



Modèle  
"quasi -physique"



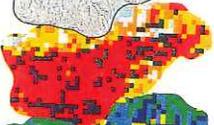
Pluie



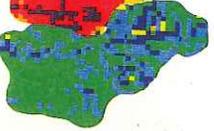
Maillage  
d'impluvium



Cours d'eau



Caractères  
physiques  
des sols



Etat hydrique  
des sols

# ÉCOULEMENT ET ÉROSION DANS DES PETITS BASSINS-VERSANTS A SOLS MARNEUX SOUS CLIMAT SEMI- ARIDE MEDITERRANEEN

Dieter Gomer

## COOPERATION

REPUBLIQUE ALGERIENNE  
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



REPUBLIQUE FEDERALE  
D'ALLEMAGNE

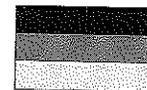
01.  
93 70 11

**ÉCOULEMENT ET ÉROSION DANS  
DES PETITS BASSINS-VERSANTS A  
SOLS MARNEUX SOUS CLIMAT SEMI-  
ARIDE MEDITERRANEEN**

Dieter Gomer

**COOPERATION**

REPUBLIQUE ALGERIENNE  
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



REPUBLIQUE FEDERALE  
D'ALLEMAGNE

	Gruppe 663	
	Information und Dokumentation	

INFOTHEK

Cet ouvrage a été réalisé dans le cadre de la coopération technique algéro-allemande  
- PROJET PILOTE D'AMENAGEMENT INTEGRE DU BASSIN VERSANT DE  
L'OUED MINA -

PN 97.2095.5

Publié par:      Projet Pilote d'Aménagement Intégré du Bassin-Versant de  
                    l'Oued Mina  
                    c/o Deutsche Gesellschaft für  
                    Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH  
                    Postfach 5180  
                    D- 65726 Eschborn

Responsable:     Hartmut Paschen

Traduction:     Henri Vogt, Strasbourg

Composition:    Gabrielle Vogt, Camilla Conrad

Impression:     Druckerei Riesz & Müller  
                    D- 76189 Karlsruhe

Distribution:    Bureau du projet ANRH-GTZ  
                    Ob der Eichhalden 7  
                    D- 76228 Karlsruhe  
                    Fax +49 721 9453022

Titel - Nr. 97-2011

## Préface

Les grandes retenues sont un élément essentiel de la gestion de la ressource eau en milieu semi-aride. Leur protection contre le comblement par des sédiments par suite de l'érosion en amont des bassins-versants est indispensable pour assurer la rentabilité de ces investissements.

A l'exemple du bassin-versant de l'Oued Mina, les problèmes de protection contre l'érosion en milieux marneux, de loin les plus sensibles à ce phénomène dans l'Atlas tellien, ont fait l'objet pendant une décennie d'un programme de la coopération algéro-allemande. Ce projet a embrassé non seulement les aspects environnementaux de l'érosion, mais aussi les conséquences à prévoir sur les conditions de vie des populations vivant dans l'amont des bassins-versants. Il s'agit là de problématiques qui ont attiré un grand nombre d'étudiants algériens et allemands.

Il en est résulté comme sous-produit du programme de collaboration une trentaine de mémoires et thèses soutenus dans des établissements d'enseignement supérieur d'Algérie, d'Allemagne et de France. A la demande de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) d'Algérie, l'un des organismes partie prenante de la coopération, la thèse de docteur-ingénieur de Monsieur Dieter GOMER, soutenue à l'Université Technique de Karlsruhe en 1994, a été traduite de l'allemand en français, afin de la rendre accessible au personnel technique et aux étudiants algériens.

Monsieur GOMER a conçu et dirigé en chef d'équipe un programme exigeant de mesure des flux d'eau et de sédiments, comprenant des expérimentations de pluie artificielle (simulation de pluie), dans un certain nombre de bassins-versants élémentaires. Il en tire un modèle opérationnel d'écoulement et d'érosion particulièrement robuste et dont l'application exige un nombre relativement réduit de données d'entrée. A l'aide de documents de télédétection et d'un programme de système d'information géographique, il a également créé les bases pour l'extrapolation spatiale des résultats. Monsieur GOMER a ainsi créé un outil de travail très précieux dont l'application à d'autres bassins-versants marneux est très prometteuse.

Ce travail a aussi généré un résultat social essentiel, puisqu'il est démontré qu'en milieu marneux semi-aride le travail du sol par les paysans de

l'Atlas tellien limite considérablement l'érosion, ce qui va à l'encontre de l'opinion traditionnelle selon laquelle c'est la mise en valeur céréalière qui provoque l'érosion. On voit ainsi comment un modèle d'érosion peut être un instrument efficace pour l'aménagement du territoire, donc d'action politique.

H. Paschen

H. Vogt

## Table des matières

v

### TABLE DES MATIERES

Préface .....	i
Table des matières .....	v
Liste des figures .....	vii
Liste des tableaux .....	xv
Liste des symboles .....	xvi
1. Introduction .....	1
1.1 Les problèmes .....	1
1.2 Etat des connaissances et but de l'étude .....	3
2. Le cadre socio-économique et physique de la zone du projet .....	9
2.1 Présentation du cadre du projet .....	9
2.2 Le contexte social et politique .....	11
2.3 Le bassin-versant de l'Oued Mina .....	12
2.4 Les conditions climatiques .....	16
2.4.1 Précipitations et climat .....	16
2.4.2 Exploitations des données journalières de précipitations .....	23
2.4.3 Exploitation des données d'intensité des précipitations .....	34
2.5 L'érosivité .....	49
2.6 Géologie et sols .....	54
2.7 L'humidité du sol .....	65
2.8 Topographie et analyse du relief .....	75
3. Infiltration et écoulement .....	90
3.1 Genèse de l'écoulement et ruissellement .....	90
3.2 Infiltration et ruissellement pour divers types de sols .....	97
3.2.1 Infiltration et flux d'eau dans un sol homogène .....	97
3.2.2 L'infiltration en présence de macropores .....	101
3.2.3 Détermination de l'infiltration en sols marneux par simulation de pluie .....	102
3.2.4 Modélisation de l'infiltration en sols marneux selon la méthode de GREEN-AMPT-MEIN-LARSON élargie .....	109
3.2.5 L'imperméabilisation par battance .....	115
3.2.6 La modélisation de l'infiltration pour des sols marneux compte tenu de l'imperméabilisation par battance, par la méthode de HORTON modifiée .....	117
3.3 L'écoulement de petits bassins-versants .....	122

3.3.1	Traitement des données, déroulement des programmes et modélisation .....	122
3.3.2	Mesure et modélisation de l'écoulement .....	125
4.	Erosion et transport solide .....	141
4.1	Facteurs de l'érosion des sols et du transport solide .....	142
4.2	Le processus d'ablation .....	144
4.3	Le processus de transport .....	150
4.4	Dépôt et équation de continuité du transport solide .....	166
4.4.1	Bases mathématiques .....	166
4.4.2	Modélisation .....	167
4.5	Comparaison des mesures de transport solide avec les résultats des simulations .....	170
4.6	Conclusions sur l'érosion et le transport solide .....	179
5.	Mesures de défense contre l'érosion en milieux marneux semi-arides méditerranéens .....	180
5.1	Mesures biologiques de défense .....	180
5.2	Mesures agricoles - Le rôle du travail du sol sur l'érosion des sols .....	181
5.3	Mesures techniques - Correction torrentielle .....	183
6.	Conclusion .....	187
7.	Bibliographie .....	189

## ANNEXES

Photos .....	A
Diagrammes de fréquence/durée de pluie .....	B
Cartes des isohyètes des pluies extrêmes .....	C
Exploitation des essais de simulation de pluie au moyen de la méthode de HORTON modifiée .....	D
Résultats des mesures hydrométriques et de débit solide MB1-MB6 ...	E
Résultats de la modélisation .....	F
Affectation de l'humidité du sol .....	G
Analyses granulométriques, y compris des agrégats .....	H

## LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1	Structure d'un modèle à boîte noire .....	5
Fig. 1.2	Structure du modèle SHE (d'après ABBOT et al. 1986) .....	6
Fig. 2.1	Situation du projet en Algérie .....	10
Fig. 2.2.	Le bassin-versant de l'Oued Mina .....	13
Fig. 2.3	Situation du secteur-pilote Telfifit .....	14
Fig. 2.4	Schéma de la circulation des masses d'air d'après GIESSNER (1984) (modifié) .....	16
Fig. 2.5	Variation des précipitations mensuelles aux stations Aïn el Hadid, Sougueur et Oued el Abtal .....	17
Fig. 2.6	Totaux pluviométriques annuels 1910-1990 (lacune 1963), Oued el Abtal .....	19
Fig. 2.7	Précipitations annuelles moyennes 1913-1947, (GAUSSEN <i>et al.</i> 1953) .....	20
Fig. 2.8	Précipitations moyennes annuelles 1922-1960 + 1969-1989 (données ANRH 1993) .....	21
Fig. 2.9	Précipitations annuelles à Alger Port, 1844-1992 .....	22
Fig. 2.10	Situation des stations pluviométriques (selon tabl. 2.2., p.28) .....	23
Fig. 2.11	Indice de densité des données pluviométriques .....	24
Fig. 2.12	Détermination des périodes communes à 2 stations .....	26
Fig. 2.13	Génération d'une période continue synthétique, Période générale (II) .....	26
Fig. 2.14	Résultats de l'analyse en composantes principales des extrêmes journaliers et paramètres géographiques .....	29
Fig. 2.15	Résultats de l'analyse factorielle des maximums journaliers et paramètres géographiques .....	30
Fig. 2.16	Régression des maximums journaliers et grandeurs géographiques y compris orographiques .....	30

viii	Liste des figures
Fig. 2.17	Régression des maximums journaliers avec grandeurs géographiques y compris orographiques ..... 31
Fig. 2.18	Maximums journaliers (temps de retour 2 ans, période (I): 1910-1990) ..... 32
Fig. 2.19	Maximums journaliers (temps de retour 50 ans, période (I): 1910-1990) ..... 33
Fig. 2.20	Schéma du déroulement de la procédure pour établir les relations pluie-débit ..... 35
Fig. 2.21	Relations FPD à Frenda, période (III) 1977-1991, sans compensation physique entre les classes de durée ..... 36
Fig. 2.22	Compensation des moyennes entre les classes de durée pour Frenda ..... 37
Fig. 2.23	Compensation des écarts-type entre les classes de durée pour Frenda ..... 38
Fig. 2.24	Relations FPD à Frenda, période (III) 1977-1992, avec compensation physique entre les classes de durée ..... 38
Fig. 2.25	Comparaison des moyennes $\mu_{III}$ de la période (III) entre la classe de durée 24 heures et celle de 1 jour ..... 39
Fig. 2.26	Comparaison des écarts-type $s_{III}$ de la période (III) entre la classe de durée 24 heures et celle de 1 jour ..... 40
Fig. 2.27	Hauteurs d'averses intenses pour $D=24$ h et $T_n = 5a - T_n = 100a$ , Lissage sur 30 ans (DVWK 1991) ..... 41
Fig. 2.28	Schéma de l'ajustement des paramètres statistiques d'une station pluviographique de la période (III) à la série de référence (I) ..... 42
Fig. 2.29	Relations FPD de Frenda, période (I) 1910-1990 ..... 43
Fig. 2.30	Relations FPD de Frenda, période (I) 1910-1990 ..... 44
Fig. 2.31	Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 0,1 heure ..... 44
Fig. 2.32	Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 0,5 heure ..... 45
Fig. 2.33	Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 1 heure ..... 45

Liste des figures	ix
Fig. 2.34	Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 6 heures ..... 46
Fig. 2.35	Comparaison des extrêmes de précipitations annuels (ANRH 1993) avec les extrêmes en 24h et 72h ..... 47
Fig. 2.36	Précipitations extrêmes en 24 heures (temps de retour 50 ans, période (I): 1910-1990) ..... 48
Fig. 2.37	Distribution de l'indice d'érosion normé pour des événements mensuels avec $P_\mu = 0,95$ pour l'année ..... 49
Fig. 2.38	Distribution relative de la somme mensuelle de l'indice R de WISCHMEYER et SMITH (1978) ..... 50
Fig. 2.39	Erosivité moyenne des pluies dans le bassin-versant de l'Oued Mina ..... 53
Fig. 2.40	Domaine spectral des systèmes de télédétection majeurs: in RICHARDS (1986) ..... 55
Fig. 2.41	Landsat TM5 27.1.1990. Canal 4 (cyan), canal 3 (magenta), canal 1 (jaune) ..... 56
Fig. 2.42	Analyse en Composantes Principales. Facteurs 1 (cyan), 2 (magenta), 3 (jaune) ..... 56
Fig. 2.43	Exposition des classes de sols selon VOGT <i>et al.</i> (1992) dans le bassin-versant du Telfifit ..... 58
Fig. 2.44	Classes de sols selon VOGT <i>et al.</i> (1992) dans le bassin-versant 'Telfifit' ..... 62
Fig. 2.45	Sols classés selon leur comportement hydrologique dans le bassin-versant 'Telfifit' ..... 63
Fig. 2.46	Comparaison de la structure de la transformation du Tasseled Cap (CRIST et CIGONE 1984) avec l'Analyse en Composantes Principales normée selon VOGT <i>et al.</i> (1992) ..... 67
Fig. 2.47	Humidité moyenne du sol en fonction de l'exposition dans le bassin-versant 'Telfifit' ..... 68
Fig. 2.48	Détermination des zones saturées (in: DIETRICH <i>et al.</i> 1993) ..... 69

