974-75/85-86	4.96	2.03	0.289	14

Les résultats obtenus montrent que le comportement hydrologique est semblable sur les trois bassins. La part de débit de base dans l'écoulement total est relativement faible à l'ensemble des stations : l'indice d'écoulement de base ne dépasse pas les 14 % durant la période d'étude. Ceci s'explique d'une part, par le faible rendement hydrologique des formations essentiellement imperméables dans l'ensemble du bassin versant, et d'autre part par la brutalité des averses engendrant les crues. Ceci génère pour l'ensemble, du ruissellement. Pour les deux stations d'Ouljet Haboub et de Sidi Jabeur, les valeurs de l'IEB passent de 14 % pour la période complète (1972-73/85-86) à 13 % pour la période interne (1975-76/85-86), en raison de la variabilité de la valeur de l'IEB annuelle élevée (1972-73, 29 % à Ouljet Haboub et 24 % à Sidi Jabeur (Cf. tableaux III-27 à III-29).

En année particulière, le débit de base représente entre 6 et 36 % de l'écoulement annuel à la station amont d'Ouljet Haboub, entre 6 % et 24 % à celle de Sidi Jabeur et entre 7 et 20 % à la station aval de Ras el Fathia. Les fortes valeurs de la part de l'écoulement de base peuvent apparaître en année sèche (en 1982-83 : 36 % à Ouljet Haboub, mais 12,3 à Sidi Jabeur et 10,5 à Ras el Fathia) ou en année humide (20 à 24 % en 1976-77 aux trois stations). Mais la variabilité spatio-temporelle des débits de base apparaît accrue en année sèche, ce qui montre que ceux-ci sont bien liés à la variabilité des apports pluviométriques pour chaque bassin, en raison d'une lithologie essentiellement imperméable et de l'indigence des réservoirs. Néanmoins,

Tableau III-27 : Indice d'écoulement de base annuel de l'oued Grou à la station Ouljet Haboub

année	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76	1976-77	1977-78	1978-79	1979-80	1980-81	1981-82	1982-83	1983-84	1984-85	1985-86	Moyenne
Moyenne	2.05	7.00	1.24	2.60	8.61	5.28	7.74	3.31	1.34	2.87	0.57	1.19	2.74	5.63	3.73
Volume total	64535	220736	39189	82259	271479	166378	243969	104658	42476	90612	17984	37761	86665	177510	117586
Volume de base	19039	36523	6667	13812	55280	20360	22917	14373	7644	10620	6527	6535	5000	16541	17274
IEB %	29.2	16.5	17.0	16.8	20.4	12.2	9.4	13.7	18.0	11.7	36.3	17.3	5.8	9.3	16.69

Tableau III-28 : Indice d'écoulement de base annuel de l'oued Grou à la station Sidi Jabeur

année	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76	1976-77	1977-78	1978-79	1979-80	1980-81	1981-82	1982-83	1983-84	1984-85	1985-86	Moyenne
Moyenne	1.94	7.52	1.65	2.93	10.03	6.53	11.42	5.44	1.99	3.96	0.54	1.75	2.85	5.22	4.54
Volume total	61072	237295	51883	92788	316361	206079	360221	171941	62669	124804	16298	55377	83247	164507	143182
Volume de base	14601	36039	11618	14949	76247	39028	34545	25263	4958	12823	2003	6962	5214	20679	21781
IEB %	23.9	15.2	22.4	16.1	24.1	18.9	9.6	14.7	7.9	10.3	12.3	12.6	6.3	12.6	14.77

Tableau III-29 : Indice d'écoulement de base annuel de l'oued Grou à la station Ras el Fathia

année	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76	1976-77	1977-78	1978-79	1979-80	1980-81	1981-82	1982-83	1983-84	1984-85	1985-86	Moyenne
Moyenne	-	-	"	3.24	11.63	6.80	14.10	6.18	1.96	4.81	0.83	1.85	3.41	5.30	5.47
Volume total	-	-	"	102516	366905	214537	444781	195271	61882	151560	26034	58628	107616	167247	172453
Volume de base	-	-	"	11442	74565	36450	46887	27141	5012	21112	2727	5892	7059	20193	23498
IEB %	-	-	"	11.2	20.3	17.0	10.5	13.9	8.1	13.9	10.5	10.0	6.6	12.1	12.19

- pas de mesure " année incomplète

l'étude de la variable IEB a montré qu'en moyenne, plus de 85 % des écoulements proviennent des ruissellements.

2 - La méthode statistique

La méthode s'appuie sur la statistique portant sur des chroniques pluriannuelles de débits moyens journaliers classés mois par mois. Elle permet une séparation des écoulements en débit de base et débit de ruissellement. Les auteurs considèrent comme débit de ruissellement tout écoulement lié à une influence des précipitations et le débit de base est donc censé provenir uniquement du déstockage des réserves souterraines.

On a établi un tableau des débits moyens journaliers regroupés en classes pour chacun des mois pour la période d'étude (Cf. annexe III-5). A chaque débit correspond une fréquence cumulée proposée par GUMBEL :

$$F = \frac{n}{N + 1}$$

où n : rang cumulé de la valeur

et N : effectif total

Pour chaque mois, nous avons dressé des courbes en portant :

- en abscisse les pourcentages cumulés des nombres de valeurs par classe :

$$NJ(\%) = \frac{100n}{N}$$

avec n : valeurs cumulées classées

et N : nombre total des valeurs de la série étudiée.

- en ordonnée, les valeurs des débits moyens journaliers classés par ordre croissant.

La méthode pose comme hypothèse que l'alignement des valeurs de débit situées en deçà du mode (Cf. tableaux III-30 à III-32, Fig. III-35 à III-37 et annexe III-6), caractérisent une courbe de vidange mensuelle. Le mode a été déterminé à partir

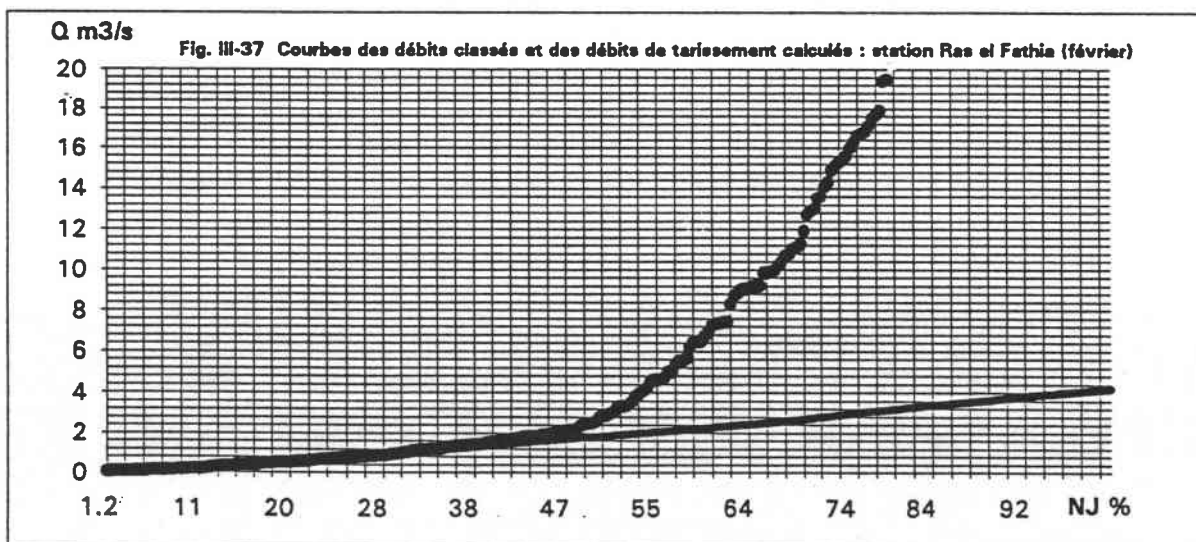
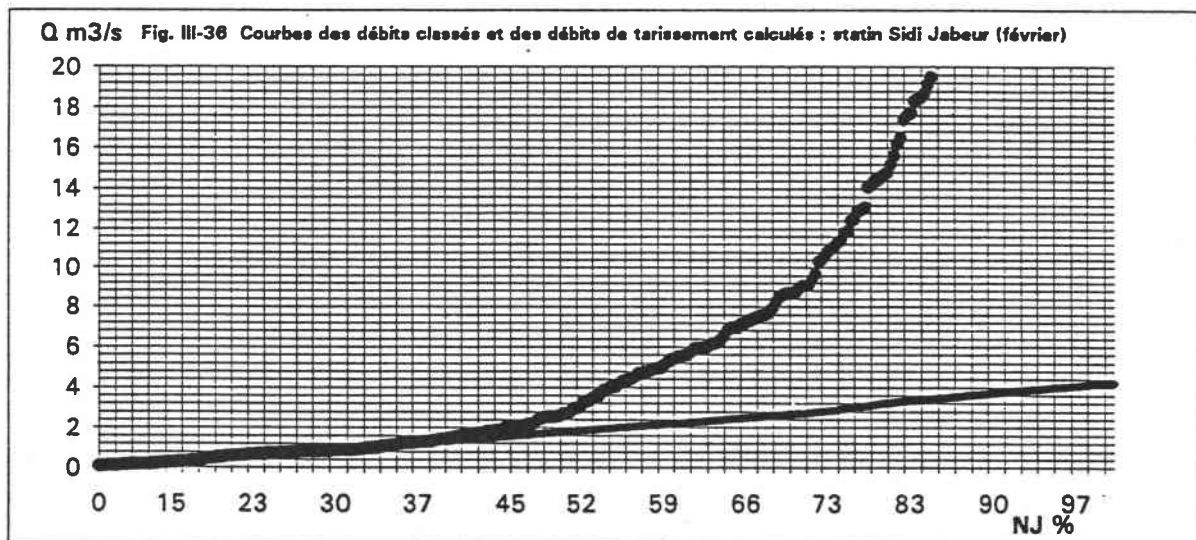
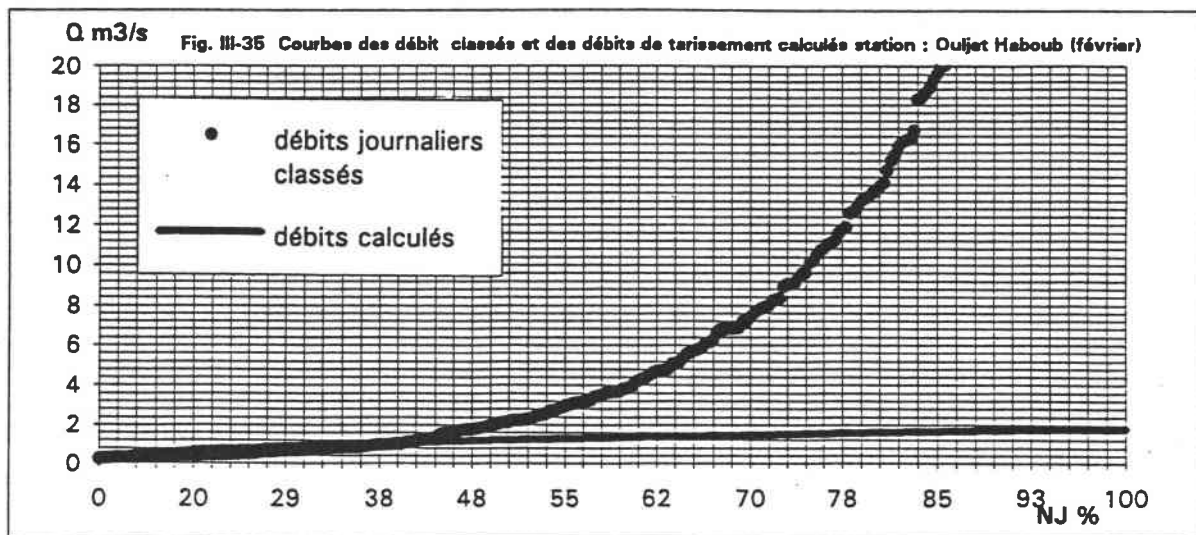


Tableau III-30 : Mode de tarissement de l'oued Grou aux stations hydrométriques, Ln Gumbel (Fréchet)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Oujet Haboub	0.00	0.00	0.00	0.01	1.06	1.62	1.05	0.94	0.21	0.00	0.00	0.00	0.41
Sidi Jabeur	0.00	0.12	0.25	0.36	1.21	1.91	1.42	1.43	0.65	0.00	0.00	0.00	0.61
Ras el Fathia	0.00	0.00	0.39	0.55	1.49	2.14	1.46	1.03	0.47	0.00	0.00	0.00	0.63

Tableau III-31 : Mode de tarissement de l'oued Grou aux stations hydrométriques, Ln Gumbel (Fréchet et C.E.G.U.M)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Oujet Haboub	0.006	0.007	0.009	0.01	1.06	1.62	1.05	0.94	0.21	0.092	0.031	0.004	0.42
Sidi Jabeur	0.007	0.12	0.25	0.36	1.21	1.91	1.42	1.39	0.65	0.078	0.019	0.003	0.62
Ras el Fathia	0.09	0.16	0.39	0.55	1.49	2.14	1.46	1.03	0.47	0.142	0.081	0.054	0.67

Tableau III-32 : Débits de nappes à pleine charge de l'oued Grou aux stations hydrométriques, (100 %) (méthode statistique C.E.G.U.M)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Oujet Haboub	0.21	0.29	0.56	0.67	1.16	1.82	1.48	1.35	1.03	0.91	0.29	0.14	0.83
Sidi Jabeur	0.18	0.31	0.65	0.89	1.39	4.23	1.85	1.57	0.82	0.63	0.16	0.06	1.06
Ras el Fathia	0.27	0.39	0.82	0.92	1.62	4.20	1.99	1.23	0.96	0.71	0.20	0.09	1.12

d'une loi de Fréchet :

$$\text{soit : } \text{Log}(Q_j) = \text{Log}(Q_{jo}) - \frac{1}{a} \text{Log}[-\text{Log}(F)]$$

$$\text{avec : } \text{Log.}(Q_{jo}) = \text{mode} = \text{Moyenne Log.}(Q_j) - [0,45(\text{Ecart type Log.}(Q_j))]]$$

$$\text{et : } a = \text{gradex de Fréchet} = 0,71[\text{Ecart type Log.}(Q_j)]$$