Fig. 2.49a	Variation de l'humidité du sol en fonction de la distance du collecteur dans le bassin-versant 'Telfifit', exploitation de scènes Landsat TM5 du 27.1.1990 et 19.3.1991 .....	69
Fig. 2.49b	Variation de l'humidité du sol en fonction de la distance du collecteur dans le bassin-versant 'Telfifit', exploitation de scènes Landsat TM5 du 27.1.1990 et 19.3.1991 .....	70
Fig. 2.50	Distribution spatiale de l'humidité du sol le 27.1.1990 dans le bassin-versant 'Telfifit' .....	72
Fig. 2.51	Distribution spatiale de l'humidité du sol le 19.3.1991 dans le bassin-versant 'Telfifit' .....	73
Fig. 2.52	Distribution spatiale des hauteurs de précipitations avant le 19.3.1991 dans le bassin-versant 'Telfifit' .....	74
Fig. 2.53	Données d'altitude avant élimination des creux .....	76
Fig. 2.54	Données d'altitude après élimination des creux .....	76
Fig. 2.55	Carte des pentes du bassin-versant 'Telfifit' .....	77
Fig. 2.56	Carte des expositions du bassin-versant 'Telfifit' .....	80
Fig. 2.57	Carte classique de la taille des aires contributives classifiées par maille de raster, 'Telfifit' .....	81
Fig. 2.58	Carte des trajets de flux d'eau dans le bassin-versant 'Telfifit' .....	82
Fig. 2.59	Distribution des classes de pente dans le bassin-versant 'Telfifit' .....	83
Fig. 2.60	Distribution des classes de pente des micro-bassins MB1-MB6 .....	83
Fig. 2.61	Information topographique issue de l'exploitation photogrammétrique de photographies aériennes, à l'exemple du micro-bassin MB1 .....	84
Fig. 2.62	Résultat du croisement des tailles de l'aire constitutive par maille de raster (fig. 2.57) avec les têtes de ravins des micro-bassins MB1-MB6 .....	85
Fig. 2.63	Profil en long du micro-bassin MB1 d'après levés géodésiques (octobre 1990 et septembre 1991) avec détail pour illustrer les ablations dans le collecteur principal .....	88

Fig. 2.64	Profil en long du micro-bassin MB5 d'après levés géodésiques (octobre 1990 et septembre 1991) avec détail pour illustrer les ablations dans le collecteur principal .....	89
Fig. 3.1	Formation de l'écoulement, in CHURCH et al. (1990) .....	91
Fig. 3.2	Détermination du processus de versant dominant généralement l'écoulement hypodermique (in ANDERSON & BURT 1990) .....	92
Fig. 3.3	Schéma des définitions pour l'équation de continuité et l'équation dynamique .....	92
Fig. 3.4	Schéma des définitions pour le mode de calcul simplifié du réservoir cinématique (in: SCHRAMM 1994, modifié) .....	94
Fig. 3.5	Déroulement de l'infiltration en sol homogène a: idéal (in: SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992), b: par détermination expérimentale (in: DYCK 1983), c: Approximation par la démarche de Green-Ampt (in: SCHIFFLER 1992) .....	99
Fig. 3.6	Détermination de la tension de succion moyenne et efficace (SCHMID 1986) .....	100
Fig. 3.7	Schéma de l'infiltration dans un sol nonhomogène (in: GERMAN 1992, modifié) .....	101
Fig. 3.8	Schéma de simulateur de pluie ORSTOM .....	102
Fig. 3.9	Ajustement commun des valeurs de $K-\theta$ et $\psi-\theta$ du modèle fermé de VAN GENUCHTEN (1980) .....	112
Fig. 3.10	Ajustement séparé des valeurs de $K-\theta$ et $\psi-\theta$ du modèle fermé de VAN GENUCHTEN (1980) .....	112
Fig. 3.11	Relation entre $K_s$ percolation et la hauteur relative de remplissage du volume de macropores .....	113
Fig. 3.12	Relation entre la conductivité hydrique normée $K_{s, \text{retention}}$ et l'humidité antécédente $\theta_{\text{ini}}$ .....	114
Fig. 3.13	L'influence de sodium échangeable (ESP) sur l'infiltration, in RÖMKENS ET AL. (1990) .....	116
Fig. 3.14	Le taux d'infiltration en fonction de l'énergie de pluie cumulée, à l'exemple de l'essai No. 4 du 23.04.1992 .....	118

xii	Liste des figures
Fig. 3.15	Le taux d'infiltration relatif en fonction de l'énergie de pluie cumulée, à l'exemple de l'essai No. 4 du 23.04.1992 ..... 118
Fig. 3.16	Le paramètre de forme $W$ en fonction de l'humidité antécédante $\theta_{ini}$ ..... 120
Fig. 3.17	Situation des micro-bassins MB1-MB6 et des stations pluviométriques dans le bassin versant „Telfifit“ ..... 125
Fig. 3.18	Stations hydrométriques des micro-bassins ..... 126
Fig. 3.19	Variabilité spatiale de l'intensité maximale en 30 minutes de l'événement du 03.10.1991 ..... 129
Fig. 3.20	Relation entre l'indice d'humidité antécédante et la perte initiale ..... 131
Fig. 3.21	Pluies efficaces en fonction de la hauteur de pluie et de son énergie ..... 132
Fig. 3.22	Hydrogramme mesuré et calculé à l'hydromètre MB1 le 03.01.1990 ..... 134
Fig. 3.23	Hydrogramme mesuré et calculé à l'hydromètre MB1 le 10.04.1990 ..... 135
Fig. 3.24	Hydrogramme mesuré et calculé à l'hydromètre MB1 le 13.03.1991 ..... 135
Fig. 3.25	Hydrogramme mesuré et calculé à l'hydromètre MB1 le 03.10.1991 ..... 136
Fig. 3.26	Profil mouillé maximal $\Lambda_i$ dans le micro-bassin MB1 le 03.10.1991 ..... 137
Fig. 3.27	Hydrogramme mesuré et calculé à l'hydromètre MB3 le 13.03.1991 ..... 138
Fig. 3.28	Hydrogramme mesuré et calculé à l'hydromètre MB4 le 13.03.1991 ..... 139
Fig. 4.1	Structure et horizons météorisés typiques de sols riches en argile ..... 146
Fig. 4.2	Subdivision des modes de transport solide ..... 151
Fig. 4.3	Distribution relative de la concentration d'après ROUSE (1937) ..... 153

Liste des figures	xiii
Fig. 4.4	Modèles rhéologiques de fluides hyperconcentrés (in: RIEKENMANN 1990) ..... 157
Fig. 4.5	Profils de vitesse avec et sans charriage en eau claire (WANG et LARSEN 1994) ..... 160
Fig. 4.6	Profils de vitesse avec et sans charriage en présence de suspension argileuse (WANG et LARSEN 1994) ..... 160
Fig. 4.7	Rapport entre le nombre de Rouse et le $z'$ d'EINSTEIN (in: CHANG 1988) ..... 161
Fig. 4.8	Détermination de $b_s$ d'après ZANKE (1982) ..... 161
Fig. 4.9	Détermination de $b_c$ d'après VAN RIJN (1984) ..... 162
Fig. 4.10	Erosion en fonction de la pluie efficace à l'échelle de l'événement dans les micro-bassins MB1-MB6 (sans 3.10.1981) ..... 171
Fig. 4.11	Erosion en fonction de l'énergie cinétique de la pluie, MB1-MB6 (sans 3.10.1981) ..... 171
Fig. 4.12	Influence de l'événement extrême du 3.10.1991 sur l'érosion spécifique annuelle dans le micro-bassin MB1 .... 172
Fig. 4.13	Comparaison du débit solide mesuré avec les résultats du modèle (3.1.1990; MB1) ..... 173
Fig. 4.14	Comparaison du débit solide avec les résultats du modèle (10.4.1990; MB1) ..... 174
Fig. 4.15	Comparaison du débit solide mesuré avec les résultats du modèle (13.3.1991; MB1) ..... 174
Fig. 4.16	Ecart entre l'hydrogramme et la courbe des débits en suspension pour de grands cours d'eau (in: GRAF 1971) ... 175
Fig. 4.17	Courbe en fonction du temps de $V_0^*$ , $V$ , $Q$ , $h$ en modèle physique à fond rugueux (in: TU et GRAF 1993) ..... 175
Fig. 4.18	Comparaison des charges solides mesurées et calculées des micro-bassin MB1-MB6 ..... 176
Fig. 4.19	Ablation moyenne modélisée sur des surfaces proches et éloignées du collecteur (3.10.1991; MB1) ..... 176
Fig. 4.20	Résultat de la modélisation de l'ablation pour l'événement du 3.10.1991 dans le MB1 ..... 178

Fig. 5.1	Taux d'infiltration sur la parcelle Mehallet, pluie artificielle. Expérience 1 et 2 .....	181
Fig. 5.2	Taux d'infiltration sur la parcelle Mehallet, pluie artificielle. Expérience 3 (après travail du sol) .....	182
Fig. 5.3	Ouvrage en gabion typique, réalisé dans le micro-bassin MB2 .....	183
Fig. 5.4	Ouvrage avec digue en terre avec évacuateur de crue en gabions (GOMER <i>et al.</i> 1993) .....	184
Fig. 5.5	Correction torrentielle technique et biologique idéale dans MB1 .....	185
Fig. 5.6	Scénarios de débits liquides et solides dans le MB1 pour l'événement du 3.10.1991 .....	186

## LISTE DES TABLEAUX

2.1.	Caractéristiques des stations pluviométriques de référence: valeurs statistiques à partir de données logarithmiques .....	25
2.2.	Extrêmes journaliers dans le bassin-versant de l'Oued Mina, période (I): 1910-1990 .....	28
2.3.	Valeurs annuelles du facteur R de WISCHMEYER et SMITH (1978) .....	51
2.4.	Classes de sols selon VOGT <i>et al.</i> (1992) .....	57
2.5.	Classes de comportement hydrologique des sols pour la zone des marnes dans le bassin-versant de l'Oued Telfit .....	60
2.6.	Grandeurs géomorphologiques des micro-bassins MB1-MB6 ..	87
3.1	Caractéristiques des sites de pluie artificielle .....	103
3.2	Relations pluie-débit pour les parcelles de pluie artificielles; campagne 1990/91 .....	105
3.3	Relations pluie-débit pour les parcelles de pluie artificielles; campagne 1989/90 .....	106
3.4	Caractéristiques des parcelles de pluie artificielle .....	107
3.5	Paramètres des soles pour la description de l'infiltration d'après le modèle de HORTON modifiée (equ. 3.37) .....	120
3.6	Tableau des caractéristiques des précipitations dans le bassin-versant „Telfit“ .....	128
3.7	Aperçu des caractéristiques hydrologiques des micro-bassins ..	130
4.1.	Valeurs d'impulsion cinétique critique $m_{crit}$ et de rugosité utilisées pour la modélisation de l'érosion .....	149

## LISTE DES SYMBOLES

Cette liste regroupe les symboles les plus fréquemment utilisés. D'autres sont définis dans le texte.

$\Lambda$	L2	Profil en travers
AEZG	L2	Aire d'alimentation
Ar	L	Profondeur du ruissellement (essais d'infiltration)
a	L	Hauteur au-dessus du fond (détermination de la distribution verticale des concentrations en suspension)
b	L	Largeur de maille de raster
B	L	Largeur de barrage de déversement
$B_G$	L	Largeur de chenal
BBG	-	Degré de couverture du sol
BHV	-	Relation largeur-hauteur des chenaux en forme de V
$C_q$	-	Coefficient d'écoulement pour ouvrage de déversement (en général)
$C_{q-w}$	-	Coefficient d'écoulement pour barrage de déversement
$C_r$	-	Facteur seuil
C	1/L	Capacité de rétention spécifique
$C_d$	-	Coefficient de résistance de particules isolées
$C_{dep}$	-	Coefficient de dépôt
$C_v$	-	Concentration volumique de solides
$c_{va}$	-	Concentration de référence à la distance a au-dessus du fond
d	L	Diamètre de particule
$d_{limite}$	L	Diamètre-limite de particule
$d_s$	M/T	Dépôt (interstationnaire)
D	T	Classe de durée
$D_s$	M/T	Dépôt (intra-stationnaire)
$E_{cin}$	$ML^2/T^2L^2$	Energie cinétique de la pluie
$E_s$	$M/L^2$	Erosion sur une aire donnée
f	L/T	Taux d'infiltration
$f_{micro}$	L/T	Taux d'infiltration dans la matrice
$f_{macro-percolation}$	L/T	Taux d'infiltration dans les macropores à drainage rapide

## Liste des symboles

$f_{macro-rétention}$	L/T	Taux d'infiltration dans les macropores à drainage lent
$f_{(E, cin)}$	L/T	Taux d'infiltration en fonction de l'énergie cinétique cumulée de la pluie
$f_{rel.(E, cin)}$	-	Taux d'infiltration relatif en fonction de l'énergie cinétique cumulée de la pluie
g	$L/T^2$	Accélération de la gravité
h	L	Profondeur d'écoulement
$h_o$	L	Hauteur de chute du seuil de déversement
$i_Q$	$ML/T^2$	Flux d'impulsion de l'écoulement selon SCHMIDT (1991)
$i_{r,\alpha}$	$ML/T^2$	Flux d'impulsion efficace de la pluie
$I_o$	-	Pente d'un versant, de l'unité de calcul
$I_f$	-	Pente de frottement
IK	L	Indice d'humidité antécédente du sol
K	L/T	Conductivité hydraulique du sol
$K_i$	-	Paramètre d'ajustement
$K_s$	L/T	Conductivité hydraulique du sol
$K_{s,percolation}$	L/T	Conductivité des macropores à drainage rapide
$K_{s,rétention}$	L/T	Conductivité des macropores à drainage lent
$K_{s,micro}$	L/T	Conductivité de la matrice
$K_u$	L/T	Conductivité hydraulique du sol non saturé
$K_r$	L/T	Conductivité hydraulique relative du sol
l	L	Longueur de maille de raster
$l_p$	L	Itinéraire de diffusion turbulente
$m_i$	-	Paramètre d'ajustement
$m_s$	-	Paramètre d'ajustement
$m_{crit}$	$M/LT^2$	Flux d'impulsion critique
$n_s$	-	Paramètre d'ajustement
$N_h$	L	Hauteur de pluie
$N_{h,eff}$	L	Pluie efficace
$N_r$	L/T	Intensité de pluie
$N_{r,30}$	L/T	Intensité maximale de pluie en 30 minutes
$P_u$	-	Probabilité de sous-dépassement
$q_B$	$L^2/T$	Charriage
$q_{cr}$	$L^2/T$	Vitesse critique de charriage selon RIEKENMANN
$q_k$	M/LI	Transport solide par unité de largeur

Q	$L^3/T$	Débit
$Q_s$	$M/T$	Débit solide
$q_z$	$L^3/L^2z$	Flux volumique par unité de surface en direction z
R	$ML/T^2$	Facteur d'érosivité d'une année hydrologique selon WISCHMEYER <i>et al.</i> (1978)
$R_{hyd}$	L	Rayon hydraulique
$Re$	-	Nombre de Reynolds
$Re_R$	-	Nombre de Reynolds efficace à la particule
$S_{\Delta V}$	L	Tension de succion efficace au front d'humidité
$S_r$	L	Tension de succion au front d'humidité
$S_o$	$L/T$	Influx latéral
$S_m$	$1/T$	Terme de perte dans l'équation de flux d'eau dans le sol
$S_r$	L	Seuil de hauteur de pluie (expérience d'infiltration)
$s_i$	-	Paramètre d'ajustement pour l'exploitation des données de pluie
t	T	Temps (en général)
T	$L^2/T$	Transmissivité
$T_n$	T	Temps de retour
TC	$M/T$	Capacité de transport
$TC_B$	$M/T$	Capacité de charriage selon RIEKENMANN
$TC_{BM}$	$M/T$	Capacité de transport au fond selon ENGELUND/HANSEN
V	$L/T$	Vitesse d'écoulement (en général)
$V_s$	$L/T$	Vitesse de sédimentation de particules solides
$V_o$	$L/T$	Vitesse de tension au fond
V	$L/T$	Vitesse d'écoulement (moyenne)
$V_{final}$	$L/T$	Taux d'infiltration final
$V_{rel\ final}$	-	Taux relatif d'infiltration finale
$V_{init}$	$L/T$	Taux d'infiltration initial
$V_{rel\ init}$	-	Taux relatif d'infiltration initial
$V_2$	$L/T$	Vitesse (moyenne) de chute des gouttes de pluie
w	L	Distance entre l'arête du barrage de déversement et le fond du chenal
W	-	Coefficient de forme
x	L	Coordonnée de longitude
y	L	Coordonnée de latitude
z	L	Coordonnée d'altitude

$z_f$	L	Profondeur du front d'humidité
$z_r$	L	Coordonnée de profondeur
$z_{ue}$	L	Hauteur du head local (infiltration)
$z_s$	-	Nombre de Rouse
$\phi$	$M/L^2T$	Influx, sortie de solides
$\alpha$	-	Pente moyenne d'un élément de surface
$\alpha_r$	-	Facteur pour déterminer l'indice d'humidité antécédente IK
$\beta$	-	Coefficient de forme
$\beta_s$	-	Constante de proportionnalité entre les coefficients de diffusion de sédiments et d'impulsion
$\epsilon_s$	-	Coefficient de diffusion sédimentaire
$\epsilon_m$	-	Coefficient de diffusion d'impulsion
$\eta$	$M/LT$	Viscosité dynamique du fluide
$\eta_B$	$M/LT^2$	Viscosité binghamienne
$\eta_c$	$M/LT^2$	Viscosité efficace de fluides à hyperconcentration
$\eta_s$	$M/LT$	Viscosité efficace de suspensions
$\eta_w$	$M/LT$	Viscosité efficace d'eau claire
$\theta$	Vol. %	Teneur en eau du sol
$\theta_{ini}$	Vol. %	Teneur en eau initiale
$\theta^*$	Vol. %	Teneur en eau efficace du sol (degré de saturation)
$\theta_r$	Vol. %	Teneur en eau résiduelle du sol
$\theta_s$	Vol. %	Teneur en eau du sol à saturation
K	-	Constante de von Karmann
$\mu$	-	Moyenne
$\sigma$	-	Ecart-type
$\nu$	$L^2/T$	Viscosité dynamique
$\rho$	$M/L^3$	Densité
$\rho_f$	$M/L^3$	Densité du fluide (suspension)
$\rho_{1120}$	$M/L^3$	Densité de l'eau claire
$\rho_s$	$M/L^3$	Densité des solides
$\tau_o$	$M/LT^2$	Tension au fond
$\tau_B$	$M/LT^2$	Tension au fond initiale des fluides binghamiens
$\psi$	L	Potentiel
$\psi_h$	L	Potentiel hydraulique
$\psi_m$	L	Potentiel matriciel

$\Psi$	L	Potentiel gravitationnel
$\omega$	L/T	Vitesse de sédimentation en groupe
$\phi_r$	-	Coefficient d'écoulement

## 1 Introduction

### 1.1 Les problèmes

Alors que dans les zones humides l'importance de l'eau comme ressource n'a été reconnue que récemment par suite des problèmes de pollution, il n'en est pas de même dans les zones rurales arides et semi-arides, où une utilisation responsable de l'eau est traditionnelle (PNUD 1988). Dans la plupart de ces pays l'eau potable, industrielle et d'irrigation ne peut être fournie qu'en stockant l'écoulement de surface.

En Algérie la construction de barrages-réservoirs a commencé dès le siècle dernier, mais la plupart sont postérieurs à l'indépendance. Actuellement 81 barrages majeurs stockent environ 4500M m<sup>3</sup>, avec un volume utilisable de 1800M m<sup>3</sup>.

L'inventaire du comblement de barrages-réservoirs par le 'Comité National Algérien des Grands Barrages', effectué en 1987 et comprenant les barrages les plus menacés, indique un taux de comblement d'environ 25%. Les taux de comblement de 18 parmi ceux étudiés par SAIDI (1991) sont du même ordre de grandeur que ceux des barrages alpins. Afin de compenser ces pertes de volume stocké et de répondre à la demande croissante d'eau potable et d'irrigation (croissance démographique >3%, importations alimentaires supérieures aux 2/3 des besoins), l'Algérie prévoit d'édifier 22 autres barrages-réservoirs d'ici 2010, portant le volume exploitable total à 5000 M m<sup>3</sup>.

Il existe fondamentalement deux types de mesures pour limiter l'envasement de barrages-réservoirs: curatives ou préventives. Parmi les mesures curatives on a:

- le remplacement du volume de stockage par construction de nouveaux barrages ou surélévation de ceux existants;
- la restitution du volume de stockage par dragage ou dévasement par chasse d'eau.

Les mesures curatives ont été expérimentées en Algérie mais, à cause de l'importance de l'envasement, elles ne peuvent suffire. Techniquement parlant, le nombre de sites adéquats ainsi que les possibilités de surélévation sont limités. Dans le petit barrage-réservoir de Fergoug, des dragages par succion éliminent depuis de nombreuses années environ 1,5M m<sup>3</sup> de sédiments par an, ce qui a permis de sauvegarder de 3,5 à 6M m<sup>3</sup> sur 18M m<sup>3</sup> de volume de rétention. La généralisation du procédé se heurte au

problème des produits de dragage et à un coût spécifique élevé. Le dévasement par chasse d'eau, tel qu'il est pratiqué dans les Alpes, est également inadéquat, car d'une part il s'agit pour l'essentiel de sédiments fins inaptes au roulage et d'autre part les grandes quantités d'eau nécessaires à ce procédé font défaut.

C'est pourquoi les mesures préventives s'imposent en Algérie. On peut avoir en théorie recours non seulement à des mesures anti-érosives dans le bassin-versant, mais aussi à des mesures d'aménagement et de gestion du barrage-réservoir utilisant des courants de densité pour canaliser les sédiments. Cependant le bilan hydrologique déficitaire empêche d'adopter ces techniques. La protection contre l'érosion est donc prioritaire (cf. RAMDANE 1993).

Pendant longtemps on a considéré en Algérie que c'est l'agriculture qui est la cause essentielle de l'érosion des sols. La construction à grande échelle de banquettes anti-érosives sur les pentes fortes avec plantation d'arbres inaptes à la consommation animale a paru être la solution, avant et après l'indépendance. Ceci entraînait l'expulsion ou le déplacement de paysans, ce qui posait relativement peu de problèmes politiques et administratifs dans l'état centralisé qu'était l'Algérie tant à l'époque coloniale qu'ensuite sous régime à parti unique. Toutefois, l'émergence de conflits sociaux dans les zones d'immigration et l'évidence de l'échec de cette stratégie amenèrent à reprendre le problème.

Le 'projet intégrant de protection contre l'érosion dans le bassin-versant de l'Oued Mina' veut aider à ce changement d'orientation. Ce travail de coopération algéro-allemande entendait contribuer au développement de méthodes d'exploitation agricole de bassins-versants adaptées à ce but.

## 1.2. Etat des connaissances et but de l'étude

L'idée historique d'une origine anthropique des manifestations érosives spectaculaires dans les zones marneuses de l'Atlas tellien s'appuie sur des recherches qui n'ont été relativisées que récemment. SARI (1977), se fondant sur GRECO (1966), postule dès la préface de sa monographie *L'homme et l'érosion dans l'Ouarsénis* que l'érosion est due pour l'essentiel à l'agriculture de subsistance des paysans de montagne et se demande comment cette subsistance peut être garantie à la longue et comment la protection des sols peut être atteinte par le boisement. Il conclut logiquement que l'exploitation des sols telle qu'elle se pratique à l'heure actuelle n'est pas compatible avec leur protection. Sa conviction est manifeste dans la question rhétorique qu'il pose de savoir si cette région de l'Atlas tellien n'a pas été longtemps immunisée contre l'érosion, jusqu'à il y a quelques décennies, par une couverture forestière. Bien qu'il n'existe ni preuves ni indices pour la thèse du déboisement sous l'effet de la colonisation française, elle continue à être répétée (BRAHAMIA 1993). SCHWEIKLE (1993) présente pourtant des arguments pédologiques en faveur d'une occupation agricole multiséculaire du paysage de l'Oued Mina. Des recherches sociologiques y confirment une ancienne tradition paysanne (VOGT *et al.* 1996).

Par contre, selon SARI (1977), l'érosion serait due à la mise en valeur récente. Selon lui, les paysans ont été chassés des de montagne sont à l'origine de la réaction en chaîne menant à l'érosion. P vallées par la colonisation française et vivent maintenant dans les montagnes anciennement boisées. Exposant le sol nu aux précipitations, soi-disant très agressives, les paysans ar conséquent, toutes les mesures préconisées par SARI tendent à la reconstitution de la forêt, sans plus en préciser les exigences.