On établit ensuite une régression linéaire $\text{Log.}[NJ (\%)]$ en fonction des logarithmes des débits observés : $\text{Log.}(Q_j)$ pour toutes les valeurs inférieures au mode. Cette régression, qui ajuste l'alignement linéaire de ces valeurs observées en papier biol logarithmique, nous permet d'obtenir une équation de droite de type :

$$y = ax + b \quad \text{soit : } \text{Log. } Q = a \text{Log.}[NJ (\%)] + b$$

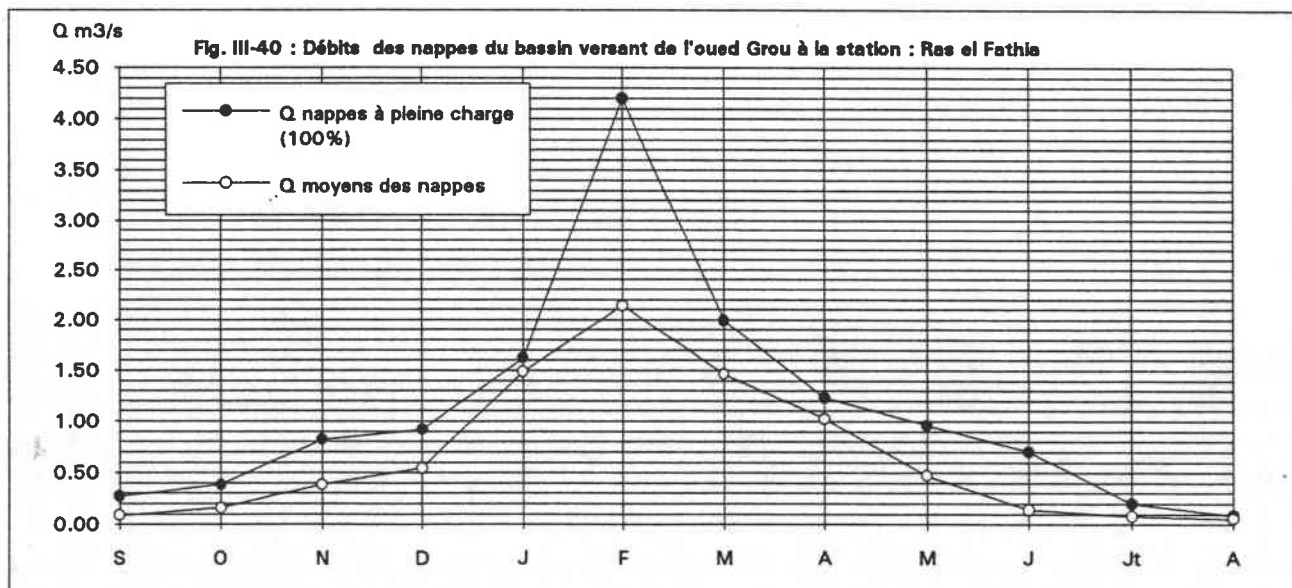
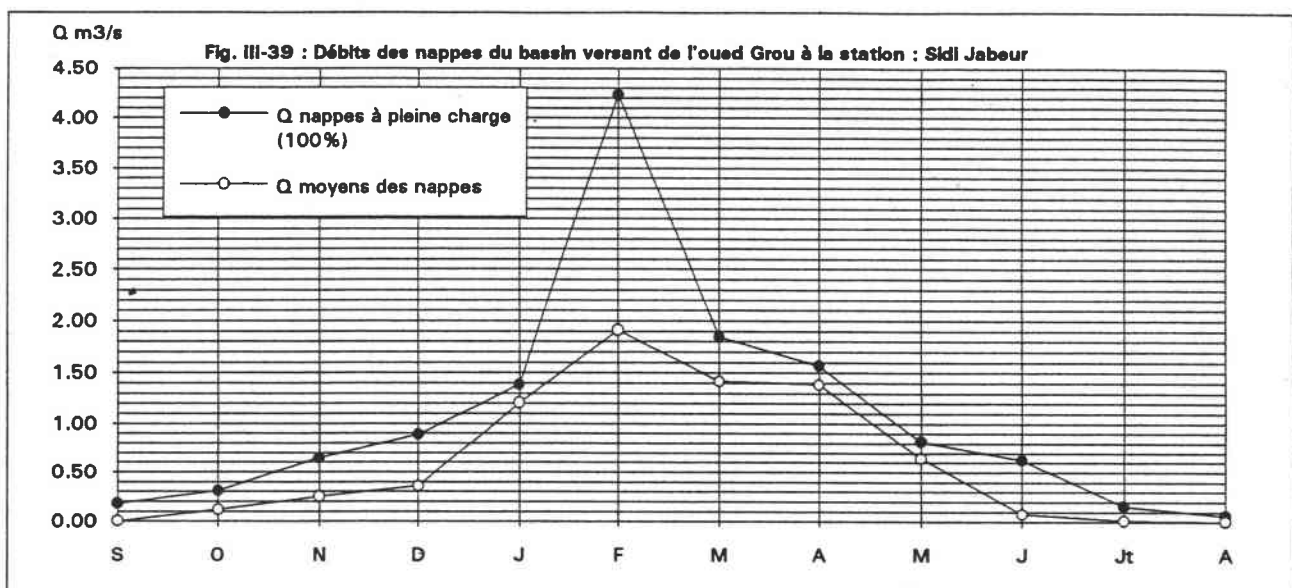
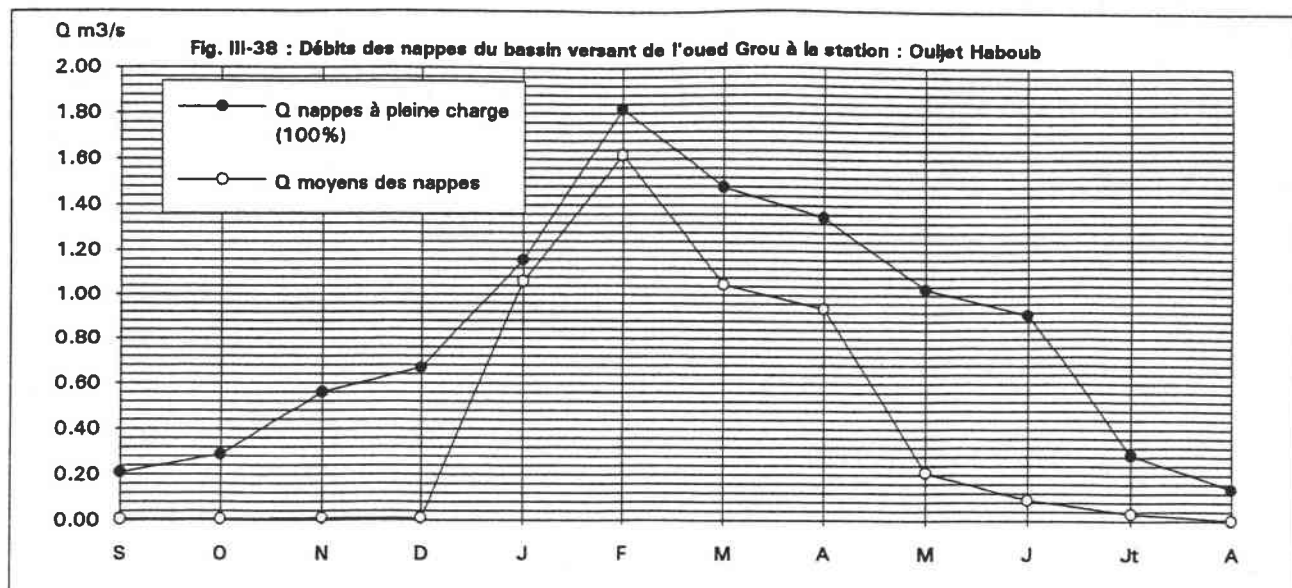
Cette équation de droite définit la vidange de la nappe. On peut caractériser cette vidange par deux valeurs particulières du débit de base :

- le débit de base moyen (correspondant au mode),
- le débit à pleine charge = débit pour $NJ (\%)$ égal à 100 %.

On peut faire quelques remarques sur la signification du mode comme limite supérieure des débits moyens journaliers des nappes, classés par ordre croissant lors des mois où les précipitations expliquent l'essentiel des débits. En effet, le mode (ou classe modale) est le débit le plus observé. Lors des mois où il pleut peu, l'application de la méthode nous oblige à éliminer tout les débits nuls et le mode ne peut être défini pour ces mois selon la loi de Fréchet ; dans ce cas, nous l'avons déterminé à partir de la méthode graphique, où le débit modal est assimilable au point d'inflexion de la courbe en valeurs arithmétiques. Les résultats obtenus par cette méthode (Cf. tableaux III-30 à III-32) sont reportés sur les figures III-38 à III-40.

En hydrogéologie, le débit de base est une fonction directe du niveau des nappes, donc, en s'appuyant sur cette relation, on peut identifier leurs phases de réalimentation et de tarissement.

Pour les débits à pleine charge, la phase de réalimentation va de septembre à février et la phase de vidange de mars à août. Le rendement maximal de la nappe est en février. Il représente 20 % à Ouljet Haboub et 33 % à Sidi Jabeur de l'écoulement



total annuel de la nappe. Le rendement minimal est en août.

En débit de base moyen, la situation est la suivante : à l'amont à Ouljet Haboub, la phase de réalimentation des aquifères n'est que de deux mois (janvier à février). Aux deux autres stations, elle suit celle du débit des nappes à pleine charge. La phase de vidange est la même que celle des débits à pleine charge aux trois stations (mars à août).

L'excessivité du régime de la nappe (rapport entre les débits maximums et minimums) montre que les réserves sont très médiocres pour l'ensemble du bassin versant de l'oued Grou. A l'exception de la station d'Ouljet Haboub, il y a peu d'écart entre le débit de la nappe à pleine charge et le débit moyen de la nappe, sauf en février. Compte tenu de la médiocrité des apports souterrains ainsi démontrée, compte tenu par ailleurs des conditions du climat, l'oued Grou ne peut avoir que des débits irrégulièrement alimentés.

3 - Les tarissements

D'après la loi de Maillet, la courbe de décrue, après la cessation de tout apport d'eau météorique, traduit l'écoulement des réserves accumulées dans le bassin versant. En première approximation, chacune de ces courbes de décrue qui représentent le tarissement peut être traduite par une fonction exponentielle de la forme :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha (t-t_0)}$$

avec Q_t : le débit à l'instant t

Q_0 : le débit à l'instant t_0 pris comme origine de tarissement

$t-t_0$: nombre de jours depuis Q_0

α : le coefficient de tarissement

La formule peut s'écrire sous la forme :

$$\text{Log } Q_t = \text{log } Q_0 - \alpha(t-t_0)$$

Ce qui linéarise les Q_t en fonction du temps.

Dans un premier temps, on a repéré ces périodes de tarissement et on les a

reporté sur papier semi-logarithmique. Le calcul de α est fait à partir de l'ajustement linéaire des débits.

Le cas de l'oued Grou, aux différentes stations, nous montre une situation complexe :

- d'abord, il n'existe pas de période longue sans débits nuls ;
- ensuite les valeurs des pentes des droites obtenues (α) sont nombreuses (Cf. tableau III-33 à III-35).

Les valeurs de α sont globalement élevées et on peut malgré tout distinguer deux groupes : un premier groupe où $0,09 < \alpha < 0,02$ et un second groupe où $\alpha \geq 0,1$.

Le premier groupe de valeurs de α correspond globalement aux périodes de hautes eaux, lorsque les nappes sont rechargées.

Le deuxième groupe correspond soit aux situations de basses eaux (été-automne), soit aux périodes hivernales ou printanières des années exceptionnellement sèches. Les valeurs élevées de α pour ce deuxième groupe montrent bien l'épuisement rapide des réserves au cours de ces périodes. Dans le premier groupe, il est impossible de fixer des limites de débits aux valeurs de α : trois valeurs décroissantes se succèdent indépendamment du niveau de débit, mais la décroissance en trois paliers semble la règle générale en hautes eaux.

Les valeurs expérimentales de α sont évaluées à l'échelle journalière. Pour pouvoir proposer un bilan hydrologique à l'échelle mensuelle, il faut extrapoler les valeurs moyennes journalières de α à des valeurs mensuelles telles que :

$$\alpha_{\text{mensuel}} = \alpha_{\text{journalier}} \times \text{nombre de jours}$$

On définit un coefficient de vidange mensuel des nappes C :

$$C = 100 (1-K) \quad K = e^{-\alpha}$$

$$\text{si } Q_t = Q_0 e^{-\alpha (t-t_0)}$$

avec $t-t_0$: nombre de mois depuis Q_0

$$\text{ou encore } Q_t = Q_0 K^t$$

Tableau III-33 Valeurs d'alpha moyen journalier bassin d'Oujet Haboub (1972-73/85-86)

Année	Mo	Oujet Haboub					Alpha
		Qo	Qt	N.Jours	Ln (Qt)	Ln (Qo)	
1975-76	Déc-Jan	1.10	0.65	15	0.095	-0.431	0.036
1975-76	Déc-Jan	-	-	-	-	-	-
1975-76	Déc-Jan	-	-	-	-	-	-
1976-77	Mars	6.00	3.10	9	1.792	1.131	0.073
1976-77	Mars	3.00	1.50	15	1.099	0.405	0.046
1976-77	Mars	-	-	-	-	-	-
1978-79	Mars-Avril	0.41	0.23	9	-0.892	-1.470	0.064
1978-79	Mars-Avril	-	-	-	-	-	-
1978-79	Mars-Avril	-	-	-	-	-	-
1978-79	Juin	0.45	0.13	4	-0.799	-2.040	0.310
1979-80	Novembre	3.10	1.20	7	1.131	0.182	0.136
1979-80	Novembre	1.10	0.70	10	0.095	-0.357	0.045
1981-82	Novembre	0.42	0.21	19	-0.868	-1.581	0.036
1981-82	Juin	-	-	-	-	-	-
1982-83	Janvier	-	-	-	-	-	-
1982-83	Janvier	-	-	-	-	-	-
1983-84	Février	0.36	0.29	11	-1.022	-1.238	0.020
1985-86	Octobre	0.19	0.03	4	-1.661	-3.507	0.461
1985-86	Juin	4.80	1.40	5	1.569	0.336	0.246
1985-86	Juin	1.30	0.40	10	0.262	-0.916	0.118
1985-86	Juin	-	-	-	-	-	-

Tableau III-34 Valeurs d'alpha moyen journalier bassin de Sidi Jabeur (1972-73/85-86)

Année	Mo	Sidi Jabeur					Alpha
		Qo	Qt	N.Jours	Ln (Qt)	Ln (Qo)	
1975-76	Déc-Jan	2.80	1.30	4	1.030	0.282	0.192
1975-76	Déc-Jan	1.20	0.15	23	0.182	-1.897	0.090
1975-76	Déc-Jan	1.10	0.90	8	0.095	-0.105	0.025
1976-77	Mars	5.60	3.60	9	1.723	1.281	0.049
1976-77	Mars	3.50	2.40	12	1.253	0.875	0.031
1976-77	Mars	-	-	-	-	-	-
1978-79	Mars-Avril	1.22	0.76	7	0.199	-0.274	0.068
1978-79	Mars-Avril	0.72	0.54	9	-0.329	-0.618	0.032
1978-79	Mars-Avril	0.52	0.35	6	-0.654	-1.050	0.066
1978-79	Juin	0.17	0.10	20	-1.772	-2.303	0.027
1979-80	Novembre	3.80	2.10	6	1.335	0.742	0.099
1979-80	Novembre	2.00	1.05	8	0.693	0.049	0.081
1981-82	Novembre	1.90	0.50	7	0.642	-0.693	0.191
1981-82	Juin	0.48	0.18	9	-0.734	-1.715	0.109
1982-83	Janvier	0.32	0.07	8	-1.139	-2.659	0.190
1982-83	Janvier	-	-	-	-	-	-
1983-84	Février	0.23	0.06	21	-1.470	-2.813	0.064
1985-86	Octobre	-	-	-	-	-	-
1985-86	Juin	2.20	1.20	11	0.788	0.182	0.055
1985-86	Juin	-	-	-	-	-	-
1985-86	Juin	-	-	-	-	-	-

Tableau III-35 Valeurs d'alpha moyen journalier bassin de Ras el Fathia (1972-73/85-86)

Année	Mo	Ras el Fathia					Alpha
		Qo	Qt	N.Jours	Ln (Qt)	Ln (Qo)	
1975-76	Déc-Jan	1.80	1.15	4	0.588	0.140	0.112
1975-76	Déc-Jan	1.05	0.40	12	0.049	-0.916	0.090
1975-76	Déc-Jan	0.37	0.20	18	-0.994	-1.609	0.034
1976-77	Mars	9.60	5.00	9	2.262	1.609	0.072
1976-77	Mars	4.80	2.70	13	1.569	0.993	0.044
1976-77	Mars	2.50	1.80	11	0.916	0.588	0.030
1978-79	Mars-Avril	1.70	1.30	5	0.531	0.282	0.054
1978-79	Mars-Avril	1.25	0.95	10	0.223	-0.051	0.027
1978-79	Mars-Avril	0.82	0.64	8	-0.083	-0.446	0.045
1978-79	Juin	0.58	0.31	22	-0.545	-1.171	0.028
1979-80	Novembre	5.00	2.30	8	1.609	0.833	0.129
1979-80	Novembre	2.20	1.20	8	0.788	0.182	0.076
1981-82	Novembre	0.52	0.24	12	-0.654	-1.427	0.064
1981-82	Juin	-	-	-	-	-	-
1982-83	Janvier	0.32	0.07	9	-1.139	-2.659	0.169
1982-83	Janvier	0.06	0.02	5	-2.813	-3.912	0.220
1983-84	Février	0.30	0.08	22	-1.204	-2.813	0.073
1985-86	Octobre	-	-	-	-	-	-
1985-86	Juin	1.30	0.50	4	0.262	-0.693	0.239
1985-86	Juin	0.45	0.40	7	-0.799	-0.916	0.017
1985-86	Juin	-	0.40	0.17	6	-0.916	-1.772

Tableau III-36 Valeurs d'alpha moyen journalier et mensuel aux bassins versants (1972-73/85-86)

	Alpha moyenne	K jour %	C jour %	Alpha mensuelle	K mensuelle %	C mensuelle %
Oujet Haboub	0.254	0.78	0.22	7.62	0.00	0.999
	0.133	0.88	0.12	3.99	0.02	0.98
	0.046	0.96	0.04	1.38	0.25	0.75
Sidi Jabeur	0.17	0.84	0.16	5.1	0.01	0.99
	0.086	0.92	0.08	2.68	0.08	0.92
	0.057	0.94	0.06	1.71	0.18	0.82
Ras el Fathia	0.169	0.84	0.16	5.07	0.01	0.99
	0.087	0.92	0.08	2.61	0.07	0.93
	0.05	0.95	0.05	1.5	0.22	0.78

alors, volume nappe_t = volume de nappe_o × K' (même loi de tarissement).

On peut exprimer la relation qui existe entre le volume de nappe et Q en raisonnant en lame d'eau mensuelle :

$$\text{pour } t = 1_{\text{mois}} : V_1 = V_0 K$$

$$Q_o = V_0 (1-K)$$

Le coefficient de vidange C s'exprime en pourcentage (Cf. tableau III-36). Il permet d'estimer la part du volume des nappes que représente l'écoulement mensuel de base.

Les deux groupes de situations, correspondant aux deux groupes de α, donnent pour les valeurs mensuelles du coefficient de vidange C :

- en situation en hautes eaux, le coefficient de vidange est de l'ordre de 80 % (75 % à Ouljet Haboub, 82 % à Sidi Jabeur et 78 % à Ras el Fathia)

- en situation de basses eaux et au cours des années sèches, la nappe se vidange quasi complètement en 1 mois (99 % à Ras el Fathia et Sidi Jabeur et ≈100 % à Ouljet Haboub).

Ces valeurs du coefficient de vidange, quel que soit leur degré de précision, confirme la quasi inexistence des réserves en eaux souterraines du bassin versant. A titre de comparaison, sur des bassins où existent de bonnes nappes, les valeurs du coefficient de vidange mensuel sont de l'ordre de 10 à 20 %.

4 - La comparaison des résultats des méthodes

En année moyenne, les résultats des débits de nappes obtenus par la méthode de l'IEB et la méthode statistique montrent des similitudes remarquables, comme l'indiquent le tableau suivant.

Tableau III-37 : Synthèse des résultats obtenus par les méthode de l'IEB et statistique (C.E.G.U.M)

Bassin versant	Module (m ³ /s)	Débit moyen de nappe (m ³ /s)	Q moyen de nappe/Module	IEB (%)
Ouljet Haboub	3,7	0,42	11	14
Sidi Jabeur	4,61	0,62	13	14
Ras el Fathia	5,2	0,67	13	13

Les résultats assez proches des deux méthodes déterminent bien la faible part de l'écoulement de base dans l'écoulement total (13 %), ils confirment que les réserves sont généralement très médiocres pour l'ensemble du bassin versant de l'oued Grou.

De plus, la décroissance des débits moyens de nappe (méthode statistique C.E.G.U.M), entre février et août, paraît suivre la loi de Maillet, et l'aspect des ajustements linéaires pour ces débits mensuels est très proche de celui des ajustements en journalier (Cf. annexes III-7 et III-8).

La valeur de α mensuel moyen de cette loi ($\approx 0,6$) est cependant nettement plus faible que celles obtenues dans l'étude du tarissement (l'extrapolation mensuelle donne α_{mensuel} entre 1,3 et 7). Cette différence tient au fait que la première approche est globale et moyenne pour la période d'étude (elle donne des coefficients mensuels moyens de vidange de nappe de l'ordre de 40 à 50 %), alors que la seconde, événementielle, s'appuie sur des épisodes indépendants et ponctuels.

Il faudrait pousser l'analyse plus loin pour comprendre les raisons de cette divergence apparente, mais on peut cependant noter qu'en milieu océanique (S. LEBAUT, 1995), les résultats semblent converger d'avantage. En milieu méditerranéen semi-aride, la méthode statistique et l'IEB ne sont peut-être pas aussi appropriés pour différencier les écoulements. Ils risquent de sous-estimer la part du ruissellement, notamment lorsqu'il provient de la phase de ressuyage des sols.

Ainsi, l'application de ces deux méthodes a permis d'obtenir une explication probable du comportement hydrologique de l'oued Grou et une quantification de l'écoulement de base dans l'écoulement total. Cette partition reste cependant à valider par le bilan hydrologique.

V - LE BILAN HYDROLOGIQUE

L'établissement du bilan hydrologique permet de proposer un schéma de fonctionnement du bassin de l'oued Grou ainsi qu'une analyse de son régime et des saisons hydrologiques. Il a pour but d'évaluer, à partir des lames d'eau écoulées, les apports qui se traduisent par l'infiltration de l'eau précipitée dans le bassin et les pertes qui s'expriment à travers l'évapotranspiration.

L'étude sera effectuée pour chaque bassin correspondant à une station hydrométrique afin préciser l'impact de chaque milieu sur la quantité des écoulements.

A - LA METHODE UTILISEE

Pour notre étude, nous avons effectué un bilan moyen mensuel s'inspirant de la méthode de Thornthwaite à un réservoir sol et un réservoir sous-sol modifiée dans le programme informatique développé par E. Gille (C.E.G.U.M). Il utilise plusieurs variables : les précipitations (les entrées), les réserves du sol (RU) et du sous-sol (les réservoirs), l'évapotranspiration potentielle et réelle (les pertes) et les écoulements superficiels et souterrains (les sorties), (Cf. Fig. III-41).

Le bilan hydrologique s'exprime par la relation suivante :

$$Pu = E + ETR + Dr$$

$$Pu : P(1-C.Ec)(1-C.Inf).$$

P : Précipitations en mm.

$C.Ec$: Coefficient d'écoulement de crue.

$C.Inf$: Coefficient d'infiltration.

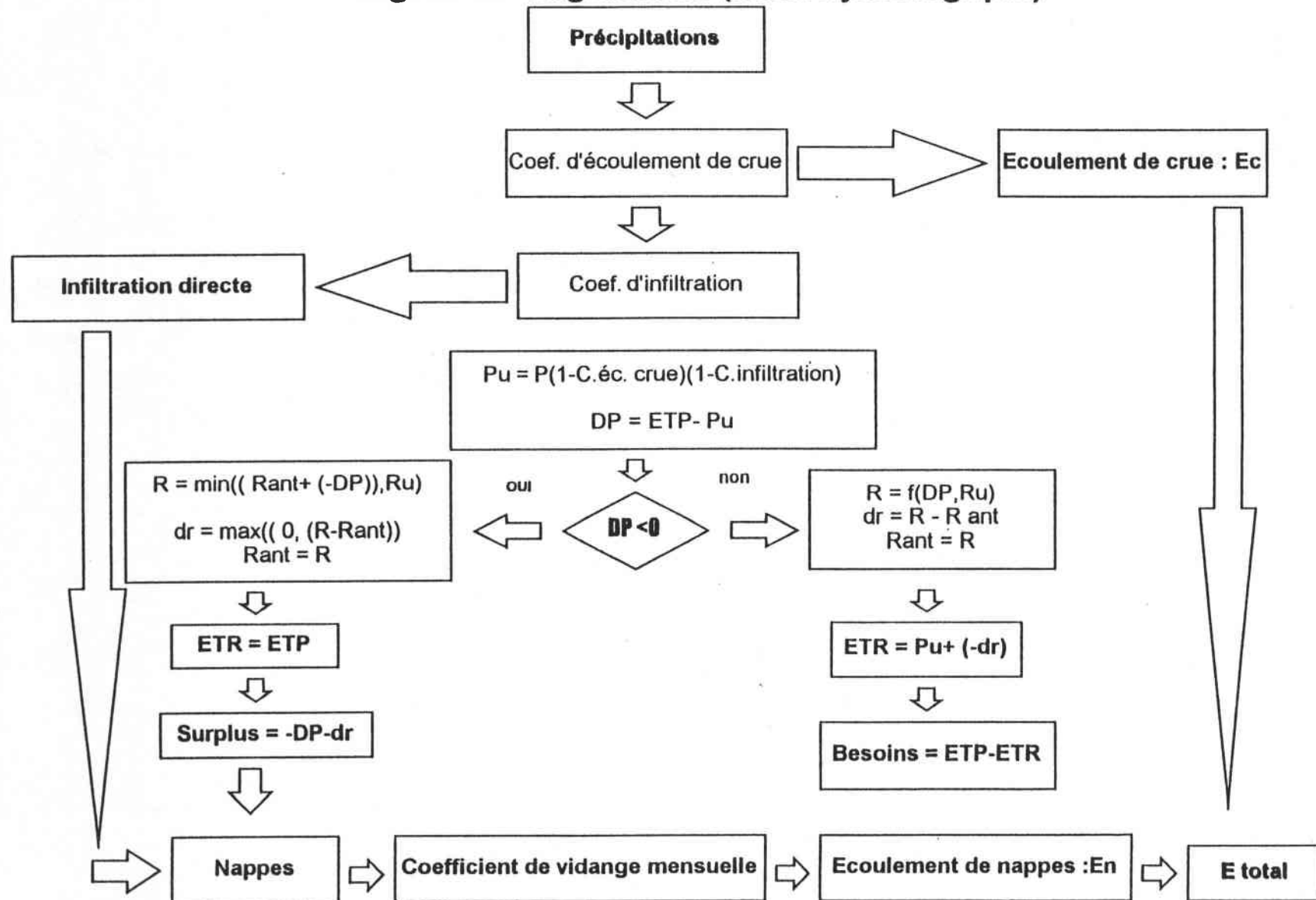
E : Ecoulements en mm.

ETR : Evapotranspiration réelle en mm (RU).

Dr : Variation des réserves en eau du sol et de sous-sol en mm.

En année moyenne $Dr = 0$

Fig. III-41 Algorithme (bilan hydrologique)



Le principe de ce programme repose sur la détermination des paramètres représentant quelques étapes clés du système : le coefficient d'écoulement de crue (ruissellement), le coefficient d'infiltration directe et le coefficient de vidange des nappes.

Les calculs de ce bilan ont été effectués en utilisant les précipitations moyennes des bassins versants calculées par le modèle pluviométrique et l'ETP végétations méditerranéennes (voir deuxième partie).

L'épuisement de la réserve du sol est simulé par un calcul qui en fait une fonction logarithmique du déficit pluviométrique cumulé mensuel (Thornthwaite, 1955). Celle-ci est utilisée pour rendre compte de l'évolution exponentielle du potentiel capillaire du sol (P_F) et de sa conséquence, la difficulté des plantes à extraire l'eau de la zone non saturée.

Pour conceptualiser le plus possible le fonctionnement du milieu naturel, la modélisation du bilan hydrologique du bassin versant s'appuie sur le calage des coefficients permettant de représenter à l'échelle mensuelle un écoulement de crue et une infiltration directe, et à l'échelle annuelle, la vidange des réserves en eau souterraine. La comparaison des débits calculés et mesurés permet de procéder au calage de ces coefficients. Les valeurs qui servent de références sont celles qu'on a dégagées de l'étude des crues (coefficient d'écoulement de crue), de l'étude des basses eaux (part de l'écoulement de base dans l'écoulement total) et de l'étude des tarissements (coefficient de vidange mensuelle des nappes dans les tarissements et la méthode statistiques).

Les précipitations utiles (P_u) correspondent à la partie des quantités des précipitations dirigées vers la réserve du sol, en dehors des lames d'eau ruisselées et de l'infiltration directe. L'ETR est ainsi la conséquence de la comparaison de P_u et l'ETP et l'état de la réserve du sol.

Nous admettons donc, si les précipitations utiles mensuelles (P_u) sont supérieures à l'ETP : $ETR = ETP$ et, dans le cas contraire, si ETP est supérieure aux précipitations, $ETR = P_u + \Delta r$.

B - LE BILAN HYDROLOGIQUE EN ANNEE MOYENNE

Dans l'hypothèse d'un cycle complet, le bilan à l'échelle annuelle et pour une série d'années suffisamment grande, les variations des réserves s'équilibrent. L'équation du bilan hydrologique d'un bassin versant peut se résumer alors :

$$P = E + Dq$$

P : précipitations réelles (mm).

E : lames d'eau moyennes annuelles écoulée (mm).

Dq : déficit d'écoulement, soit l'évapotranspiration réelle ETR (mm).