DEMMAK montre dans sa thèse (1982) que l'agressivité des pluies est faible en Algérie et par conséquent aussi l'érosion pluviale. Il a compris que la construction de banquettes anti-érosives et le boisement de grandes surfaces, qui étaient alors propagés dans toute l'Algérie, ont non seulement été un échec, mais ont aussi gêné l'agriculture et sont dangereuses en vue de l'érosion, voire même l'accélérent. Pour lui, sont déterminants pour le transport solide la lithologie des bassins-versants, en particulier la proportion de marnes et d'argiles affleurantes, les précipitations au-delà d'un certain seuil et la densité du réseau de collecteurs.

ARABI (1991) confirme la faiblesse de l'érosion pluviale et, par conséquent, le fait que le ruissellement constitue un facteur essentiel pour

la détermination du transport solide dans les bassins-versants. Il propose les mesures de protection suivantes:

- stocker les eaux d'écoulement;
- favoriser l'infiltration au maximum;
- limiter la concentration des eaux de ruissellement;
- végétaliser;
- travailler le sol chaque fois que possible;
- améliorer la structure du sol ;
- corriger les ravins.

MEDDI (1992) montre qu'on peut déterminer les zones de plus forte ablation de manière satisfaisante par les démarches du type *boîte noire*, mais dans la discussion des causes de différences dans le taux d'ablation il ne fait que répéter les anciennes positions de SARI (1977) ou GRECO (1966). La méthode qu'il préconise se prête à la délimitation générale des zones fournissant beaucoup ou peu de sédiments en suspension, mais on ne peut en déduire de mesures de protection.

KOURI (1993) étudie de manière détaillée l'évolution des ravins de la zone-pilote Taassalet et décrit les processus d'érosion observables. Il établit par analyse statistique une typologie des types de fonctionnement en fonction de la lithologie, de la pente, de l'exposition, de la morphologie des ravins et de la mise en valeur des bassins-versants respectifs. Cinq types de ravins sont obtenus par classification ce qui permet, pour des zones à précipitation et débits analogues, d'appréhender et d'évaluer qualitativement les formes d'érosion dominantes au moyen des caractères géographiques.

Le but du présent travail est la modélisation quantitative et à forte résolution spatiale de l'écoulement et de l'érosion des sols pour de petits bassins-versants à sols marneux et climat semi-aride en Algérie, au moyen de méthodes des sciences de l'ingénieur. Il s'agit surtout de décrire la situation existante et d'évaluer des mesures de protection des bassins-versants, non de fournir des précisions à long terme. On attache une grande importance aux possibilités d'extrapolation à des régions voisines sans étalonnage.

Les modèles empiriques utilisés en hydrologie pour la gestion des eaux et dans les recherches sur l'érosion présentent une série d'inconvénients, c'est pourquoi les modèles actuels essaient de reproduire mathématiquement les processus les plus importants (ANDERSON *et al.*

1990, GOODRICH *et al.* 1991, SCHRAMM 1994, BRONSTERT 1994). Selon WIRTH (1979), ces modèles doivent répondre aux exigences fondamentales ci-dessous:

1. *exigence de similitude*: le modèle doit correspondre à l'original pour les principaux caractères pertinents en vue de la finalité;
2. *exigence d'exactitude*: le modèle doit donner une image plus précise et mieux structurée que ne l'est la réalité; les caractères les plus significatifs doivent être bien mis en valeur;
3. *exigence de simplicité*: le modèle doit avoir une expression plus simple que le système réel et faciliter aussi des conclusions systémiques;
4. *exigences de rendement*: on ne fait pas un modèle pour le plaisir de l'art, mais il doit être utilisable pour l'application ou pour le progrès des connaissances.

Par systémique ('boîte noire' = '*black-box*', fig. 1.1) n'en détaillant pas la structure interne. Par suite de la complexité des processus naturels, des hypothèses simplificatrices mais pertinentes doivent être opérées pour que la modélisation puisse répondre aux exigences formulées par Wirth 1979).

Dans la planification des eaux on a beaucoup utilisé dans le passé des modèles du type 'input-output'. On y décrivait le comportement du système, non pas par ses processus physiques, mais par une fonction conséquent, cette procédure ne permet pas d'étudier le comportement interne de cette boîte noire, p.ex. la variabilité spatiale de l'écoulement.

Cette approche des systèmes hydrologiques n'est pas adaptée à une étude de bassins-versants prenant en compte une discrétisation spatiale fine et les processus pour les raisons suivantes:

1. l'étalonnage des systèmes exige de très longues séries de données météorologiques et hydrologiques, alors que la qualité des prévisions qu'on en tire est très fortement influencée par la réponse systémique historique;
2. l'étalonnage de ces modèles à boîte noire peut être assimilé à un ajustement empirique de courbes, qui moyenne la



Fig.1.1 Structure d'un modèle à boîte noire

- variabilité spatiale du bassin-versant et exprime les processus individuels par une seule fonction systémique;
- des changements d'état physique dans le bassin-versant ne peuvent être représentés dans le modèle a priori;
  - les résultats ne peuvent guère être extrapolés à d'autres régions sans étalonnage ou sans procédure de régionalisation valable.

Ainsi ces modèles ne répondent pour l'essentiel qu'à l'exigence de simplicité, et seulement de manière très limitée aux autres.

On essaie de pallier les insuffisances des modèles à boîte noire par d'autres types, tel le SHE esquissé fig.1.2 (ABBOTT *et al.* 1986, DHI1986), qui explicitent les processus physiques significatifs et incluent une discrétisation spatiale et temporelle adéquate. En superposant au bassin-versant un maillage, p.ex. par rasterisation ou par la méthode des éléments finis, et en attribuant à chaque maille ses caractères 'géographiques', il est possible de décrire le comportement hydrologique du système avec la précision voulue, mais au moyen de paramétrisations et de temps de calcul très exigeants (modèle SHE: ABBOTT *et al.* 1986; modèle VSAS: TROENDLE 1985).

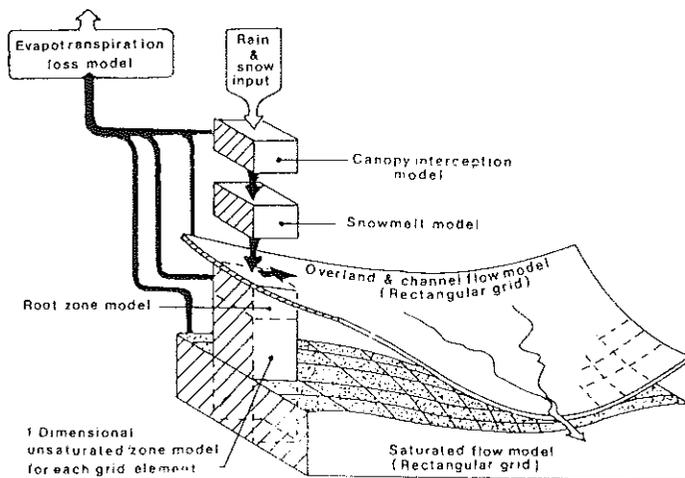


Fig.1.2 Structure du modèle SHE (d'après ABBOT *et al.* 1986)

Toutefois, la qualité des méthodes physiques détermine là aussi l'efficacité des modèles et on doit donc maintenir une attitude critique, sinon on risque une confiance abusive en les résultats (BEVEN 1989). En outre, beaucoup de processus ne peuvent faire l'objet d'une véritable description physique.

L'extrême lourdeur de la paramétrisation et les très fortes exigences en temps de calcul expliquent probablement que ces modèles soient peu appliqués jusqu'à présent.

Le but de ce travail est l'élaboration d'un modèle numérique opérationnel et extrapolable, permettant de quantifier l'écoulement et le transport solide de petits bassins-versants ainsi que la provenance des sédiments exportés, qui réponde aux exigences du pays partenaire et soit compatible avec les données disponibles. Il modélise les processus non stationnels de l'écoulement et de l'érosion des sols de petits bassins-versants par des méthodes décrivant ces processus. Comme les modèles 'quasi-physiques', pour lesquels le nombre de paramètres est limité, sont mieux intelligibles et donnent, selon beaucoup de spécialistes (KIRKBY 1988, STUART et HARTSHORNE 1982 et d'autres), des résultats tout aussi valables que les modèles purement physiques, ce sont ces méthodes simplificatrices qu'on utilise. C'est pourquoi on a appliqué ici aux surfaces étudiées un raster régulier, et on a simulé mathématiquement pour chaque maille les processus les plus importants d'écoulement et d'érosion des sols. L'interaction entre les mailles est déterminée par l'équation de continuité.

Cette méthode de modélisation partiellement discrétisée et quasi-physique présente les avantages suivants par rapport aux modèles physiques :

- elle réduit le modèle à un nombre limité de relations systémiques significatives décrites par des équations simples, ce qui en augmente la transparence et les possibilités de validation;
- on n'introduit dans le modèle que les seules données estimées importantes;
- la discrétisation du terrain d'étude peut se faire en fonction de la variabilité des processus et connexions systémiques ayant le plus de poids;
- il est possible de suivre une démarche itérative améliorant le modèle pas à pas. Ceci est utile pour permettre les adaptations aux conditions du partenaire qu'exige la coopération pour le développement.

En l'occurrence, la direction du projet était assurée par l'administration forestière d'Algérie, qui a changé plusieurs fois de dénomination et de ministère. Traditionnellement, c'est elle qui est compétente pour la défense contre l'érosion des sols en Algérie, et elle était dans l'ensemble beaucoup plus intéressée à l'implantation de soi-disant mesures de protection que par l'étude des causes de l'érosion. L'administration algérienne pour la gestion des eaux, 'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques - ANRH', mène

depuis longtemps des recherches propres sur les problèmes d'érosion et de transport solide en rapport avec l'envasement des barrages. La collaboration avec les représentants de ce partenaire associé au projet a été très constructive et encourageante. Malgré les difficultés politiques actuelles on souhaite continuer la collaboration technique avec ce partenaire en augmentant la productivité par des impulsions finalisées.

### Démarche

Le chapitre 2 présente d'abord le projet dans le cadre duquel se sont déroulés les travaux de terrain. Ensuite on examine le, puis on présente les sols et les conditions de leur humidité et le relief.

Le chapitre 3 débute par la description de l'infiltration et de l'écoulement en sols marneux en fonction de l'humidité du sol cadre socio-économique et physique, en esquissant en premier la situation sociale et politique en Algérie. Les conditions physiques donnent une large place à l'analyse des données de précipitations antécédente et on élabore une modélisation fondée sur les processus. Ensuite on établit un modèle de réservoirs cinématiques à discrétisation spatiale détaillée en vue de déterminer l'écoulement dans les bassins-versants; les résultats de ces calculs sont confrontés aux données mesurées aux exutoires de petits bassins-versants.

Le chapitre 4 traite des facteurs physiques influençant l'érosion et le transport solide. Suit une analyse des processus de détachement, de transport et de dépôt ainsi que leur formulation mathématique. Il se termine par plusieurs confrontations de débits solides à l'exutoire des petits bassins-versants avec les résultats des modèles.

Le chapitre 5 présente et discute des mesures biologiques, agronomiques et techniques pour la défense contre l'érosion dans les bassins-versants marneux en climat semi-aride.

Le dernier chapitre comporte les conclusions et les perspectives.

## 2 Le cadre socio-économique et physique de la zone du projet

Avant de présenter les conditions socio-économiques et physiques est esquissé le cadre du 'Projet intégrant de défense contre l'érosion des sols dans le bassin-versant de l'Oued Mina', mis en oeuvre par la coopération technique algéro-allemande. L'évocation des données sociales et politiques qui suit essaie d'éclairer les interactions entre conditions de vie et protection des ressources. La description du bassin-versant de l'Oued Mina et de ses caractères hydrographiques principaux en illustre la situation géographique. Sont analysées ensuite les conditions physiques. Pour les conditions climatiques on approfondit l'étude des précipitations tant pour les hauteurs de pluie que pour leur variabilité spatiale et temporelle.

Une description des processus de ruissellement et d'érosion des sols exige la connaissance préalable de la distribution des intensités des précipitations. Comme elle manque pour ce secteur de l'Algérie septentrionale, a été développée une méthode de détermination de la distribution spatiale des valeurs extrêmes à partir de mesures stationnelles journalières. Une fois cette information produite, on se fonde sur elle pour traiter la variation saisonnière de l'érosivité.

Les caractères et états des sols sont aussi des conditions physiques importantes. Une collaboration avec l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg a permis d'utiliser la télédétection pour leur classification et pour en déterminer l'humidité antécédente, ainsi que pour la distribution spatiale de ces caractères.

On termine par la topographie comme dernière condition physique de l'écoulement et de l'érosion. Pour l'analyse du relief un modèle numérique de terrain a été élaboré sous la direction de l'auteur. Des études détaillées des changements topographiques par levés géodésiques dans deux petits bassins-versants donnent des informations importantes sur les conditions d'ablation et de transport dans les collecteurs.