Pour le bassin versant de l'oued Grou, ces relations du bilan ont été calculées et vérifiées pour les trois bassins aux stations hydrométriques pour l'année moyenne et les deux séquences humide et sèche.

La période de référence du bilan est aussi l'année hydrologique, elle s'étale de septembre à août. Les valeurs sont calculées sur toute la période d'étude (1972-73/1985-86) et sur les deux séquences humide (1976-77/79-80) et sèche (1980-81/84-85). Les résultats sont portés dans les tableaux III-38 et III-39.

Les résultats obtenus en moyenne annuelle peuvent être comparés avec le calcul de l'ETR annuel selon les formules de Turc et Coutagne ; l'ETR est assimilable au déficit annuel de l'écoulement (Dq).

ETR Turc et Coutagne : les formules de Turc et Coutagne permettent d'évaluer l'évapotranspiration réelle en fonction de la température et des précipitations :

$$\text{ETR annuelle Turc (mm)} = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

avec : P = précipitations annuelles (mm)

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

et T = température moyenne annuelle en °c.

Tableau III-38 : Bilan hydrologique du bassin versant de l'oued Grou aux stations hydrométriques en mm, année moyenne (1972-73/85-86)

Bassin versant	Surface (km ²)	ETP	P	E mesuré	Dq = (P - E)	ETR (Coutagne)	ETR (Turo)	ETR (Bilan)	E nappes	E nappes %	Ruisselement	Besoins
Oujjet Maboub	1827	1132	510	72	438	432	437	437	12	18	61	895
Sidi Jabour	3087	1105	451	48	405	390	397	405	7	15	39	700
Ras el Fathia	3540	1104	445	47	399	385	392	399	7	15	39	705

Tableau III-39 : Bilan hydrologique du bassin versant de l'oued Grou aux stations hydrométriques en mm, séquence humide (1976-77/79-80) et séquence sèche(1980-81/84-85)

Bassin versant	Séquence	ETP	P	E mesuré	Dq = (P - E)	ETR	E nappes	Ruisselement	Besoins
Oujjet Maboub	humide (1976-77/79-80)	1130	645	121	524	525	15	105	805
	sèche (1980-81/84-85)	1145	375	34	341	342	8	25	803
Sidi Jabour	humide (1976-77/79-80)	1102	578	88	492	492	12	74	610
	sèche (1980-81/84-85)	1112	342	25	317	317	7	18	795
Ras el Fathia	humide (1976-77/79-80)	1099	567	86	481	482	12	73	617
	sèche (1980-81/84-85)	1112	341	23	319	319	7	15	793

$$\text{ETR annuelle Coutagne (m)} = P - \lambda P^2$$

$$\text{avec : } \lambda = \frac{1}{(0.8 + 0.14T)}$$

P = précipitations annuelles (m)

et T = température moyenne annuelle en °c.

En année moyenne, l'évapotranspiration réelle est égale au déficit moyen annuel d'écoulement ($Dq = ETR$), nous pouvons donc proposer une valeur d'écoulement :

$$E = P - Dq$$

E = lame d'eau moyenne annuelle écoulée en mm.

P = lame d'eau moyenne annuelle précipitée en mm.

Dq = déficit moyen annuel d'écoulement en mm.

Le tableau III-38 nous permet de comparer les données du bilan hydrologique en année moyenne des différents bassins aux stations hydrométriques.

D'après ces résultats, on constate que :

- la lame d'eau écoulée est généralement faible pour les trois bassins. Elle correspond à 14 % des précipitations moyennes annuelles du bassin versant amont à Ouljet Haboub. Pour le bassin versant aval à la station de Ras el Fathia, la lame d'eau écoulée reste proche de celle du bassin versant intermédiaire à la station de Sidi Jabeur. Elle ne représente que 11 % des précipitations moyennes annuelles;

- le déficit d'écoulement est généralement fort pour les trois bassins. Ses valeurs, entre 400 et 440 mm, représentent 86 à 90 % des précipitations moyennes annuelles. En théorie, l'ETR (bilan) devrait être égale au déficit d'écoulement, c'est le cas de notre bassin versant aux trois stations. Les valeurs, calculées d'après les formules de Turc et Coutagne, sont proches des valeurs d'ETR bilan. Ceci indique que l'approximation de l'ETR calculée à partir de ces deux formules est satisfaisante;

- les valeurs de l'évapotranspiration potentielle ETP "végétations méditerranéennes" sont de 2.6 à 2.8 fois supérieures à celles du déficit d'écoulement. La relation entre l'ETP et l'ETR montre un besoin en eau qui correspond en fait aux besoins d'irrigation, on l'appelle "déficit agricole" ou "déficit d'évaporation". Ses valeurs, de l'ordre de 700 mm, représentent entre 1,4 et 1,6 fois les précipitations moyennes annuelles aux trois bassins.

- le bilan permet également de proposer une répartition des écoulements qui confirme que les conditions hydrologiques de l'ensemble du bassin versant sont favorables plutôt au ruissellement ($\approx 85\%$ de l'écoulement total) qu'à la constitution de réserves souterraines ($\approx 15\%$).

Ce bilan en année moyenne valide les méthodes utilisées préalablement dans la mesure où les résultats obtenus sont cohérents entre eux et d'une station à l'autre :

- les précipitations, calculées par le modèle pluviométrique (Cf. deuxième partie), sont en harmonie avec les différentes estimations de l'ETR et l'écoulement mesuré. On peut noter que les orages locaux, non pris en compte en raison de la faible densité du réseau pluviométrique, n'altèrent pas la qualité des résultats;

- l'essentiel de l'eau écoulee par l'oued Grou est une eau de surface. Le bilan hydrologique confirme le faible volume des réserves en eaux souterraines et leur vidange rapide qu'avait révélés l'étude des basses eaux et des tarissements. La part de l'infiltration dans les écoulements est de l'ordre de 10 à 15 %, (IEB : 14 %, méthode statistique : 13 % et bilan : 15 %) et les coefficients de vidange mensuels de ces réserves sont proches de ceux qu'on dégage de la méthode statistique, en moyenne annuelle (coefficient de vidange mensuel $\approx 50\%$). Ils sont inférieurs à ceux tirés de l'étude particulière des épisodes de tarissement, ce qu'on peut attribuer à la différence d'échelle de temps.

Les valeurs moyennes calculées pour toute la période d'étude cachent certainement des variations interannuelles, la comparaison des deux séquences humide et sèche le prouve (Cf. tableau III-39).

Le caractère humide ou sec des séquences d'années modifie l'ETR et les besoins sont satisfaits dans une proportion moindre que la variation des précipitations : tandis que les pluies augmentent de 75 %, l'ETR s'élève de 55 % et les besoins non satisfaits diminuent de 25 %, confirmant la relation non linéaire entre précipitations et déficit d'écoulement.

Par ailleurs, la part de l'écoulement de nappe reste toujours faible en valeur absolue ; en revanche, ses valeurs relatives par rapport à l'écoulement total passent de 25 - 30 % en séquence sèche à 12 - 14 % en séquence humide.

Ces résultats reposent sur une analyse à l'échelle mensuelle dont on peut tirer d'autres renseignements.

C - L'ETUDE DES DONNEES MENSUELLES DU BILAN

La modélisation du bilan hydrologique moyen annuel s'appuie sur une démarche déterministe consistant à approcher la représentation du fonctionnement du milieu naturel par un calage de paramètres (Cf. tableaux III-40 à III-42, Fig. III-42 à III-44 et annexe III-9). Le calage sert à régler, à l'aide de coefficients, les relations entre les différentes variables mesurées (précipitations, ETP, écoulement). En retour, il fait apparaître des comportements originaux du bassin que les analyses antérieures n'avaient pas révélées :

- le coefficient de ruissellement varie en fonction des précipitations mensuelles, de la saison, du caractère humide ou sec de l'année et selon les bassins versants. Ses valeurs maximales au cours de l'année sont les plus élevées à l'amont (26 % en année moyenne, 43 % en année humide, 15 % en année sèche) ; aux stations aval elles sont 1/3 plus faibles (18 , 31 et 9 à Sidi Jabeur, 20 , 30 et 7 à Ras el Fathia). Le bilan met en évidence également le faible ruissellement automnal, à l'exception du mois de septembre dont le caractère fortement ruisselant s'affirme dans tous les cas, alors que les précipitations restent inférieures à 20 mm. Faute d'information, il est difficile d'attribuer ce phénomène à l'intensité des pluies ou à de forts orages trop localisés ;

- le coefficient d'infiltration directe est toujours faible (entre 2 et 2,5 %) et peu variable dans le temps et dans l'espace. Ses valeurs traduisent une fois de plus le caractère peu absorbant du substratum du bassin versant ;

Bilan hydrologique de l'oued Grou en année moyenne (1972-73/85-86)

Tableau III-40 : Bassin versant Ouljet Haboub (Surface 1627 km², Coefficient de vidange 40%)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
P (précipitations)	17	46	45	69	72	76	59	70	32	18	2	4	510
ETP	105	71	50	40	41	47	73	97	126	158	170	156	1132
Pu (précipitations utiles)	15	43	42	61	59	54	52	60	29	16	2	4	437
DP (déf. Pluv. = ETP-Pu)	90	28	8	-21	-18	-7	21	37	97	140	168	152	
DP cumulé	229	229	229	43	12	4	25	62	159	229	229	229	
dr	0	0	0	21	18	7	-16	-16	-12	-2	0	0	
R (état de la réserve)	0	0	0	21	39	46	30	14	2	0	0	0	
ETR	15	43	42	40	41	47	68	76	41	18	2	4	437
Besoins	90	28	8	0	0	0	5	21	85	138	168	152	695
Surplus	0	1	1	2	2	2	1	2	1	0	0	0	12
Surplus total	1	2	2	3	4	4	3	4	3	2	1	1	
Coef. de crues	9	5	5	8	15	26	10	12	5	10	0	1	
Coef. d'infiltration	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Qn (écoulement de nappe)	0	1	1	1	2	2	1	2	1	1	0	0	12
Qo (écoulement de orue)	2	2	2	6	11	20	6	8	2	2	0	0	61
Qe (écoulement estimé)	2	3	3	7	13	22	7	10	3	3	0	0	73
Qm (écoulement mesuré)	2	3	3	6	13	22	7	10	4	3	0	0	73

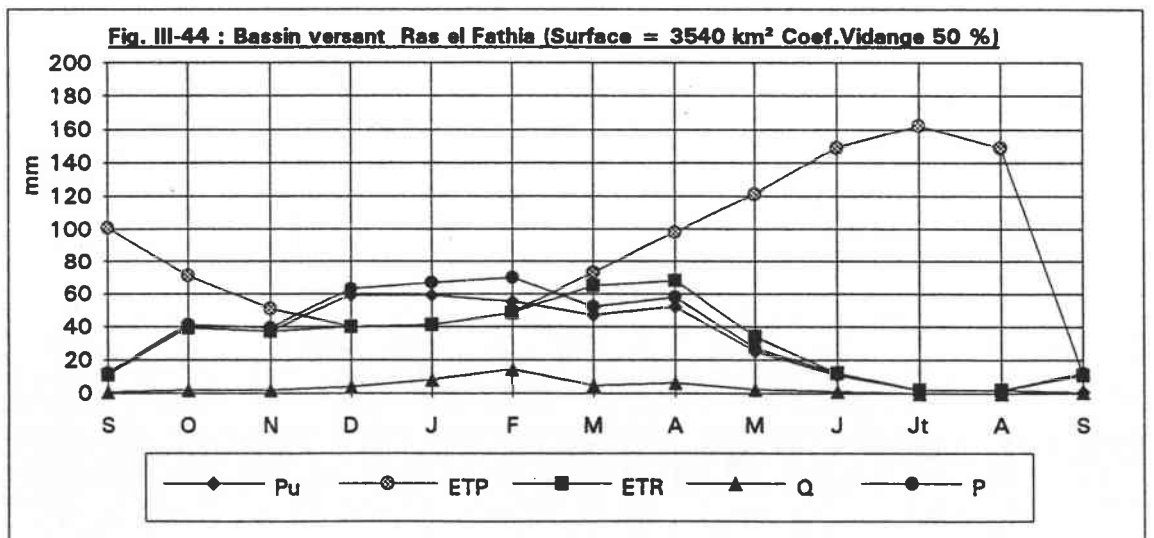
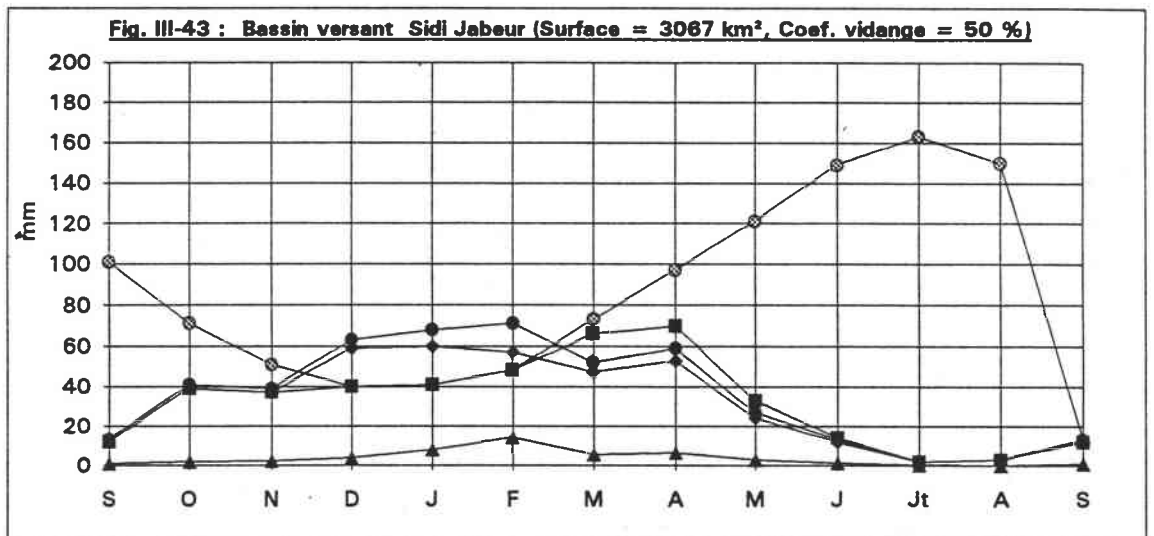
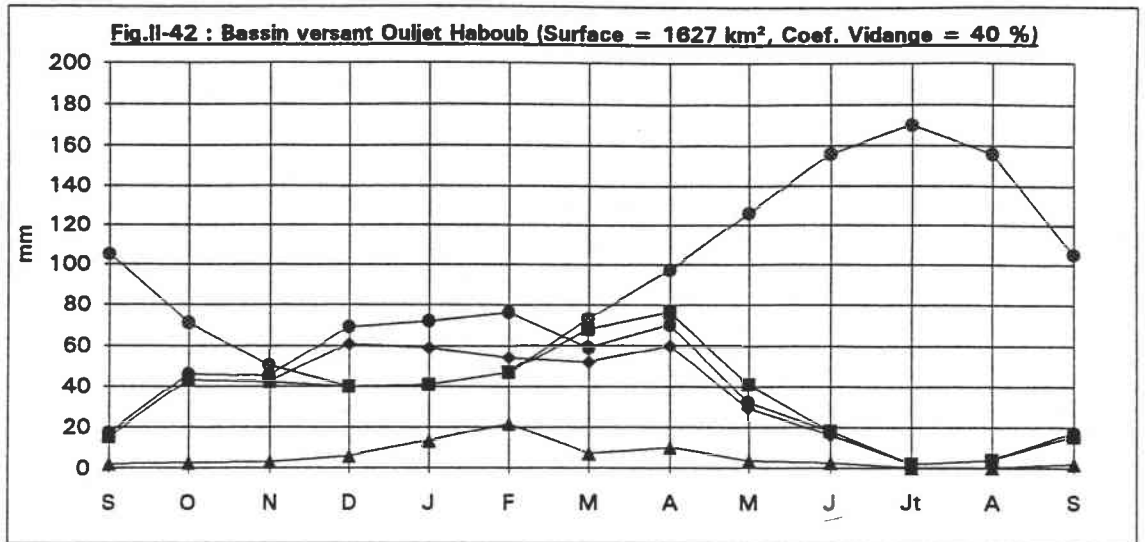
Tableau III-41 Bassin versant Sidi Jabeur (Surface 3067 km², Coefficient de vidange 50%)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
P (précipitations)	13	41	39	63	68	71	52	59	27	13	2	3	451
ETP	101	71	51	40	41	48	73	97	121	149	163	150	1105
Pu (précipitations utiles)	12	39	37	59	60	57	47	53	24	12	2	3	405
DP (déf. Pluv. = ETP-Pu)	89	32	14	-19	-19	-9	26	44	97	137	161	147	
DP cumulé	229	229	229	48	14	3	29	73	170	229	229	229	
dr	0	0	0	19	19	9	-19	-17	-9	-2	0	0	
R (état de la réserve)	0	0	0	19	38	47	28	11	2	0	0	0	
ETR	12	39	37	40	41	48	66	70	33	14	2	3	405
Besoins	89	32	14	0	0	0	7	27	88	135	161	147	700
Surplus	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
Surplus total	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
Coef. de crues	5	3	3	5	11	18	7	8	10	10	0	1	
Coef. d'infiltration	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Qn (écoulement de nappe)	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
Qo (écoulement de orue)	1	1	1	3	7	13	4	5	3	1	0	0	39
Qe (écoulement estimé)	1	2	2	4	8	14	5	6	3	1	0	0	46
Qm (écoulement mesuré)	1	2	2	4	8	14	5	6	3	1	0	0	46