### 2.1. Présentation du cadre du projet

La zone d'application du projet (fig. 2.1) a été déterminée par un échange de notes entre la République Fédérale d'Allemagne et l'Algérie en 1978, un an avant l'achèvement du barrage de Sidi Mohammed Ben Aouda, que certains auteurs appellent Es Saada (en arabe: barrage). Sous le titre 'Protection intégrante contre l'érosion dans le bassin-versant de l'Oued Mina' il a été prévu de développer et de tester des mesures exemplaires de

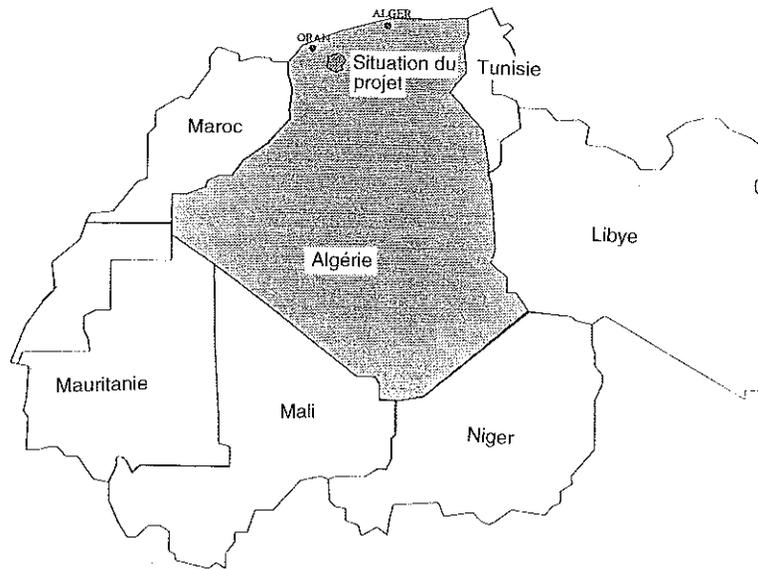


Fig. 2.1 Situation du projet en Algérie

protection contre l'érosion des sols, compte tenu des intérêts divergents des populations concernées et des administrations (PASCHEN 1989). Le projet a piétiné pendant plusieurs années non seulement par suite de nombreux problèmes administratifs qu'on ne détaillera pas ici, et des changements fréquents de responsable du côté algérien, mais surtout à cause de l'idée *a priori* que c'est l'agriculture de subsistance agro-pastorale qui déclenche l'érosion des sols. Les recherches ici exposées, effectuées de 1989 à 1992 en tant que collaborateur scientifique à l'Institut d'aménagement des eaux et techniques culturales (Institut für Wasserbau und Kulturtechnik) de l'Université technique de Karlsruhe ont pour une grande part contribué à réfuter cette conception et à changer la conception du projet. Ce ne sont pas les surfaces agricoles qui sont principalement à l'origine de l'ablation du sol, mais l'érosion linéaire. Abandonner ces surfaces entraîne dans le contexte socio-économique actuel un surpâturage incontrôlable et augmente le ruissellement par imperméabilisation. En outre les pentes fortes favorisent la concentration des eaux de ruissellement, qui forment de profondes incisions évoluant rapidement. Ce qui s'impose ce n'est donc

pas de réduire les surfaces cultivées, mais au contraire de conserver la mise en valeur agricole.

## 2.2. Le contexte social et politique.

Le projet a été initié et s'est développé dans des conditions sociales et politiques difficiles en Algérie. Au début de l'indépendance, en 1963, ce pays était un gros exportateur de produits agricoles et disposait de la meilleure infrastructure du continent après l'Afrique du Sud; les combustibles fossiles ne représentaient que 12% des revenus de l'exportation. A la suite du coup d'Etat de 1965, Boumediene introduisit un système politique et économique inspiré de celui des pays socialistes à parti unique. L'effort fut mis uniquement sur l'industrialisation, qui a été un échec; l'agriculture a été complètement négligée. En 1988, 95% des revenus provenaient des activités relevant de l'OPEC et environ 80% des produits d'alimentation devaient être importés, alors que le service de la dette absorbait 80% des revenus de l'exportation. En l'absence de réserves pour financer des investissements publics créateurs d'emplois, et la population ayant plus que doublé depuis 1963, le chômage, surtout des jeunes, a pris des proportions considérables. A la suite de l'abandon progressif du système de démocratie populaire, il est résulté une situation politique explosive et depuis 1991 une crise profonde à caractère de guerre civile.

Fin 1993, la Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit, l'organisme allemand chargé de la coopération technique, a rappelé tous ses collaborateurs pour raisons de sécurité.

On ne peut dresser ici un tableau général de l'état de la population, car la situation en Algérie est trop complexe. Caractéristique est le jeu de mots opposant 'les Algérois' aux 'Algériens'. Il est certain que les petits paysans sont désormais au bas de l'échelle sociale et ne bénéficient que peu de la sollicitude des politiciens. Ils sont méprisés et peu concurrentiels à cause des fortes subventions accordées aux importations alimentaires. Leur situation matérielle désolante engendre un fort exode rural.

Dans la zone du projet, les petites exploitations pratiquent en contre-haut des fonds de vallée, généralement fertiles et irrigables, une agriculture de subsistance dont l'élevage procure l'essentiel du revenu. Les cultures sont à dominante céréalière pour l'autoconsommation et très liées à l'élevage. La forte variabilité des rendements pour des causes climatiques exige un système de stockage qui en amortisse les effets. Les années de faible rendement les céréales sont en partie directement pâturées, les années de

fort rendement des silos creusés dans les marnes accueillent des réserves pour la consommation humaine et animale. On pratique l'assolement biennal avec jachère; les terres des paysans émigrés ne sont ni affermées ni vendues; l'absence de travail du sol et le surpâturage incontrôlé de ces surfaces entraînent la dégradation des sols, qui mène en quelques années à leur perte totale pour l'agriculture (VOGT *et al.* 1994). Selon les phytosociologues, la végétation potentielle naturelle est une forêt claire à strate arbustive dense (OGRYSEK 1994), à réseau racinaire dense, limitant l'érosion du sol. Cette végétation ne subsiste plus que sous forme relictuelle dans de rares sites jamais mis en valeur. La recolonisation est empêchée par la charge pastorale et par la sécheresse climatique. Même les plantes annuelles et pionnières ne peuvent assurer une couverture de quelque importance sans réglementation des pâtures.

Dans ces conditions, protection contre l'érosion égale protection du sol, qui ne peut être atteinte qu'en collaboration avec la population. Ceci exige, non seulement la compréhension de la situation, mais aussi la volonté politique de collaborer avec la population concernée, que la politique algérienne a traitée jusqu'à présent comme une société marginale.

### 2.3. Le bassin-versant de l'Oued Mina.

La fig. 2.2 présente le bassin-versant de l'Oued Mina, d'environ 5 000 km<sup>2</sup>. Il se trouve quelque 300 km à l'Ouest d'Alger, dans l'Oranais. Il forme un rectangle Sud-Nord depuis les Hautes Plaines du Chott Ech Chergui au Sud jusqu'au cours inférieur de l'Oued Cheliff, sur 128 km. La partie septentrionale s'insère dans le Tell occidental ou Tell oranais et comprend la retombée sud-orientale de l'Ouarsénis à l'Ouest. A l'Est, elle est limitée par les Monts des Beni-Chougrane. L'altitude, variant entre 1300 m et 100 m, décroît vers le Nord.

Le relief est très tourmenté, constitué pour l'essentiel de plateaux entaillés et de versants raides; seul 12% de la surface sont plans.

Il y a cinq sous-bassins de taille variable, drainés par les oueds Medroussa, Taht, Haddad, Abd et l'Oued Mina lui-même; leur taille va de 460 km<sup>2</sup> pour l'Oued Haddad à la station Sidi-Abdelkader et Djilali à 4168 km<sup>2</sup> pour l'Oued Mina à la station Oued el Abtal, ce qui fait 87% de la surface.

Le cours supérieur de l'Oued Mina est limité par le barrage-réservoir de Bakhadda. De là à celui de Sidi Mohammed Ben Aouda l'Oued ne draine directement que la partie nord-orientale du bassin-versant. Le long de son

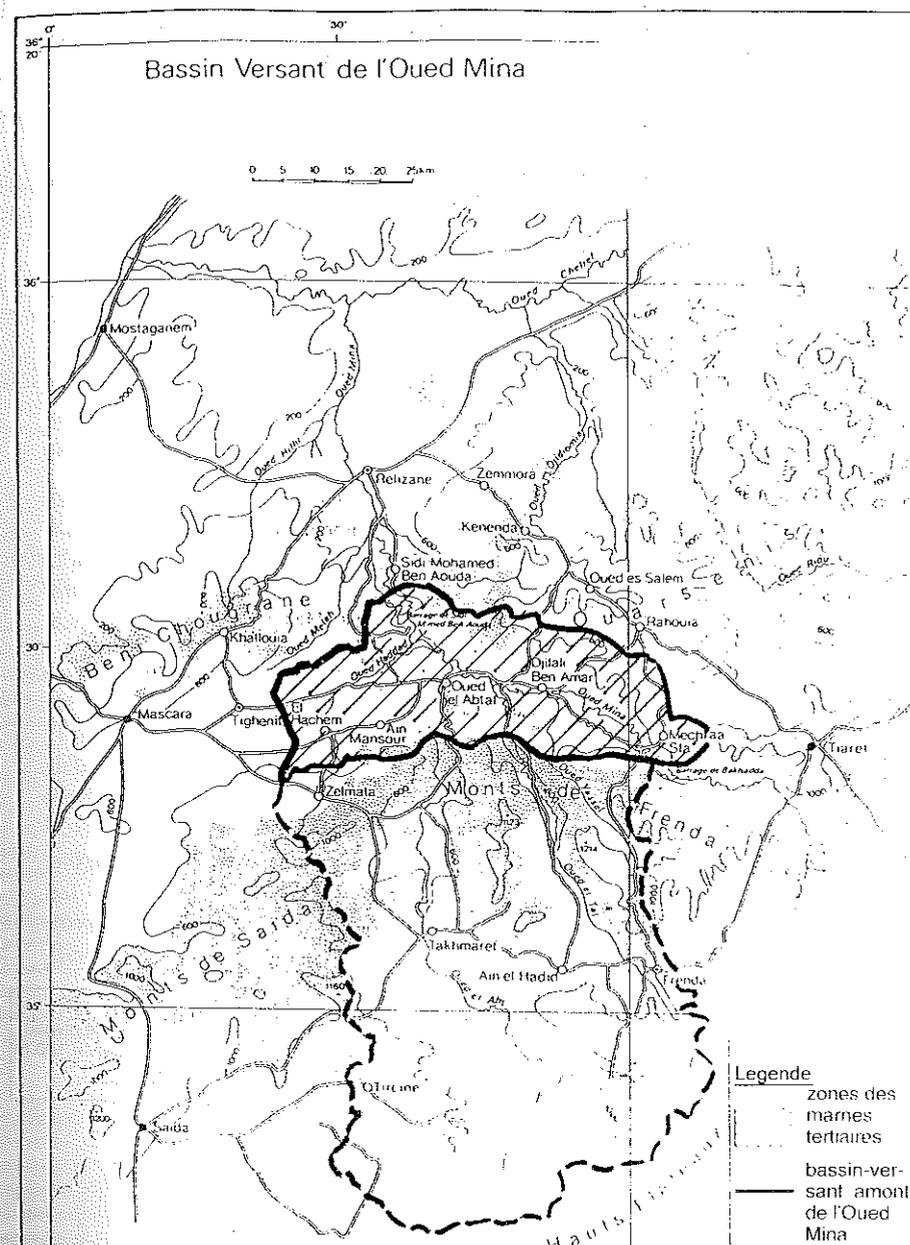


Fig. 2.2 Le bassin versant de l'Oued Mina

parcours SE-NE il reçoit les Oueds Medroussa, Taht, Abd et Haddad qui drainent les secteurs sud-est, sud et nord-ouest du bassin-versant.