Tableau III-42 : Bassin versant Ras el Fathia (Surface 3540 km², Coefficient de vidange 50%)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
P (précipitations)	12	41	39	63	67	70	52	58	27	12	2	2	445
ETP	101	71	51	40	41	48	73	98	121	149	162	149	1104
Pu (précipitations utiles)	11	39	37	59	59	55	47	52	25	11	2	2	399
DP (déf. Pluv. = ETP-Pu)	90	32	14	-19	-18	-7	26	46	96	138	160	147	
DP cumulé	229	229	229	48	15	6	32	78	174	229	229	229	
dr	0	0	0	19	18	7	-18	-16	-9	-1	0	0	
R (état de la réserve)	0	0	0	19	37	44	26	10	1	0	0	0	
ETR	11	39	37	40	41	48	65	68	34	12	2	2	399
Besoins	90	32	14	0	0	0	8	30	87	137	160	147	705
Surplus	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
Surplus total	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
Coef. de crues	5	3	3	5	10	20	7	8	8	5	0	0	
Coef. d'infiltration	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Qn (écoulement de nappe)	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
Qo (écoulement de orue)	1	1	1	3	7	14	4	5	2	1	0	0	39
Qe (écoulement estimé)	1	2	2	4	8	15	5	6	2	1	0	0	46
Qm (écoulement mesuré)	1	2	2	4	8	15	5	6	3	1	0	0	47

Bilan hydrologique de l'oued Grou en année moyenne (1972-73/85-86)



- la réserve utile règle l'évapotranspiration réelle et en conséquence les débits. Lorsqu'elle atteint son niveau maximal (R_u), le surplus est destiné aux nappes. Sur le bassin versant de l'oued Grou, il est apparu que ce niveau maximal était variable selon qu'on établissait le bilan en année moyenne, humide, ou sèche : une R_u sous-estimée accroissait considérablement l'infiltration vers les nappes et sous-estimait l'ETR. La R_u représente en fait toutes les accumulations superficielles, dans le sol ou en surface. En moyenne, elle n'atteint pas 50 mm, mais en année humide, il a fallu admettre que l'ensemble de la rétention d'eau (R) sur le bassin pouvait atteindre 150 mm (146 mm à Ouljet Haboub en février, au cours des années humides). La rétention se fait alors, comme c'est le cas fréquemment après les précipitations, dans les Dayas (cuvettes topographiques sans exutoire et à fond imperméable) ;

- la valeur du coefficient de vidange mensuel des réserves souterraines montre qu'il n'existe pas à proprement parler de nappe dans le bassin : en un mois, la moitié, au moins, des réserves est écoulée. La faiblesse des réserves (elles atteignent au maximum 1 à 4 mm pour l'ensemble du bassin versant) et la rapidité de la vidange ne permettent pas de déterminer ce coefficient avec plus de précision, ce que l'on avait déjà constaté lors de l'étude des tarissements.

L'étude du bilan confirme la répartition des saisons abordées précédemment (saison hivernale et sèche) avec cependant une faible constitution des réserves durant la période hivernale et leur épuisement rapide durant les premiers mois de la saison estivale. Elle montre que le bassin versant de l'oued Grou se caractérise par un régime de type pluvio-évaporal du domaine méditerranéen semi-aride, avec cependant des débits élevés correspondant à des pluies abondantes durant la période hivernale et des débits faibles conditionnés essentiellement par la faiblesse des précipitations et l'évapotranspiration intense durant la période estivale, et l'absence presque totale de réserves hydrologiques (bassin versant essentiellement imperméable).

CONCLUSION

L'étude hydrologique a permis de définir les caractéristiques générales du régime de l'écoulement du l'oued Grou à des échelles de temps différentes, annuelle, saisonnière et mensuelle.

D'après le régime interannuel, on constate une variabilité des débits qui se caractérise par une opposition entre deux saisons, une saison humide de décembre à avril et une saison sèche de mai à novembre. Les écoulements durant l'année se répartissent en hautes eaux moyennes d'hiver et en basses eaux moyennes d'été. Les hautes eaux et les crues sont largement modulées par une pluviométrie importante combinée avec les caractéristiques imperméables du substratum de l'ensemble du bassin versant. De même les basses eaux et le caractère des étiages dépendent fondamentalement d'une absence presque totale des précipitations, de l'effet important de l'évapotranspiration et du faible rendement des nappes : bassin versant essentiellement imperméable.

L'étude du bilan hydrologique a permis aussi de souligner le rôle important joué par les formations imperméables du substratum qui favorisent plutôt le ruissellement que l'infiltration des eaux précipitées, le faible soutien des nappes et l'effet dominant de l'évapotranspiration qui déterminent un débit limité dans le temps et l'espace.

D'une façon générale, le bassin versant du l'oued Grou se caractérise par un régime de type pluvio-évaporal méditerranéen semi-aride. Dans l'écoulement très variable, lié à la variabilité et à l'abondance des précipitations, et à l'effet régulier de l'évapotranspiration, on peut distinguer :

- un ruissellement direct lié à l'extension des formations imperméables ;
- un écoulement de base faible, pratiquement nul en été, lié essentiellement au faible rendement du sous-sol, qui se combine à l'effet dominant de l'évapotranspiration pour déterminer des étiages très sévères.

CONCLUSION GENERALE

Les ressources naturelles, que l'on croyait disponibles à jamais, deviennent un bien économique coûteux et rare. C'est le cas pour les ressources en eaux, comme le soulignait S. M. le roi HASSAN II lors de l'inauguration du barrage Al Wahda, le 20 mars 1997 : *"Le monde connaîtra, le prochain siècle, une période difficile pour la vie de l'humanité, une période marquée par la rareté de l'eau"*.

Le Maroc, pays en voie de développement, est conscient des problèmes d'eau . Ceux-ci s'expriment en trois dimensions : celle de la sécheresse, celle de la croissance des besoins consécutive à l'augmentation de la population, et celle de la pollution.

Pour une meilleure planification régionale et locale, il est nécessaire d'avoir une meilleure connaissance des ressources en eaux (quantités et qualités variables dans l'espace et dans le temps) pour répondre aux divers besoins actuels (agriculture, industrie, consommation...) et pour satisfaire au mieux les besoins futurs. Mais on peut penser qu'au XXI^{ème} siècle, la contrainte des ressources en eaux sera encore plus déterminante dans le développement économique et social du Maroc. Dans cette perspective, l'étude du bassin versant de l'oued Grou est une contribution à cette meilleure connaissance des ressources en eaux.

Tout au long de cette étude hydro-climatologique, nous avons tenté de mettre en évidence les relations entre les paramètres du bassin versant et ceux du climat pour comprendre l'organisation des écoulements et déterminer aux mieux le bilan des ressources en eaux.

Le bassin versant de l'oued Grou correspond à la région de drainage dirigée vers l'oued Bou Regreg, sur la marge sud et sud-est du Plateau Central marocain . Le cours de l'oued est assez régulier malgré la traversée des régions accidentées. La rareté des assises perméables et la forte discontinuité spatiale du couvert végétal limitent les possibilités en eau souterraine et favorisent plutôt le ruissellement.

Les traitements statistiques des observations hydro-climatiques concernent la période d'étude 1972-73/1985-86, de 14 années. Si l'hétérogénéité de cette période, composée d'une séquence humide (1976-77/79-80) et d'une séquence sèche (1980-81/84-85), a pu être mise en évidence, il est cependant nécessaire de souligner sa relative brièveté. Aussi est-il probable que toutes les situations climatologiques et hydrologiques n'ont pas été analysées. Ceci impose de réduire quelque peu la portée des résultats obtenus, et que 14 années restent globalement insuffisantes pour une étude hydro-climatique exhaustive.

Nous avons pu malgré tout quantifier, au niveau des différents sous bassins, les termes du bilan hydrologique annuel moyen et appréhender les autres caractéristiques de l'écoulement : débits annuels, débits mensuels et régimes saisonniers, crues et étiages.

Au niveau de l'interprétation des données hydrologiques, nous avons chaque fois fait appel aux facteurs physiographiques et climatiques explicatifs des mécanismes de l'écoulement dans leur double variabilité spatiale et temporelle.

La quantification des variables hydrologiques a montré pour l'ensemble du bassin versant un débit annuel moyen de $5.20 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station aval de Ras el Fathia pour la période d'étude, soit $1,47 \text{ l/s/km}^2$ et 46.3 mm , avec cependant une variabilité considérable d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre. Les étiages sont mal soutenus (50 l/s), ce qui traduit l'influence faible des apports des réserves hydrologiques (bassin versant essentiellement imperméable) et l'effet important de l'évaporation (climat semi-aride). En étiage sévère, l'oued Grou est complètement à sec (144 jours en 1983 à Sidi Jabeur), tandis que le débit de pointe de crue peut dépasser $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1150 \text{ m}^3/\text{s}$ le 5/06/1986 à la station d'Ouljet Haboub).

Pour obtenir ces résultats, nous avons dû mettre en œuvre des méthodes adaptées aux caractéristiques de l'oued Grou, et qui tiennent compte du régime de type pluvio-évaporal méditerranéen semi-aride avec des contrastes hydro-climatiques importants. Parmi ces méthodes, l'étude de la sécheresse, la détermination des précipitations et des débits fréquents, l'analyse du bilan hydrologique contribuent à une meilleure connaissance du comportement hydrologique des cours d'eau qui drainent des régions semi-arides.

Les contrastes qui les caractérisent nécessairement, posent des problèmes d'aménagement importants, liés aux crues inondantes durant les années humides, à l'assèchement estival particulièrement durable en année sèche. Ceci pose un problème d'utilisation de l'eau associé à un bilan ressources-besoins souvent en déséquilibre inquiétant (sécheresse sévère de 1980-84).

Il n'existe pas de programme d'aménagement hydraulique bien défini pour le bassin versant. Les opérations d'utilisation des ressources en eaux au niveau local restent très limitées.

Excepté les trois lacs collinaires déjà construits (volume modeste) et le projet du barrage de Sidi Amar (Cf. annexes III-10 et III-11), quelques prélèvements directs d'eau sont effectués dans l'oued Grou pour les travaux publics (routes, ponts...), les usages domestiques (peu de sources) et l'irrigation des cultures maraîchères aux fonds des vallées assez larges. Les ressources en eaux souterraines directement disponibles se limitent à une série de petites sources, à faible débit, utilisées pour l'alimentation en eau potable et pour les troupeaux. Les cartes topographiques à l'échelle 1/100 000, bien qu'elles ne représentent pas l'ensemble des points d'eau, permettent de dénombrer une quarantaine de petites sources très dispersées. Elles n'ont qu'un débit de quelques litres par seconde. Donc la majorité des apports d'eau de l'oued Grou est destinée à l'alimentation en eau potable des villes côtières et à leurs industries, à partir de l'ouvrage de Sidi Mohammed Ben Abdalah situé sur l'oued Bou Regreg.

Pour une étude complète et une approche prospective du problème de l'utilisation de l'eau à l'échelle local du bassin versant, dans le cadre du développement régional, il est nécessaire d'améliorer le réseau de mesures hydro-climatologiques :

- les stations climatiques sont insuffisantes pour pouvoir apprécier les nuances régionales à l'intérieur du bassin versant. Des postes pluviométriques supplémentaires seraient utiles, notamment sur les hauts plateaux et sur les hautes plaines, pour mieux déterminer l'effet orographique qui est nécessaire à l'élaboration d'une cartographie des précipitations plus proche de la réalité. Il en est de même pour les températures : quelques postes supplémentaires, couplés aux postes pluviométriques, permettraient notamment d'améliorer l'étude des bilans, en particulier lors des périodes de sécheresse ;

- les stations hydrométriques sont également en faible densité et situées uniquement sur l'oued Grou. Une station supplémentaire, sur cet oued, serait nécessaire dans la partie amont du bassin (Dépression Orientale), mais l'implantation d'autres stations sur les principaux affluents contribuerait à la régionalisation des rendements hydrologiques et à l'élaboration d'un schéma des écoulements pour l'ensemble du réseau hydrographique.

Les données de ces stations permettraient ainsi d'approfondir l'étude hydro-climatologique par une analyse géographique plus proche des aménagements locaux. Elles pourraient également contribuer à d'autres préoccupations des aménageurs, comme par exemple, l'érosion des sols et les transports solides, ou l'implantation de nouveaux barrages collinaires.