### Situation du secteur-pilote Telfifit

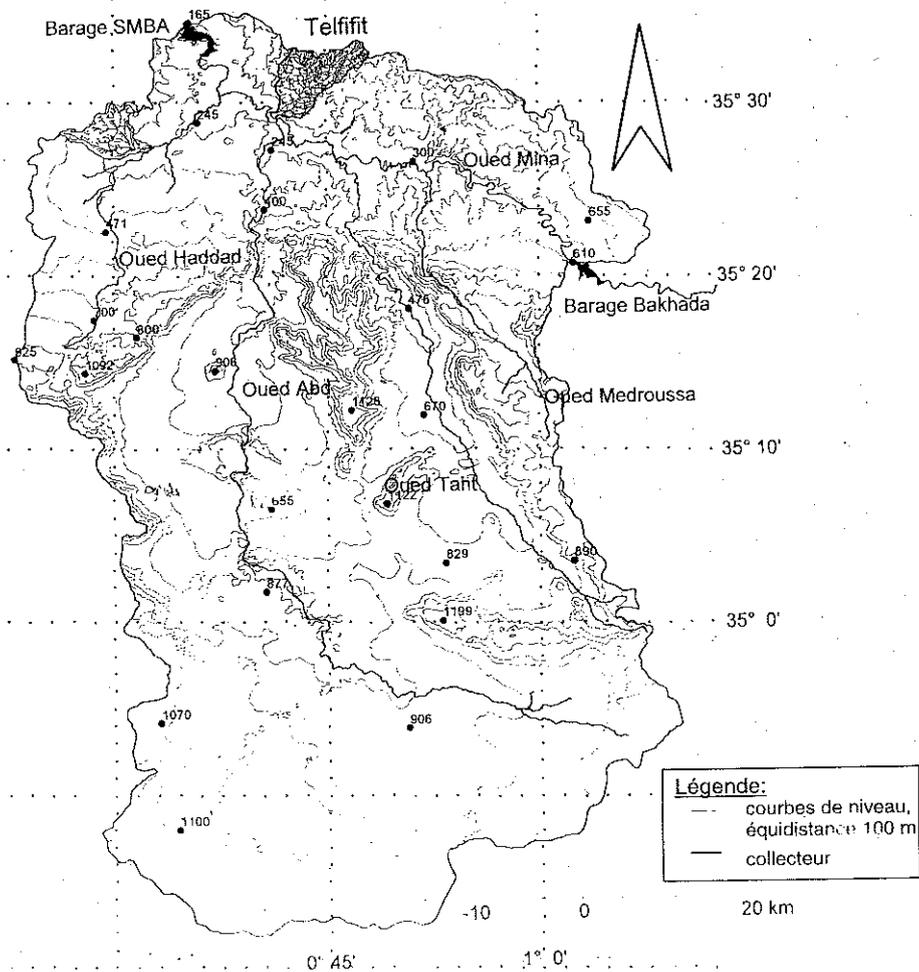


Fig. 2.3 Situation du secteur-pilote Telfifit

### Le bassin-versant de l'Oued Mina

L'Oued Medroussa, appelé aussi Oued Yassel, draine la partie orientale du bassin-versant, jouxtant le cours supérieur de l'Oued Mina. C'est une zone restreinte, mais pluvieuse, atteignant plus de 1 000 m d'altitude. Le Taht draine le sud-est du bassin-versant. Il a sa source dans les montagnes de Frenda qui dépassent les 1 000 m d'altitude. Il est jaugé à la station Kef Mahboula après 46 km de cours avec une pente longitudinale moyenne de 6,2‰.

L'Oued Abd, l'affluent principal, résulte de la confluence des oueds Chiba et Dez. Le Chiba à son tour est formé par l'Oued Tounkina et l'Oued Sidi Yahia. Le premier a sa source dans la région d'Ain Kermes entre 1 100 et 1 150 m d'altitude; celle de l'Oued Dez se trouve à 1 100 m. Ce dernier traverse les Monts de Saïda du Sud-Est au Nord-Ouest avec une pente moyenne de 3 ‰ au Nord de la station de Takhemaret. La longueur totale de son cours est de 58 km.

L'Oued Haddad, le dernier affluent, roule les eaux des rivières Baloul, Rekada et Medjaref. Il a sa source dans le Djebel Bazita à environ 1 000 m d'altitude. Il draine le Nord-Ouest du bassin; on le jauge à la station de Sidi Abdelkader Djilali. Les 41 km de cours ont une pente moyenne de 8,9‰.

La zone d'étude se trouve dans la partie septentrionale du bassin-versant de l'Oued Mina (fig. 2.3). Six petits bassins-versants, appelés désormais 'micro-bassins' (MB1 à MB6), drainant vers l'Oued Telfifit ont servi pour déterminer l'écoulement et l'exportation de sédiments en suspension. Le Telfifit draine une surface d'environ 44 km<sup>2</sup>, sa pente moyenne est de 3,4%. La taille des micro-bassins varie entre 0,22 et 0,77 km<sup>2</sup> et la pente moyenne des collecteurs principaux entre 9,9 et 19%. Le point culminant est le Mont Taassalet à 749 m. La confluence avec l'Oued Mina se situe à environ 14 km de l'extrémité amont du lac de barrage de Sidi Mohamed Ben Aouda.

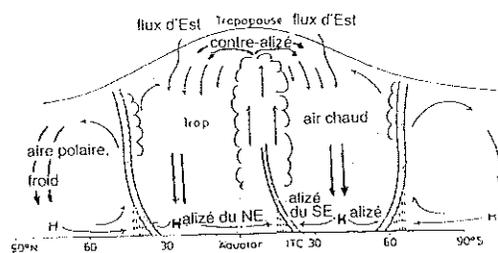
## 2.4. Les conditions climatiques

### 2.4.1. Précipitations et climat

Le terme 'précipitations' englobe tous les processus par lesquels l'eau arrive à la surface du globe, essentiellement sous forme de pluie, de neige ou de grêle. En simplifiant, les précipitations résultent de la condensation de l'humidité de l'air par refroidissement suite à son ascension dans l'atmosphère ce qui, selon CHOW (1988) se fait selon trois mécanismes principaux :

- ascension frontale - un front froid s'insère sous une masse d'air chaud ou une masse d'air chaud s'élève en glissant sur une masse d'air froid: précipitations advectives;*
- ascension orographique - ascension des masses d'air traversant une chaîne de montagnes: précipitations orographiques;*
- ascension convective - ascension locale d'une poche d'air chaud (orage): précipitations convectives.*

Circulation hivernale



Front H  
ITC = convergence intertropicale

circulation estivale

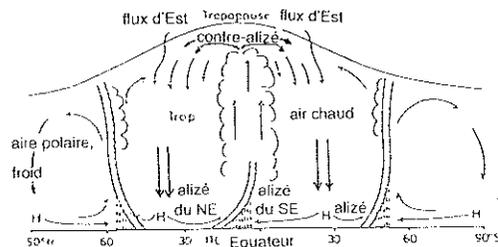


Fig. 2.4. Schéma de la circulation des masses d'air d'après GIESSNER (1984) (modifié)

Les précipitations sont sujettes à de fortes variations selon la circulation des masses d'air et les facteurs locaux. Elles sont donc en général plus élevées près des côtes qu'à l'intérieur, car c'est pour l'essentiel la mer qui charge l'atmosphère d'humidité. Le taux de décroissance vers l'intérieur dépend de la direction dominante des vents et de l'orographie, ce qui vaut surtout pour les moyennes pluri-annuelles, alors que la convection domine souvent pour les fortes averses de courte durée. Selon l'Association allemande pour la

## Les conditions climatiques

gestion des Eaux et l'Aménagement agricole (DVWK 1985) les précipitations sont à prédominance convectives quand elles ont une durée inférieure à 1,5 à 3 heures, et advective au-delà. Les valeurs pour l'Algérie ne sont pas disponibles.

Le climat du Tell oranais se caractérise par des étés chauds et secs peu orageux et des hivers doux et humides et peut être appelé méditerranéen semi-aride (TROLL *et al.* 1964). Le semestre d'hiver est dominé en Afrique du Nord par les masses d'air polaires, car le déplacement de la convergence intertropicale 'CIT' vers le Sud entraîne celui des courants de circulation voisins (fig. 2.4). Les zones de basse pression (zones cycloniques) polaires circulant d'Ouest en Est rencontrent des masses d'air tropicales plus humides et engendrent ainsi des précipitations advectives de longue durée. Mais la fréquence et l'extension de ces zones cycloniques sont très variables. A l'approche de l'été la CIT, suivant le cours du soleil, migre vers le Nord et est atteinte par les zones de hautes pressions subtropicales, générant des étés chauds et secs avec de rares précipitations orageuses convectives. Les valeurs mensuelles pluri-annuelles de précipitation illustrent cette alternance entre mois d'été et d'hiver.

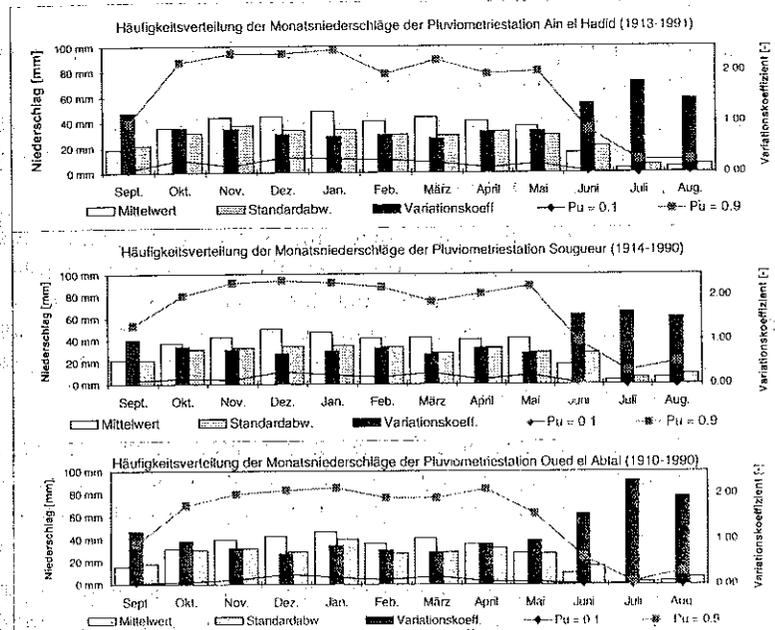


Fig. 2.5. Variation des précipitations mensuelles aux stations Ain el Hadid, Sougueur et Oued el Abtal

Les stations Aïn el Hadid, Sougeur et Oued el Abtal, qui disposent des relevés les plus longs et les plus complets, donnent pour les mois d'été une très forte variance et des valeurs moyennes très faibles (fig. 2.5). En hiver les précipitations moyennes sont nettement supérieures et présentent une moindre variance, qui reste néanmoins très élevée, comme le montre aussi la considération de la probabilité empirique de sous-dépassement aux seuils de 10 et 90 %.

Les précipitations dans le bassin-versant de l'Oued Mina sont dues à des perturbations généralement de Nord et Nord-Ouest (MEDDI 1992). Les averses pluvieuses dépendent aussi de l'altitude, de la latitude et de l'exposition. D'après les précipitations annuelles on peut distinguer quatre zones (cf. fig. 2.8):

- une zone arrosée à hauts sommets s'étend de Nord-Est et d'Est vers l'Ouest le long des reliefs; les précipitations moyennes annuelles se tiennent vers 425 mm à 500 mm, ponctuellement plus;
- une zone entre 350 mm et 425 mm se trouve à l'extrême Nord-Ouest. Elle couvre la moitié environ de la zone des marnes tertiaires délimitée fig. 2.2;
- une zone à très faibles précipitations couvre la partie méridionale, avec des valeurs avoisinant 250 mm;
- une zone intérieure au centre du bassin-versant est formée par les fonds de vallées de l'Oued Abd et de l'Oued Tahit. Les valeurs y varient de 375 mm à 425 mm.

Les variations du macroclimat sont déterminées par la répartition des précipitations (KOURI 1993), les différences thermiques étant faibles. L'exposition est le facteur dominant pour les topoclimats. HANSMANN (1994) a estimé le bilan hydrique en fonction de l'exposition et des pentes pour l'Oued Mina. Il est 4 à 5 fois plus favorable en exposition Nord en pente forte qu'en exposition Sud.

Il semble que depuis la décennie 70 les précipitations annuelles aient nettement diminué en Algérie (fig. 2.6). La station Oued el Abtal a enregistré en 1990 un déficit de 49% par rapport à la moyenne interannuelle (1910-1992).

GUEDJAL *et al.* (1993) montrent au moyen de tests statistiques appliqués à 9 longues séries annuelles de toute l'Algérie que l'Algérie du Nord a connu des périodes pluriannuelles caractérisées par des déficits et des excédents de précipitations non seulement depuis le milieu de la décennie 70, mais

aussi au siècle dernier et dans la première moitié du siècle présent (cf. fig. 2.9).