L'amélioration du réseau de mesures hydro-climatologiques est ainsi une nécessité pour la mise en œuvre des aménagements locaux qui induisent une maîtrise et une gestion rigoureuses des ressources en eaux.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

<u>AVANT-PROPOS</u>	2
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	3
PREMIERE PARTIE : <u>LE CONTEXTE NATUREL</u>	7
<u>INTRODUCTION</u>	8
<u>I - LA GEOLOGIE DU BASSIN</u>	9
<u>A - L'EVOLUTION GEOLOGIQUE ET LES FORMATIONS</u>	9
2 - <u>L'évolution géologiques</u>	9
2 - <u>La localisation et la nature des formations géologiques</u>	11
<u>B - LES GRANDS ENSEMBLES MORPHOSTRUCTURAUX</u>	15
1 - <u>La Dépression Orientale</u>	15
2 - <u>Le Haut-Pays</u>	17
3 - <u>Le Palier Intermédiaire</u>	19
4 - <u>Le Palier Inférieur</u>	21
<u>C - LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES FORMATIONS</u>	
<u>GEOLOGIQUES</u>	22
1 - <u>La méthode utilisée</u>	22
2 - <u>L'application aux formations géologiques du bassin versant</u>	23
3 - <u>Les nappes souterraines</u>	26
4 - <u>Comparaison des bassins versants aux stations hydrométriques</u>	27

<u>II - LES PARAMETRES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN ET DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE</u>	30
<u>A - LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN</u>	30
1 - <u>La forme du bassin versant</u>	30
2 - <u>Le relief</u>	33
<u>B - LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE</u>	39
1 - <u>L'implantation du réseau hydrographique</u>	39
2 - <u>Les profils en long</u>	41
3 - <u>La hiérarchisation du réseau hydrographique</u>	46
<u>III - LES SOLS ET LA VEGETATION</u>	51
<u>A - LES SOLS</u>	51
1 - <u>Les sols peu ou non évolués</u>	52
2 - <u>Les sols évolués</u>	53
3 - <u>La répartition des sols</u>	53
<u>B - LE COUVERT VEGETAL</u>	56
1 - <u>La forêt</u>	57
2 - <u>Le matorral</u>	60
3 - <u>La steppe</u>	61
4 - <u>Les cultures et les pâturages</u>	62
<u>CONCLUSION</u>	64

DEUXIEME PARTIE : <u>LE CLIMAT</u>	66
<u>INTRODUCTION</u>	67
I - <u>L'APPROCHE DU CLIMAT REGIONAL</u>	67
A - <u>LES ASPECTS METEOROLOGIQUES</u>	68
1 - <u>La circulation des masses d'air</u>	68
2 - <u>Les différents types de temps</u>	69
B - <u>L'INVENTAIRE ET LA CRITIQUE DES DONNEES CLIMATIQUES</u>	70
1 - <u>Le choix des données</u>	70
2 - <u>La critiques des données</u>	74
3 - <u>La définition du climat de la région</u>	88
II - <u>LES PRECIPITATIONS :VARIABILITE ET REPARTITION</u>	98
A - <u>L'ANALYSE DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE</u>	98
1 - <u>Les précipitations annuelles</u>	98
2 - <u>Les précipitations saisonnières</u>	108
3 - <u>Les précipitations mensuelles</u>	112
B - <u>LA REPARTITION DU NOMBRE DE JOURS DE PRECIPITATIONS</u>	114
1 - <u>L'échelle annuelle</u>	114
2 - <u>L'échelle saisonnière</u>	114
3 - <u>L'échelle mensuelle</u>	117
C - <u>L'INTENSITE PLUVIOMETRIQUE</u>	117
1 - <u>L'échelle annuelle</u>	118

2 - <u>L'échelle saisonnière</u>	118
3 - <u>L'échelle moyenne mensuelle</u>	118
<u>D - L'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS MOYENNES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU</u>	119
1 - <u>La méthode de Thiessen</u>	119
2 - <u>La méthode des isohyètes</u>	122
3 - <u>Le modèle</u>	124
<u>III - LA TEMPERATURE ET L'EVAPOTRANSPIRATION</u>	130
<u>A - LA TEMPERATURE</u>	130
1 - <u>L'approche régionale des températures</u>	130
2 - <u>Le gradient thermique</u>	134
<u>B - L'EVAPOTRANSPIRATION</u>	137
1 - <u>L'application aux stations</u>	140
2 - <u>L'application aux bassins versants</u>	142
<u>CONCLUSION</u>	142
 <u>TROISIEME PARTIE : L'HYDROLOGIE</u>	144
<u>INTRODUCTION</u>	145
<u>I - LES DONNEES HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU</u>	145
<u>A - LA CRITIQUE DES DONNEES</u>	147
1- <u>La méthode des doubles cumuls</u>	147

2 - <u>La corrélation et le comblement des lacunes</u>	147
3 - <u>Les problèmes des données journalières</u>	149
II - <u>LE REGIME DE L'OUED GROU</u>	151
A - <u>LES HAUTES EAUX ET LES BASSES EAUX</u>	151
B - <u>L'ABONDANCE ET LE PROFIL HYDROLOGIQUE DE L'OUED GROU</u>	153
C - <u>L'IRREGULARITE DES DEBITS MOYENS ANNUELS</u>	156
1 - <u>La quantification statistique de l'irrégularité</u>	156
2 - <u>L'organisation chronologique de l'irrégularité</u>	157
D - <u>L'IRREGULARITE DES DEBITS MOYENS MENSUELS</u>	159
E - <u>L'ETUDE FREQUENTIELLE DES ECOULEMENTS</u>	161
1 - <u>Les débits fréquentiels caractéristiques annuels</u>	163
2 - <u>Les débits fréquentiels caractéristiques des hautes et basses eaux</u>	166
3 - <u>Les débits fréquentiels mensuels</u>	167
III - <u>LES DEBITS EXTRÊMES : LES CRUES</u>	171
A - <u>LES DEBITS MAXIMUMS ANNUELS</u>	171
1 - <u>Les caractéristiques générales du débit moyen mensuel maximal de l'année</u> <u>(Q mxa)</u>	171
2 - <u>Les débits instantanés maximums et les débits moyens journaliers maximums</u>	174
B - <u>LA PUISSANCE ET LA DUREE DE RECURRENCE DES MAXIMA INSTANTANES</u>	174
1 - <u>Le coefficient de puissance de crue H</u>	174

2 - <u>L'approche fréquentielle des crues annuelles</u>	177
<u>C - LES CARACTERES GENERAUX DE LA GENESE ET LA PROPAGATION DES CRUES</u>	179
<u>D - L'ANALYSE DE QUELQUES CRUES</u>	180
1 - <u>L'exemple de deux épisodes de crue de saison hivernale</u>	181
2 - <u>L'exemple de deux épisodes de crue de saison estivale</u>	186
<u>IV - LES DEBITS EXTRÊMES : LES ETIAGES</u>	192
<u>A - LA SEVERITE ET LA DUREE DE RECURRENCE DES ETIAGES</u>	193
1- <u>L'indice de sévérité</u>	193
2 - <u>La durée des débits nuls</u>	195
3 - <u>Les débits d'étiages mensuels fréquents</u>	195
<u>B - L'ECOULEMENT DE BASE</u>	197
1- <u>La méthode de l'indice d'écoulement de base (IEB)</u>	199
2 - <u>La méthode statistique</u>	202
3 - <u>Les tarissements</u>	207
4 - <u>La comparaison des résultats des méthodes</u>	210
<u>V - LE BILAN HYDROLOGIQUE</u>	212
<u>A - LA METHODE UTILISEE</u>	212
<u>B - LE BILAN HYDROLOGIQUE EN ANNEE MOYENNE</u>	215
<u>C - L'ETUDE DES DONNEES MENSUELLES DU BILAN</u>	219
<u>CONCLUSION</u>	223

<u>CONCLUSION GENERALE</u>	224
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	224
<u>ANNEXES</u>	224
<u>FIGURES</u>	224
<u>TABLEAUX</u>	224

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

ANDRE A. 1975,

Le littoral atlantique marocain étude de géographie physique. Trav. Com. Géogr. étude Rech. Rurales n° 6, Poitiers.

ANDRE A., BEAUDET G. 1967,

Observations nouvelles sur les dépôts Quaternaires des environs de Rabat. Revu. Géogr. Maroc n° 11 Rabat.

BEAUDET G. 1969,

Le Plateau central marocain et ses bordures : étude géomorphologique Rabat. inframar.

BENISTY 1970,

Construction du barrage du Grou sur les terrasses fluviales quaternaires et des alluvions récentes.

BEN KADI M. 1976,

L'évolution de l'exploitation des ressources hydrauliques au Maroc. Mémoire de 3ème cycle, (I. A. V. Hassan II), Rabat.

BENZECRI F. et J.P 1988,

Pratique de l'Analyse des Données, Analyse des correspondances, Paris

BERNARD A. 1921,

Les régimes des pluies au Maroc, Mémoires de la Société des Sciences du Maroc, tome 1, n° 1, Paris.

BETHEMONT J. 1977,

De l'eau et des hommes. Essai géographique sur l'utilisation des eaux continentales, Bordas, Paris

BOUCHAARA A. 1984

Politique des barrages et développement agricole au Maroc. (thèse de 3ème cycle) Université de J. Moulin

BRUNET-MORET Y. 1971,

Etude de l'homogénéité des séries chronologiques des précipitations annuelles par la méthode des doubles masses, cahiers de l'O.R.S.T.O.M Paris série hydrologique Vol VIII, n° 4.

CARREGA P. 1988,

L'évapotranspiration potentielle et réelle dans le Midi méditerranéen. Son originalité par rapport au reste de la France. Méditerranée Tome 66

CASTANY G. 1982,

Principes et méthodes de l'hydrologie Paris. Ed Dupont.

CALVET C. 1966,

Les étages bioclimatiques de L. Emberger et l'évaporation. Bull. De la Soc. Des Sc. Natu. Et Phys. Du Maroc.

CALVET C. 1976,

Rayonnement global et durée de l'insolation au Maroc. La Météorologie Vie série, n° 5.

C.E.H. 1940,

Etude géologique du second emplacement du barrage sur l'oued Grou.

CELERIER J. 1941,

Les problèmes de l'eau au Maroc (Introduction), R. G. M. n° 1 et n° 2.

CEMARA 1986,

Statistique appliquée à l'exploitation des mesures
Paris, Masson.

CHAMPOUX A. et TOUTAN C. 1988,

Eléments d'hydrologie : Le griffon d'argile.

CHAOUI A., TONNON J.N. 1968,

Barrage provisoire du Grou : Influence des études géologiques et géotechniques sur la conception et la réalisation du barrage. Ser. Géologique, Rabat.

CHAUMONT M. 1968,

Les influences des régimes climatiques en France, en Espagne et en Afrique du nord-ouest et leurs conséquences hydrologiques Blida

CHERRAD B. 1990,

Etude hydrologique du bassin versant de l'Orne (Lorraine) DEA Université de Metz.

CHOUBERT G. 1952,

Géologie du Maroc. Aperçu structurale. Notes et Mém. Sér. Géol. Maroc, n° 100.

CHOUBERT G., ARMBOURG 1965,

Quaternaire, Maroc occidental. Ser. Géologique, Rabat.

COGNEY G. 1957,

Recherches géologiques au confluent des oueds Bou-Regreg, Grou et Akrach Maroc occidental. Ser. Géologique, Rabat.

COMBE M. 1967,

Etude d'un projet de barrage sur l'oued Grou Rabat.

COMBE M., FERRE M., THAUVIN J. 1975,

Ressources en eau du Maroc, plaines et bassin du Maroc Atlantique Ser. Géologique, Rabat.

COMETEC 1968 à 1970,

Approvisionnement en eau potable de la zone côtière entre Kenitra et Casablanca. Etude de Potabilité. Rabat.

CORBONNOIS J. SARY M. 1991,

Transfert des masses d'eau en étiage. Comparaison de deux technique de mesure (Mortagne, Lorraine). Rev. Mosella Université de Metz, tome XVIII, 1991

DAGET Ph. 1977,

Le bioclimat méditerranéen : analyse des formes climatiques par le système d'Emberger, Végétation, 34 (2).

DELANNOY H. 1982,

Introduction à l'étude des relations entre les températures des eaux océaniques et les précipitations côtières marocaines, Norois, n° 116.

DELANNOY H. 1988,

Précipitations saisonnières du Maroc cisatlantique et téléconnexions dans la circulation atmosphérique, Bull. Assoc. Géog.

DELIBRIAS G., WEISROCK A., ROGNON P., COUDE GAUSSEN G. 1985,

Variations climatiques et morphogénèses au Maroc atlantique (30°-33° N) à la limite Pléistocène-Holocène. Bull. Soc. Géol. Fr. tome 1, n°4

DERRUAU . M 1988,

Précis de géomorphologie Paris, Masson 3^{ème} édition.

DESPOIS J. 1964,

L'Afrique du nord Tome I Presse Universitaire Paris.

DESPOIS J. et RAYNAL R. 1967,

Géographie de l'Afrique du nord-ouest Paris.

DEZERT B. et FRECAUT R. 1978,

L'économie des eaux continentales, aménagement et environnement Paris C.U.D-S.E.D.E.S.

Direction de la Météorologie Nationale 1988,

Variabilité interannuelle des précipitations au Maroc (1913 - 1985), Actes de la Conférence d'Agadir, 21 - 24 Novembre 1985, Rabat.

Direction de la Statistique,

- *Annuaire statistique du Maroc, 1988.*

- *Le Maroc en chiffres, 1988.*

- *Recensements de 1960, 1971, 1982, 1994.*

D.R.R.P 1989,

Etude du plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins : Sebou, Bou-Regreg, Oum er Rabia et Tensift. Direction de l'Hydraulique Rabat.

D.R.R.P 1992,

Les barrages du royaume. Direction de l'Hydraulique Rabat.

DUBREUL P. 1974,

Initiation à l'analyse hydrologique Paris, Masson.

DUBANT C. 1885,

Les crues d'avril et de mai 1883 sur les principaux cours d'eau d'Alsace. Rev. Mosella, tome XV. Université de Metz.

- DUCHAUFOR PH. 1982,
Pédologie : sol, végétation et environnement 3^{ème} édition Paris, Masson.
- DUGUE. 1958,
Traité de statistique théorique et appliquée. Masson et Cie Paris.
- DUMAS de RAULY. 1966,
L'estimations statistiques. Gautier- Villars Paris.
- DURAND-DASTES F. 1977,
Systèmes d'utilisations de l'eau dans le monde.
- EMBERGER L. 1955,
Une classification géobotanique des climats - Rec. Trav. Lab. Géol. Zool. Fac. Sc. Montpellier série bot. 7.
- EMSALEM R. 1972,
Nature et principaux facteurs de l'évapotranspiration, La Météorologie.
- ESCOURROL P. 1981
Climat et environnement Masson Paris.
- ESTIENNE P., GODARD A. 1970,
Climatologie. Edition Armand Colin, Paris.
- FOUCAULT A. RAOULT. J-F 1975,
Coupes et cartes géologiques. Edition Doin, Paris.
- FRANCOIS D. 1991,
Etude statistique des pluies et des débits annuels. Application à la loi de Gauss à quelques stations du bassin de la Moselle Rev. Mosella Université de Metz .

FRECAUT R. 1975,

*Contribution à l'étude statistique des étiages :
Application au domaine tempéré océanique Nancy Rev.Géog. Est n° 1 et 2.*

FRECAUT R. 1975,

*Hydrologie et dynamique fluviales des régions
tempérées et froides. Cours C.N.T.E.*

FRECAUT R. 1964,

Eléments de l'hydrologie continentale Paris, C.U.D.

FRECAUT R. 1979,

*Etiages : Application à l'Afrique occidentale et centrale
du Nord-Ouest Colloque d'hydrologie sur la prévision des débits Paris Bull
Asso. Géo Français.*

GAMEZ P. ZUMSTEIN J.F 1993,

*Méthode de détermination des débits de base et
ruissellement d'un cours d'eau. Au Fil de l'Eau (Hommage à R. FRECAUT).PUN*

GILLE E. 1985,

*Etude hydrologique des crues de la Moselle et de la
Sarre (1970-83) thèse 3^{ème} cycle Ecole des mines Paris.*

Groupe Chadule, 1974 et 198

Initiation aux méthodes statistiques en géographie.

GUILCHER A. JOLY F. 1954,

*Recherche sur la morphologie de la côte atlantique du
Maroc. Travaux de l'Institut chérifien. Série géologie et géographie physique n°2
Rabat.*

HAMEL 1968,

*Etude géologique des sites de barrage des Oueds Grou
et Bou Regreg.*

HAZAN R. 1959,

Contamination par les eaux de mer des nappes côtières du Maroc. Etude préliminaire. Centre des études hydrogéologiques, Rabat.

HAZAN R. 1964,

Contribution à l'étude de l'invasion de nappe par les eaux marines, In les Hommes, La Terre et l'Eau. Bull. de liaison et d'inf. De l'O. N. U. n° 8.

HENIA L. 1988,

Contribution à l'étude de la variation spatiale et interannuelle de la température en Tunisie. Méditerranée Tome 66.

HIRSCH F. 1963,

Estimation des débits des cours d'eau. Bulletins A.S.H.

HUFTY A. 1988,

Bilan hydrologique du bassin du Loukkos (Maroc atlantique) Méditerranée Tome 66.

ISNARD H. 1978,

Le Maghreb Paris, P U P 3^{ème} édition.

HUMBERT J. KADEN U. 1994,

Déterminations des modifications de l'écoulement fluvial en moyen de l'Indice d'Écoulement de Base Rev. de Géog. Alpine.

JARRARD P. 1996,

Initiation aux méthode de la statistique et du calcul des probabilités. Masson 3^{ème} édition Paris.

KERBOUT M. 1985,

La politique des grands aménagements hydro-agricoles au Maroc, réalisations et limites, R.G.M., n°9.

KIM S. Ch. 1991,

*Etude hydrologique de la Mortagne (Lorraine) thèse
3^{ème} cycle Université de Metz*

LAGARDE 1983

Initiation à l'Analyse des données, Paris.

LAHLOU A. 1994,

*Envasement des barrages au Maroc. Edition Wallada,
Casablanca.*

LAZICIC 1968,

Etude hydrologique de l'oued Grou Tome I.

LEUBAUT S. 1995,

*Aquifères des grès d'Ardenne-Luxembourg. Présentation
et aspects du fonctionnement de la nappe DEA Université de Metz.*

LECÂRPENTIER C. 1975,

*L'évapotranspiration potentielle et ses implications
géographiques. An de Géog., n°463, n°464.*

LOUP J. 1960,

*L'Oum er Rabia, contribution à l'étude hydrologique
d'un fleuve marocain Rabat Inst. Scien. Géogra. Phys. n°: 9.*

LOUP J. 1974,

Les eaux terrestres Paris, Masson.

MALINVAUD E. 1964,

Méthodes statistiques de l'économétrie, Paris.

MARGAT J. 1988,

*Les ressources en eau dans les pays du Maghreb,
B.R.G.M.*

MARION (non daté)

*Notes relatives aux crues exceptionnelles des oueds
Grou et Bou Regreg.*

MASIERI 1988,

Statistique et calcul des probabilités. 6^{ème} édition Sire

MASSON J.F. 1983,

*La loi de Gumbel (Laboratoire d'hydrologie
mathématique) Montpellier*

MEBARKI A. 1982,

Le bassin du Kébir-Rhmel (thèse 3^{ème} cycle) Nancy II.

Ministère de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire 1984,

Atlas des ressources naturelles Rabat.

Ministère de l'intérieur, 1989

*Les barrages collinaires, réalisations 1984-1987,
publication de la Direction de l'Hydraulique, Rabat.*

OULKADI A. 1989,

*Espace hydraulique et développement au Maroc, thèse
de 3^{ème} cycle, Université Paul-Valéry, Montpellier.*

PAGNEY P. 1976,

Les climats de la terre. Paris Masson

PEGUY CH.P. 1970,

Précis de climatologie. Editions Masson et Cie, Paris.

PENMAN H.L. 1970,

The Water cycle Science du climat U.S.A

POMERL C., RENARD M 1989,

Eléments de géologie. Armand Colin Paris.

POPP H. 1984,

Effets socio-géographiques de la politique des barrages au Maroc, tome 2 Rabat.

REMENIERAS G. 1960,

L'Hydrologie de l'ingénieur Paris, Eyrolles.

ROCHE E. 1967,

Hydrologie de surface Paris, Gauthier-Villars.

ROCHE E. 1968,

Examen critique des études hydrologiques des oueds Grou et Bou Regreg.

ROCHE E. 1950,

Histoire stratigraphique du Maroc. Service Géologique du Maroc, Rabat.

ROUX G. 1947,

La variation annuelle des précipitations au Maroc, Bull. Soc. Sci. Nat. Maroc, tome XXV-XXVII.

SARY M. FRANCOIS D. AUER J.C., ZUMSTEIEN J.F. 1991,

Etude méthodologique des basses eaux. CEGUM et Agence de l'eaux Rhin Meuse.

SARY M. CORBONNOIS J. 1986,

Etude hydrologique du bassin de Brénon Université de Metz.

SCHERER J.C. 1977,

Une méthode d'extrapolation dans l'espace des données pluviométriques moyenne. Application à une partie des Vosges et leur bordure, Rech. Géog. Strasbourg.

SCHNEEBLI G. 1978,

Hydraulique souterraine. Eyrolles Paris.

SCHOELLER H. 1962

Les eaux souterraines Paris, Masson.

SEGUN B. 1975,

Etude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France (région d'Avignon). Ann. Agron.

Service Géologique du Maroc 1977,

Les ressources en eau du Maroc Rabat tome II.

SOCMAROC 1967,

Sondages de reconnaissance de l'oued Grou.

SOCMAROC 1968,

Travaux de reconnaissance de l'oued Grou.

TARDY Y. 1986,

Le cycle de l'eau Paris, Masson.

TASSI Ph. 1989,

Méthodes statistiques. Economica 2^{ème} édition Paris.

TOMASSON R., AUDRAIN S., MILLIER C. 1992,

La régression, nouveaux regards sur une ancienne méthode de statistique. Masson 2^{ème} édition, Paris.

TRICART J. 1968,

*Précis de géomorphologie Société d'édition
d'enseignement supérieure Tome I.*

TRICART J. 1977,

*Précis de géomorphologie Société d'édition
d'enseignement supérieure Tome II.*

TRICART J. et HIRSCH F. 1960,

*Relation entre le débit et la superficie des bassins
fluviaux Paris.*

Turc L. 1951,

*Nouvelle formule pour le calcul du bilan de l'eau en
fonction des valeurs moyennes annuelles des précipitations et de la température -
C. R. AC. Des Sc.*

Turc L. 1961,

*Evaluation des besoins en eau d'irrigation,
évapotranspiration potentielle - Ann. Agro. 12.*

VULQUIN A. 1988,

*Étés secs, étés pluvieux, facettes et façades de la zone
subtropicale, Méditerranée.*

ZUMSTEIN J. F., GILLE E., ABBELLE J., ANGAUD M., MARTIN C. 1985,

*Analyse critique des longues séries des hauteurs de crue
aux échelle d'Epinal, Toul et Metz sur la Moselle et Malzéville sur la Meurthe.
Validation des séries brutes, établissement des séries homogène et reconstitution
des séries des débits. Rev. Mosella Université de Metz.*

ZUMSTEIN J. F., GILLE E., ABBELLE J., ANGAUD M., MARTIN C. 1985,

Analyse fréquentielle des crues à Epinal, Toul et Hauconcourt sur la Moselle et à Malzéville sur la Meurthe. Estimation des durées de récurrence des principales crues observées de 1919 à 1984. Rev. Mosella Université de Metz.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

PREMIERE PARTIE

ANNEXE I-1 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Carte litho-
stratigraphique

ANNEXE I-2 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Croquis géomorphologique

ANNEXE I-3 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Carte de
perméabilité

ANNEXE I-4 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Indices de forme

ANNEXE I-5 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Carte
hypsométrique

ANNEXE I-6 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Courbes
hypsométriques et hystogrammes des fréquences

ANNEXE I-7 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Réseau
hydrographique : niveau quaternaires, largeur des vallées et profils en long

ANNEXE I-8 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Réseau
hydrographique simplifié

ANNEXE I-9 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Réseau
hydrographique globale (Perenne et intermétant), détermination des nombres et
des longueurs moyennes des rivières par ordre (loi d'Horton)

ANNEXE I-10 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Répartition des
sols

ANNEXE I-11 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Couvert végétal

DEUXIEME PARTIE

ANNEXE II-1 Double cumul des stations pluviométriques

ANNEXE II-2 Double cumul des stations de mesure thermique

ANNEXE II-3 Les régimes pluviométriques

ANNEXE II-4 Courbes ombrothermiques des stations

ANNEXE II-5 Climogrammes des stations

ANNEXE II-6 Ajustements des précipitations annuelles

ANNEXE III-9 Bilan hydrologique des deux séquences, humide et sèche

ANNEXE III-10 Situation des barrages collinaires existants dans le bassin

ANNEXE III-11 Données des barrages collinaires existants dans le bassin

ANNEXE II-7 Simple cumul aux stations pluviométriques

ANNEXE II-8 CUSUM et Cjx aux stations étudiées

ANNEXE II-9 Précipitations moyennes du bassin (Thiessen)

ANNEXE II-10 Précipitations moyennes du bassin (Modèle)

ANNEXE II-11 Gradient thermique annuel selon l'altitude

ANNEXE II-12 Gradient thermique annuel selon la distance à la mer

ANNEXE II-13 Températures moyennes aux sous bassins de l'oued Grou

ANNEXE II-14 Evapotranspiration aux stations (Thornthwaite)

ANNEXE II-15 Insolation, humidité relative et évapotranspiration aux stations

ANNEXE II-16 Evapotranspiration Turc aux bassins versants (référence végétations méditerranées)

ANNEXE II-17 Insolation, humidité relative et évapotranspiration aux sous-bassins

TROISIEME PARTIE

ANNEXE III-1 Débits moyens mensuels de l'oued Grou (m^3) aux stations hydrométriques

ANNEXE III-2 Lamme d'eau écoulee de l'oued Grou (mm) aux stations hydrométriques

ANNEXE III-3 Hydraulicité, Simple cumul et CUSUM des débits

ANNEXE III-4 Ajustements des précipitations et des débits moyens annuels des bassins

ANNEXE III-5 Exemple d'éliments de calcul de séparation des débits (méthodes statistiques)

ANNEXE III-6 Courbes des débits classés et des débits de tarissement (méthodes statistiques)

ANNEXE III-7 Détermination de α et de tarissement journalier (loi de maillet)

ANNEXE III-8 Loi de tarissement mensuel des débits de nappes (méthodes statistiques)

FIGURES

LISTE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE

<u>Fig. I-1 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Situation dans le Plateau Central marcaïn</u>	<u>4</u>
---	----------

<u>Fig. I-2 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Coupes géologiques</u>	<u>16</u>
--	-----------

DEUSIEME PARTIE

<u>Fig. II-1 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Situation des stations météorologiques</u>	<u>72</u>
---	-----------

<u>Fig. II-2 à II-4 Double cumul des stations pluviométriques</u>	<u>75</u>
---	-----------

<u>Fig. II-5 Les séries d'observations pluviométriques aux stations</u>	<u>79</u>
---	-----------

<u>Fig. II-6 à II-8 Précipitations moyennes mensuelle (1972-73/1974-75)</u>	<u>81</u>
---	-----------

<u>Fig. II-9 à II-11 Les régimes pluviométriques</u>	<u>82</u>
--	-----------

<u>Fig. II-12 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Les régimes pluviométriques.</u>	<u>84</u>
--	-----------

<u>Fig. II-13 BASSIN VERSANT DE L'OUED GROU : Les régimes thermiques</u>	<u>84</u>
--	-----------

<u>Fig. II-14 à II-16 Courbes ombrothermiques des stations</u>	<u>86</u>
--	-----------

<u>Fig. II-17 à II-19 Climogrammes des stations.</u>	<u>90</u>
--	-----------

<u>Fig. II-20 Climagrammes pluviothermique du coefficient d'Emberger</u>	<u>95</u>
--	-----------

<u>Fig. II-21 Limites climatiques (Emberger et Gaussen)</u>	<u>97</u>
---	-----------

<u>Fig. II-22 à II-24 Ajustements des précipitations annuelles (stations Ain Aouda)</u>	<u>101</u>
---	------------

<u>Fig. II-25 à II-27 Simple cumul aux stations pluviométriques</u>	<u>105</u>
---	------------

<u>Fig. II-28 à II-30 CUSUM et Cjx aux stations étudiées</u>	<u>106</u>
--	------------

<u>Fig. II-31 Estimation des précipitations moyennes du bassin (Thiessen)</u>	<u>120</u>
---	------------

Fig. II-32	Estimation des précipitations moyennes du bassin (Isoyètes)	123
Fig. II-33	Carroyage du bassin selon les coordonnées Lambert	125
Fig. II-34	Estimation des précipitations moyennes du bassin (Modèle)	128
Fig. II-35	Gradient thermique annuel selon l'altitude	136
Fig. II-36	Gradient thermique annuel selon la distance à la mer	136
Fig. II-37	Régime thermique	138