Totaux pluviométriques annuels 9/10 - 8/90 (lacune 1963)  
Oued el Abtal C013305

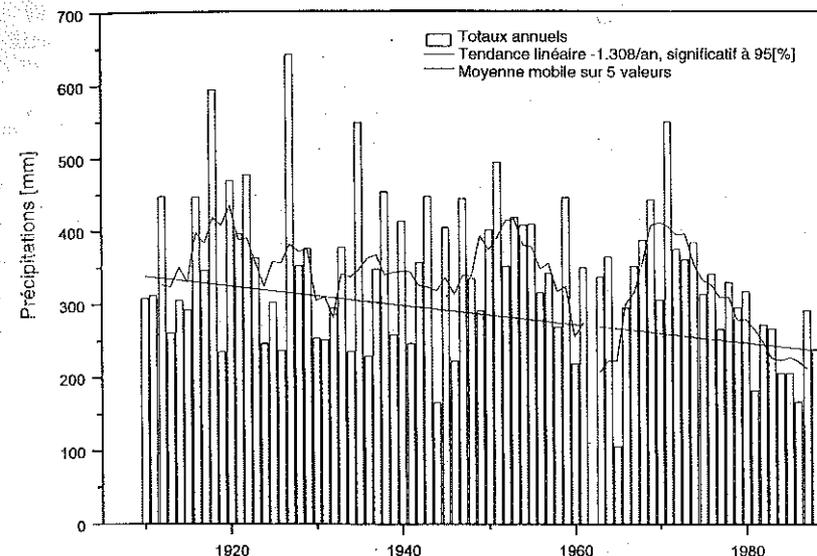


Fig. 2.6 Totaux pluviométriques annuels 1910-1990 (lacune 1963), Oued el Abtal

La comparaison des valeurs données par CHAUMONT *et al.* (1971) pour la période 1913-1963 avec celles de l'ANRH pour les périodes 1922-1960 et 1969-1989 donne des valeurs inférieures de 10% pour ces dernières.

Par contre, l'écart est moindre si on compare les valeurs stationnelles moyennes données par GAUSSEN *et al.* (1953) (fig. 2.7) et par l'ANRH (1953) pour le bassin de l'Oued Mina. On a renoncé à reproduire les isohyètes annuelles de l'ANRH, car l'équidistance de 100 mm est insuffisante pour une étude détaillée, mais on a produit une carte originale des précipitations moyennes annuelles. Dans ce but ont été utilisées tant les régressions entre paramètres géographiques et les précipitations moyennes annuelles que les valeurs stationnelles de l'ANRH pour un procédé de zonation par la méthode dite 'External-Drift-Kriging' selon AHMED *et al.* (1987; in BARDOSSY 1994). Les isohyètes de GAUSSEN *et al.* (1953) et les nôtres de la fig. 2.8 se ressemblent géométriquement, mais GAUSSEN *et al.* semblent avoir surestimé le rôle de l'altitude.

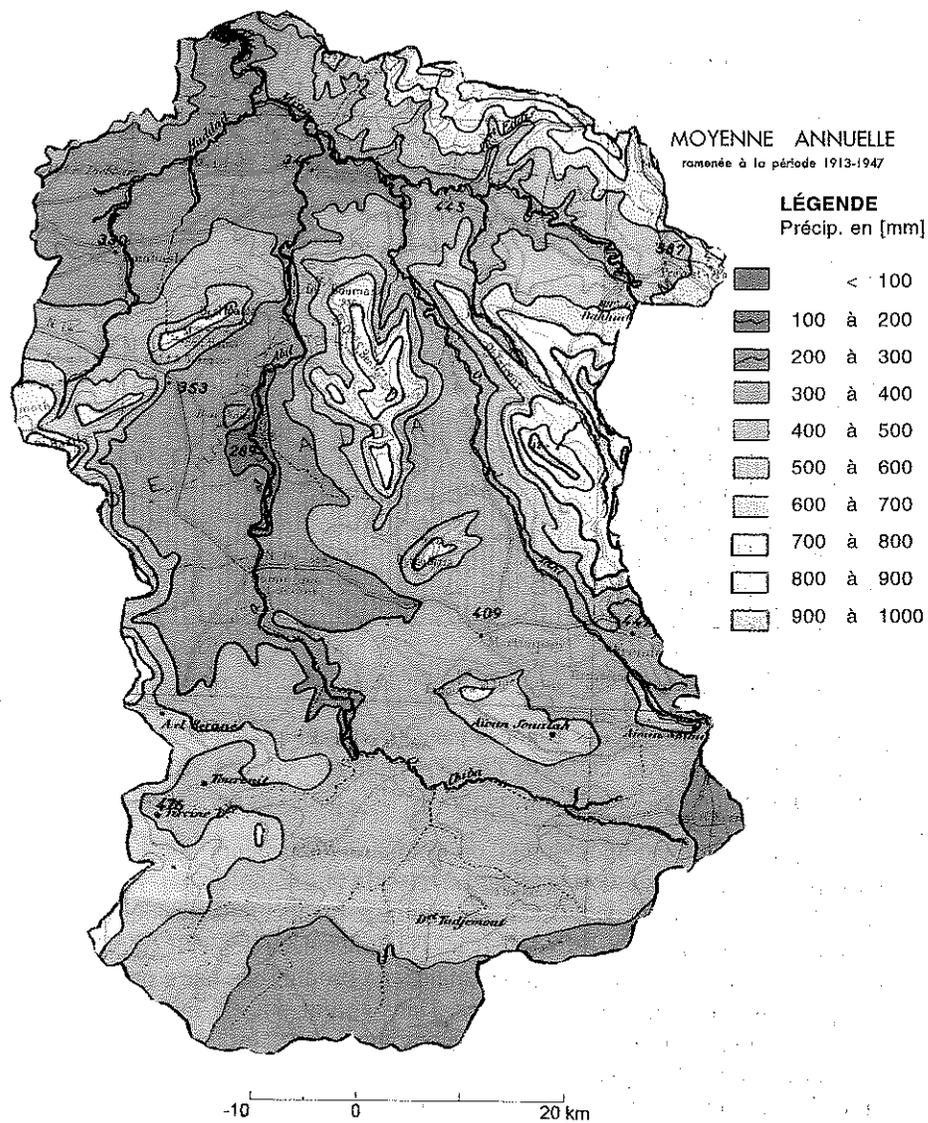


Fig. 2.7 Précipitations annuelles moyennes 1913-1947, (GAUSSEN et al. 1953)

Mittlere Jahresniederschläge der Zeitreihe  
(1922-1960 + 1969-1989)  
(Datengrundlage: ANRH 1993)

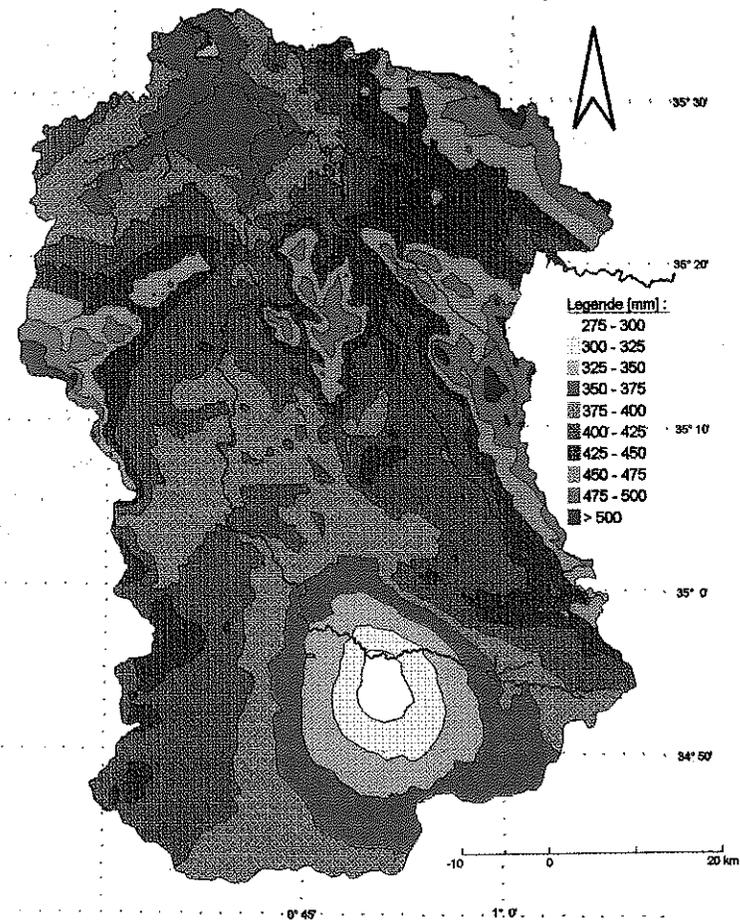


Fig. 2.8 Précipitations moyennes annuelles 1922-1960 + 1969-1989 (données ANRH 1993)

## Précipitations annuelles à Alger Port, 1844-1992

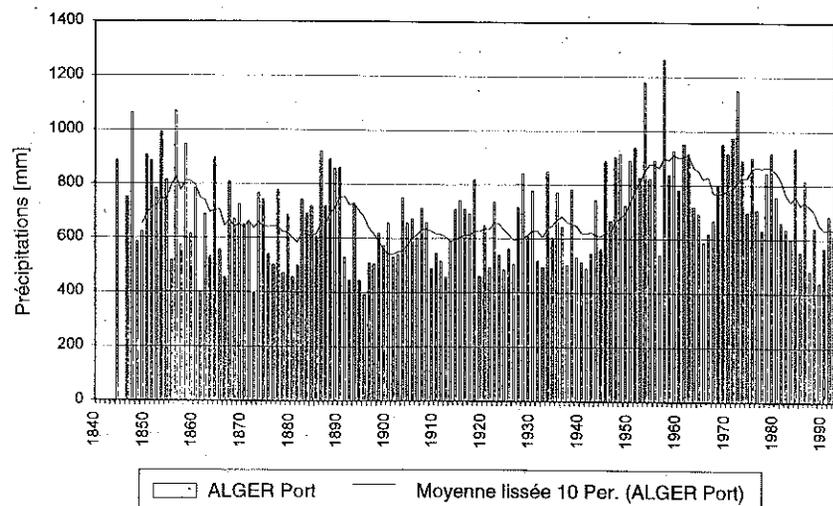


Fig. 2.9. Précipitations annuelles à Alger Port, 1844-1992

En résumé, les précipitations des deux dernières décennies sont faibles. On ne peut dire s'il s'agit là de variations naturelles ou d'une tendance de longue durée dans la mesure où l'on ne dispose que de séries peu nombreuses et lacunaires.

## 2.4.2. Exploitation des données journalières de précipitations

L'ANRH exploite environ 65 pluviomètres à relevé journalier dans le bassin-versant de l'Oued Mina, dont toutefois beaucoup n'ont été en fonction que quelques années. C'est pourquoi seules 36 d'entre elles se prêtent à l'exploitation des extrêmes journaliers. La carte fig. 2.10 donne leur implantation, en distinguant les stations équipées de pluviographes.

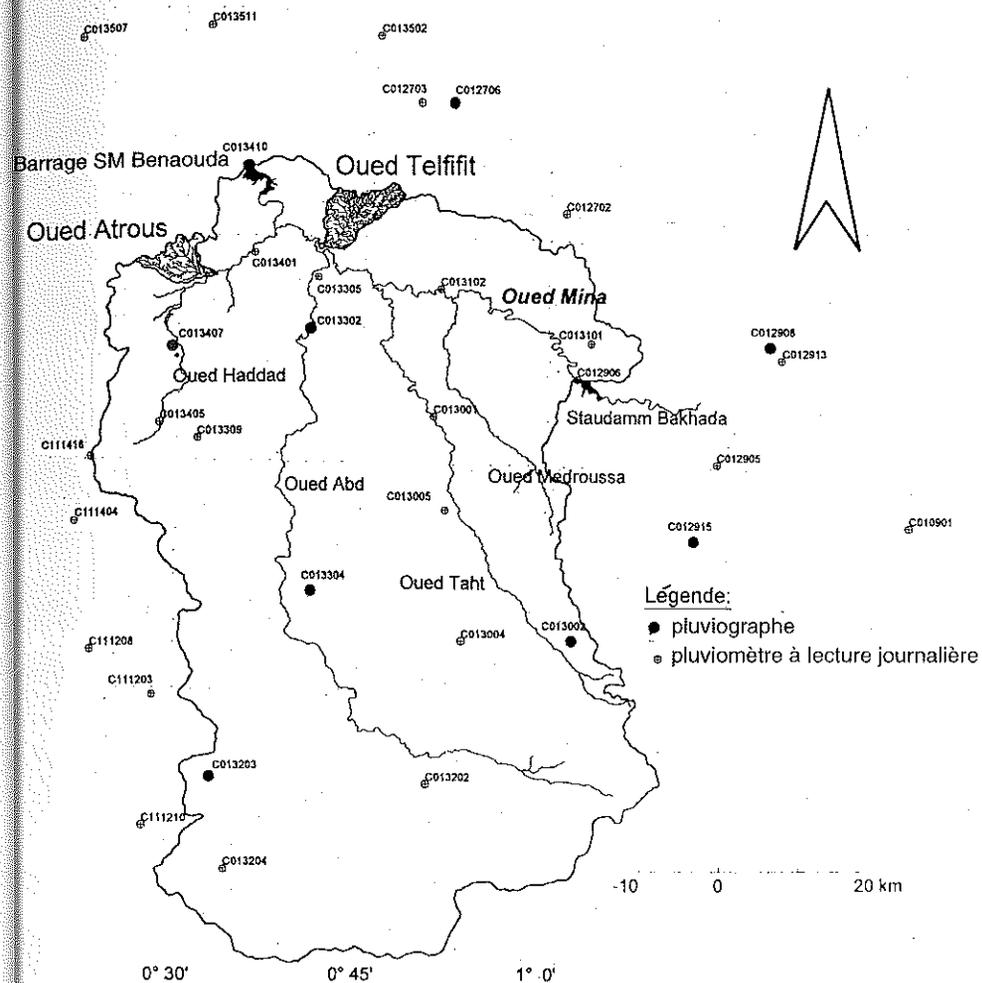


Fig. 2.10 Situation des stations pluviométriques (selon tabl. 2.2.. p.28)

Celles-ci sont toutes exploitées par des observateurs, la lecture se faisant à 8.00 heure locale (cf. BELZ 1992). L'expérience montre que la qualité des lectures est bonne, seules la transmission et l'exploitation des données posent problème, car souvent différées et lentes. Toutes les séries présentent des lacunes. La densité des données est particulièrement faible pour le début du siècle et pour la phase 'chaude' de la guerre d'indépendance, comme le montre la fig. 2.11, qui donne l'évolution du pourcentage de stations par rapport au total pris en compte.