TROISIEME PARTIE

Fig. III-1	Réseau hydrométrique	146
Fig. III-2 à III-4	Double cumul aux stations hydrométriques	148
Fig. III-5	Précipitations moyennes mensuelle des sous-bassins	152
Fig. III-6	Régime hydrométrique de l'oued Grou	152
Fig. III-7	Coefficient mensuel des débits de l'oued Grou	152
Fig. III-8	Profil hydrologique de l'oued Grou aux stations	157
Fig. III-9	Irégularité interannuelle des débits de l'oued Grou aux stations	158
Fig. III-10 à III-12	Hydraulicité, Simple cumul et CUSUM des débits station de Ras el Fathia	160
Fig. III-13 à III-15	Débits moyens des années extrêmes	162
Fig. III-16 et III-17	Ajustements des précipitations et des débits moyens annuels station de Ras el Fathia	164
Fig. III-18 à III-20	Débits moyens mensuels fréquentiels	169
Fig. III-21 à III-23	Précipitations et débits de crue (février 1978)	183
Fig. III-24 à III-26	Précipitations et débits de crue (février 1979)	185
Fig. III-27 à III-29	Précipitations et débits de crue (septembre 1979)	188
Fig. III-30 à III-32	Précipitations et débits de crue (juin 1986)	191

<u>Fig. III-33 et III-34 Ajustements des débits d'étiage</u>	<u>198</u>
<u>Fig. III-35 à III-37 Courbes des débits classés et des débits de tarissement (méthodes statistiques)</u>	<u>203</u>
<u>Fig. III-38 à III-40 Débits moyens et à pleine charge de nappes (méthodes statistiques)</u>	<u>206</u>
<u>Fig. III-41 Algorithme (bilan hydrologique)</u>	<u>213</u>
<u>Fig. III-42 à III-44 Bilan hydrologique moyens mensuels, année moyenne</u>	<u>221</u>

TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

PREMIERE PARTIE

<u>Tableau I-1</u>	<u>Classification des perméabilités</u>	<u>24</u>
<u>Tableau I-2</u>	<u>Répartition des roches du substratum, en fonction de leur perméabilité, dans les bassins versants aux stations hydrométriques</u>	<u>28</u>
<u>Tableau I-3</u>	<u>Indices de formes des bassins versants</u>	<u>32</u>
<u>Tableau I-4</u>	<u>Indices relatifs au relief des bassins versants</u>	<u>37</u>
<u>Tableau I-5</u>	<u>Pentes et sinuosité de l'oued Grou</u>	<u>43</u>
<u>Tableau I-6</u>	<u>Réseau hydrographique global (pérenne et intermittent), nombre, longueur et fréquences des rivières par ordre</u>	<u>47</u>
<u>Tableau I-7</u>	<u>Densité de drainage et coefficient de torrentialité par bassin</u>	<u>50</u>
<u>Tableau I-8</u>	<u>Répartition des sols</u>	<u>54</u>
<u>Tableau I-9</u>	<u>Répartition des sols par bassin</u>	<u>56</u>
<u>Tableau I-10</u>	<u>Répartition du couvert végétal par bassin versant</u>	<u>58</u>
<u>Tableau I-11</u>	<u>Couvert végétal selon l'intensité du ruissellement, par bassin</u>	<u>63</u>
<u>Tableau I-12</u>	<u>Principaux facteurs de l'écoulement des eaux de surface par bassin</u>	<u>65</u>

DEUSIEME PARTIE

<u>Tableau II-1</u>	<u>Seuil inférieur de signification du coefficient de corrélation (r) d'après les tables de Fisher et de Bravais-Pearson</u>	<u>76</u>
<u>Tableau II-2</u>	<u>Matrice de corrélation entre les stations pluviométriques</u>	<u>77</u>
<u>Tableau II-3</u>	<u>Matrice de corrélation entre les stations de mesure thermiques</u>	<u>77</u>

<u>Tableau II-4</u>	<u>Températures moyennes mensuelles et les amplitudes thermiques moyennes annuelles aux stations</u>	<u>87</u>
<u>Tableau II-5</u>	<u>Indices climatiques</u>	<u>91</u>
<u>Tableau II-6</u>	<u>Limites des espèces végétales existant dans le bassin de l'oued Grou</u>	<u>96</u>
<u>Tableau II-7</u>	<u>Précipitations moyennes annuelles aux stations étudiées</u>	<u>99</u>
<u>Tableau II-8</u>	<u>Précipitations annuelles caractéristiques (loi Log. normale)</u>	<u>103</u>
<u>Tableau II-9</u>	<u>Valeurs de la variable centrée réduite de Gauss</u>	<u>102</u>
<u>Tableau II-10</u>	<u>Précipitations moyennes saisonnières</u>	<u>108</u>
<u>Tableau II-11</u>	<u>Précipitations saisonnières caractéristiques (loi Log. normale), Saison humide</u>	<u>111</u>
<u>Tableau II-12</u>	<u>Précipitations saisonnières caractéristiques (loi Log. normale), Saison sèche</u>	<u>111</u>
<u>Tableau II-13</u>	<u>Précipitations, nombre de jours de pluies et intensité pluviométriques année et saisons humide et sèche</u>	<u>115</u>
<u>Tableau II-14</u>	<u>Précipitations moyennes mensuelles et annuelles aux stations</u>	<u>116</u>
<u>Tableau II-15</u>	<u>Nombre de jours de précipitations mensuelles et annuelles aux stations</u>	<u>116</u>
<u>Tableau II-16</u>	<u>Intensité pluviométrique moyenne mensuelles et annuelles aux stations</u>	<u>116</u>
<u>Tableau II-17</u>	<u>Précipitations moyennes annuelles des bassins aux trois stations hydrométriques (Thiessen)</u>	<u>121</u>
<u>Tableau II-18</u>	<u>Précipitations moyennes mensuelles des bassins aux trois stations hydrométriques (Thiessen)</u>	<u>121</u>
<u>Tableau II-19</u>	<u>Précipitations moyennes annuelles des sous bassins de l'oued Grou (modèle)</u>	<u>127</u>

<u>Tableau II-20</u>	<u>Précipitations moyennes mensuelles des sous bassins de l'oued Grou (modèle)</u>	<u>127</u>
<u>Tableau II-21</u>	<u>Précipitations moyennes annuelles du bassin versant de l'oued Grou, selon les trois méthodes</u>	<u>129</u>
<u>Tableau II-22</u>	<u>Températures moyennes interannuelles aux stations</u>	<u>131</u>
<u>Tableau II-23</u>	<u>Températures moyennes mensuelles et annuelles aux stations</u>	<u>133</u>
<u>Tableau II-24</u>	<u>Gradient thermique mensuel</u>	<u>135</u>
<u>Tableau II-25</u>	<u>Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle aux stations</u>	<u>141</u>
<u>Tableau II-26</u>	<u>Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle aux bassins</u>	

DEUSIEME PARTIE

<u>Tableau III-1</u>	<u>Coefficients de corrélation (r) entre les stations hydrométriques</u>	<u>149</u>
<u>Tableau III-2</u>	<u>Valeurs douteuses des débits de l'oued Grou (octobre 1985)</u>	<u>150</u>
<u>Tableau III-3</u>	<u>Modules moyens annuels de l'oued Grou aux stations</u>	<u>154</u>
<u>Tableau III-4</u>	<u>Débits moyens annuels des années extrêmes</u>	<u>157</u>
<u>Tableau III-5</u>	<u>Ajustements des précipitations annuelles (loi normale)</u>	<u>165</u>
<u>Tableau III-6</u>	<u>Ajustements des lames d'eau annuelles écoulées (loi Log.-normale)</u>	<u>165</u>
<u>Tableau III-7</u>	<u>Ajustements des débits annuels (loi Log.-normale)</u>	<u>165</u>
<u>Tableau III-8</u>	<u>Ajustements des lames d'eau saisonnières écoulées, saison hivernale (loi Log.-normale)</u>	<u>165</u>
<u>Tableau III-9</u>	<u>Ajustements des lames d'eau saisonnières écoulées, saison estivale (loi Log.-normale)</u>	<u>165</u>

<u>Tableau III-10 Ecoulements et précipitations moyens mensuels fréquents</u> <u>aux bassins versants</u>	170
<u>Tableau III-11 Débits moyens mensuels maximums (Q max) de l'oued Grou</u>	172
<u>Tableau III-12 Débits moyens mensuels maximums fréquents</u> <u>(loi Log.-normal)</u>	173
<u>Tableau III-13 à III-15 Débits instantanés et journaliers maximums</u>	175
<u>Tableau III-16 Débits journaliers moyens maximums fréquents</u> <u>(loi Log.-normal)</u>	177
<u>Tableau III-17 Débits instantanés maximums fréquents (loi Log.-normal)</u>	178
<u>Tableau III-18 Débits spécifiques instantanés maximums fréquents</u> <u>(loi Log.-normal)</u>	178
<u>Tableau III-19 Précipitations, les lames et les coefficient d'écoulement de</u> <u>crue (février 1978)</u>	182
<u>Tableau III-20 Précipitations, les lames et les coefficient d'écoulement de</u> <u>crue (février 1979)</u>	184
<u>Tableau III-21 Précipitations, les lames et les coefficient d'écoulement de</u> <u>crue (septembre 1979)</u>	187
<u>Tableau III-22 Précipitations, les lames et les coefficient d'écoulement de</u> <u>crue (juin 1986)</u>	189
<u>Tableau III-23 Indice de sévérité d'étiage moyens mensuels de l'oued Grou</u>	194
<u>Tableau III-24 Durée d'étiage sévère de de l'oued Grou</u>	196
<u>Tableau III-25 Débits d'étiage fréquents</u>	197
<u>Tableau III-26 Indice d'écoulement de base de l'oued Grou période</u>	200
<u>Tableau III-27 à III-29 Indice d'écoulement de base de l'oued Grou années</u> <u>particulières</u>	201
<u>Tableau III-30 à III-32 Mode de tarissement (Log. Gumbel et méthode</u> <u>statistique)</u>	204

<u>Tableau III-33 à III-35 Valeurs de & journalier</u>	<u>209</u>
<u>Tableau III-36 Valeurs & moyen journalier et mensuels</u>	<u>209</u>
<u>Tableau III-37 Synthèse des résultats obtenus par les méthodes de l'IEB et de statistiques</u>	<u>211</u>
<u>Tableau III-38 Bilan hydrologique annuel, année moyenne</u>	<u>216</u>
<u>Tableau III-39 Bilan hydrologique annuel, séquence humide et séquence sèche</u>	<u>216</u>
<u>Tableau III-40 à III-42 Bilan hydrologique moyens mensuels, année moyenne</u>	<u>220</u>

CARTES

LISTE DES CARTES

CARTES TOPOGRAPHIQUES

Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire

**Direction de la Division Foncière des Travaux Topographiques
Rabat.**

, Feuille à 1/100 000 :

- Aguelmous**
- Al Qbab**
- Afourar**
- Beni Mellal**
- Casablanca**
- El Gara**
- Ezzhiliga**
- Kehf Ennsour**
- Khemisset**
- Khenifra**
- Meknès**
- Mohammadia**
- Oued Zem**
- Oulmès, Moulay bou Azza**
- Rabat - Salé**
- Zawyat Ech Chikh.**

Ministère des Travaux Publics et des transports

Institut Géographique Nationale Paris VII

Feuille à 1/500 000 :

- Rabat

CARTES GEOLOGIQUES

Ministère d'Energie et des mines

Direction de la Géologie Rabat

Feuille à 1/500 000 :

- Carte structurale du Maroc

- Feuille de Rabat

Feuille à 1/50 000

- Feuille de Rommani

- Carte géotechnique de Rabat

Ministère de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire

Division de l'Environnement Rabat

- Atlas des Ressources Naturelles :

- Relief et Structure planche n° 2 et 3

- Précipitations planche n° 4

- Insolation planche n° 5 et 6

- Températures extrêmes planche n° 7

- Etages Bioclimatiques planche n° 9

- Ressources en eaux planche n° 12

- Vocation des sols planche n° 14

- Occupation des sols planche n° 15

- Dégradation des milieux naturels et Pollution planche n° 28

CARTE GEOMORPHOLOGIQUE

G. BEAUDET Carte géomorphologique du Plateau Central

CARTE GENERALE

Maurice LOMBARD : Laboratoire de Cartographie des Ecoles des Hautes
Etudes Paris

Le Bois dans la Méditerranée musulmane VII et XI siècle

Résumé

L'objectif de cette étude hydro-climatologique est de définir les caractéristiques générales des écoulements de l'oued Grou dans le cadre d'une connaissance des ressources en eau, dans une région marquée par les conséquences de sécheresses sévères.

L'oued Grou, affluent de l'oued bou Regreg, est caractéristique de la bordure sud et sud-est du Plateau Central marocain. Son cours est assez régulier bien qu'il traverse des régions accidentées à substratum imperméable, caractérisées par une forte discontinuité spatiale du couvert végétal.

Le climat est de type méditerranéen semi-aride. Les caractères essentiels sont d'une part, une variabilité liée à une grande irrégularité annuelle et à l'existence de séquences d'années sèches et humides et, d'autre part, un fort contraste saisonnier (alternance d'une saison humide et clémente et d'une saison sèche et chaude).

Le régime hydrologique obéit à la répartition des précipitations avec deux saisons bien distinctes, de courtes hautes eaux et une longue période de basses eaux.

L'étude spatio-temporelle des débits moyens mensuels permet, en termes de fréquence, de faire apparaître le rôle prédominant du climat et de la lithologie sur l'écoulement. Ce rôle est confirmé par l'étude statistique des débits extrêmes (crues et étiages).

La synthèse de la connaissance de l'écoulement est réalisée au niveau des bassins contrôlés par des stations hydrométriques dans des bilans hydrologiques. Ces bilans s'appuient sur des modèles de quantification spatiale des pluies, des températures et sur la détermination des caractéristiques de l'écoulement par des méthodes d'analyse des phases hydrologiques.

Toutes ces approches ont souligné l'effet dominant des formations imperméables et la quasi-inexistence des nappes, favorisant le ruissellement et limitant le soutien des débits en basses eaux.

L'étude montre la nécessité d'augmenter les connaissances à tous les niveaux de la ressource en eau et l'insuffisance actuelle du réseau de mesure pour y parvenir.

Abstract

The objective of this research in hydroclimatology is to define the general flow characteristics conditions of the oued Grou, as a knowledge of water resources, in a region which is marked by a grave dryness.

Tributary river of bou Regreg, the Grou is representative of the characters of the border of south and south-est of the Plateau Central. The channel seems enough regular although it crosses hilly regions with watertight substratum, characterised by a great discontinuity of vegetal cover.

The type of climate is semi-barren mediterranean. The essential characters are represented on one hand by variability which is linked to a great year irregularity and at the existence of sequences of dry and wet years, and, on the other hand, by a great contrast of seasons (alternance of a wet, clement season and a warm, dry season).

The river flow follows the distribution of precipitations with two distinct seasons, a short high flow and a long period of low flow.

The study of average shows, in terms of frequencies, how intervenes the prevalent list of weather conditions and lithology in the flows. This list is confirmed with a statistical study of extreme flows (rising and lowest water levels).

The knowledge flows is realised at the catchments areas controlled by hydrometric stations in the water balances. The water balance use the models of space quantification of rain, temperature and the determination of characteristics flows by analysing hydrological phases.

This approach shows the dominating effects of permeable formations and scarceness of water tables, favours the overland flow and bounds the alimentation during low flow.

This research shows the necessity to increase the knowledge of water resources and how the present insufficient system of measure must be improved.