Indice de densité des données pluviométriques

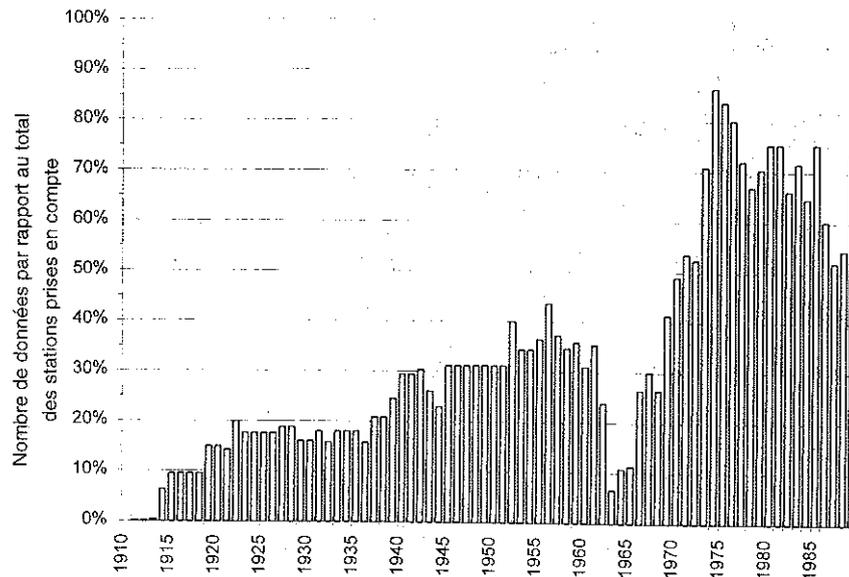


Fig. 2.11 Indice de densité des données pluviométriques

N'ont pas été mis en évidence des déplacements de sites, p.ex. avant et après la guerre d'indépendance, ce qui garantit l'homogénéité nécessaire pour l'exploitation statistique (DVWK 1991, PLATE 1993). On n'a pas essayé de compléter les lacunes au moyen des données de stations voisines, car les corrélations sont faibles (cf. THEISEN 1980); en outre le procédé est peu compatible avec l'exigence d'homogénéité des données.

C'est pourquoi on a d'abord choisi comme stations de référence celles comportant les séries les plus longues et les moins lacunaires et on a ajusté

leurs hauteurs journalières extrêmes à la distribution gamma biparamétrique logarithmée, appelée par la suite distribution gamma. Cet ajustement de la fonction de distribution aux données de base logarithmiques a été effectué au moyen des logiciels d'hydrologie de l'Institut d'Hydrologie et de Gestion des Eaux (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft) de l'Université de Karlsruhe (IHW). D'après l'hypothèse de base, usuelle en hydrologie, de la stationnarité des séries temporelles (DVWK 1991, PLATE 1993) (c'est-à-dire que les valeurs moyennes de l'ensemble de la série, p.ex. la moyenne et la variance, sont égales à tout moment), les séries très lacunaires d'une durée d'au moins une vingtaine d'années ont pu être également exploitées par comparaison des paramètres statistiques avec les stations de référence, et pour la durée de celles-ci. La plus importante de celles-ci est Oued el Abtal. Voici la méthodologie :

1. choix des stations de référence caractérisées par les critères suivants: série longue, peu lacunaire, homogène (tabl. 2.1);

station	X-Lambert [km]	Y-Lambert [km]	altitude [mNG]	période	nombre		moyenne $\mu$	écart-type $\sigma$
					d'années	de lacunes		
Oued el Abtal 'C013305'	317,350	241,450	245	9/09 - 8/89	80	1	3,505	0,332
Sougueur 'C010901'	390,550	210,750	1120	9/14 - 8/91	75	5	3,444	0,406
Ain el Hadid 'C013004'	335,000	197,000	829	9/13 - 8/91	76	8	3,435	0,414
Zemmora 'C013502'	325,150	270,750	320	9/14 - 8/76	62	0	3,691	0,349
Relizane 'C013511'	304,300	272,300	75	9/17 - 8/76	59	1	3,377	0,513

Tab. 2.1 Caractéristiques des stations pluviométriques de référence: valeurs statistiques à partir de données logarithmiques

2. traitement statistique des valeurs des extrêmes annuels des hauteurs journalières et détermination des paramètres statistiques caractéristiques: la moyenne  $\mu$  et l'écart-type  $\sigma$  de la fonction log-gamma de la série. Ce sont les séries de type (I);
3. détermination des périodes d'observation communes aux autres stations ayant au moins 20 ans d'observation et aux stations de référence, en l'occurrence Oued el Abtal (O.E. Abtal) et Hillil (fig. 2.12);

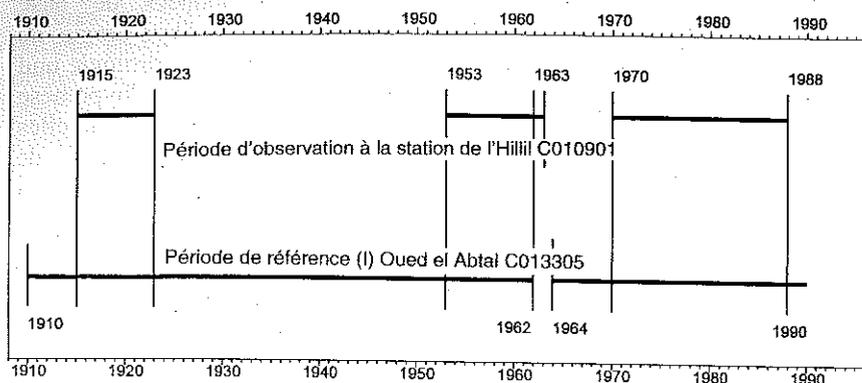


Fig. 2.12. Détermination des périodes communes à 2 stations

4. génération d'une série temporelle synthétique (type II) pour la période d'observation commune d'après toute combinaison possible des stations de référence avec les autres (fig. 2.13);

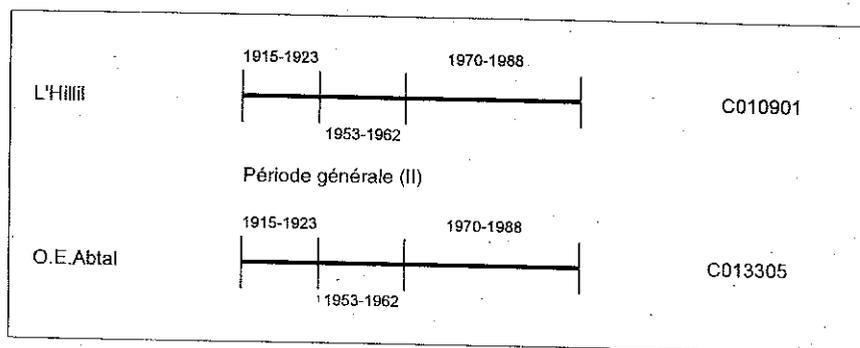


Fig. 2.13. Génération d'une période continue synthétique

5. traitement statistique des extrêmes journaliers pour chacune des combinaisons définies en 4. pour les valeurs de la série respective de type (II);

6. étant supposé la stationnarité des séries, on a pour les paramètres statistiques :

$$\begin{aligned} \frac{\mu_{\text{Réferenz (I)}}}{\mu_{\text{Réferenz (II)}}} &= \frac{\mu_{\text{Nicht-Réferenz (I)}}}{\mu_{\text{Nicht-Réferenz (II)}}} \\ \frac{\sigma_{\text{Réferenz (I)}}}{\sigma_{\text{Réferenz (II)}}} &= \frac{\sigma_{\text{Nicht-Réferenz (I)}}}{\sigma_{\text{Nicht-Réferenz (II)}}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

7. détermination des paramètres  $\mu_1$  et  $\sigma_1$  par la formule 2.1 pour chaque station qui n'est pas de référence ('non-référence') et établissement des extrêmes journaliers de périodes de retour choisies T au moyen des quantiles tabellisés de la distribution log-gamma standardisée.

Le couplage des stations non de référence avec celles de référence est guidé par le nombre d'années d'observation communes et le minimum de lacunes dans la série de référence pour ces années.

Les résultats de l'analyse des valeurs extrêmes sont donnés dans le tabl. 2.2.

Station	Code	$\mu(t)$	$\sigma(t)$	Hauteurs extrêmes par période de retour						
				2a	3a	5a	10a	20a	25a	50a
Oued el Abtal	OE C013305	3.505	0.332	33.1	38.3	43.9	51.1	57.9	60.1	66.9
Sougueur	SO C010901	3.444	0.406	31.1	37.1	44.0	53.0	61.9	64.8	74.0
Ain el Hadid	AE C013004	3.435	0.414	30.8	36.9	43.8	53.0	62.2	65.1	74.5
Zemmora	ZM C013502	3.691	0.349	39.9	46.4	53.7	62.9	71.9	74.7	83.6
Relizane	RE C013511	3.377	0.513	28.9	36.2	44.9	56.9	69.5	73.8	87.5
Ain Balloul	AB C111203	3.542	0.301	34.4	39.2	44.5	51.0	57.1	59.1	65.0
Ain Guerguor	AG C013309	3.726	0.443	41.1	49.9	60.1	73.6	87.3	91.8	106.1
Ain Hamara	AH C013302	3.347	0.277	28.3	31.9	35.8	40.6	45.1	46.5	50.8
Aouf	AO C111404	3.861	0.482	47.0	58.1	71.0	88.6	106.7	112.7	131.9
Bakhada	BA C012906	3.301	0.383	26.9	31.8	37.3	44.5	51.6	53.8	61.0
Djillali Ben Amar	DB C013102	3.540	0.444	34.2	41.5	49.9	61.2	72.7	76.4	88.4
El Hachem	EH C013407	3.307	0.371	27.1	31.9	37.2	44.1	50.9	53.1	59.9
El Matmar	EM C013506	3.338	0.351	28.0	32.7	37.8	44.4	50.7	52.8	59.1
Frenda	FR C013002	3.573	0.316	35.5	40.7	46.4	53.6	60.4	62.5	69.2
Kenenda Ferme	KF C012703	3.577	0.532	35.3	44.6	55.7	71.3	87.7	93.2	111.2
Kef Mahboula	KM C013001	3.468	0.380	31.8	37.6	44.0	52.4	60.6	63.2	71.5
L'Hillil	LH C013507	3.455	0.437	31.4	38.0	45.6	55.8	66.0	69.4	80.0
Louhou Parat	LO C012915	3.565	0.521	34.9	43.9	54.6	69.4	85.0	90.3	107.3
Mendes	ME C012706	3.629	0.326	37.5	43.3	49.5	57.4	64.9	67.3	74.7
M'Haoudia	MH C013005	3.254	0.280	23.8	31.8	42.0	57.4	74.7	80.8	101.2
Medr. Louhou	ML C012904	3.511	0.446	33.2	40.3	48.6	59.6	70.8	74.5	86.2
Mechraa Saafa	MS C013101	3.640	0.369	37.9	44.5	51.9	61.4	70.7	73.7	83.0
Mellakou	MU C012905	3.674	0.356	39.2	45.8	53.1	62.4	71.5	74.4	83.4
Nesmoth	NE C111418	3.672	0.395	39.1	46.4	54.7	65.5	76.2	79.7	90.5
Rahouia	RA C012702	3.582	0.379	35.7	42.1	49.3	58.7	67.8	70.8	80.0
Rosfa	RO C013202	2.951	0.540	33.3	24.1	31.4	42.1	54.0	58.1	71.9
SAEK Djillati	SA C013401	3.340	0.323	26.2	31.2	36.7	44.0	51.2	53.5	60.8
Saline Oued Djemaa	SD C013504	3.360	0.407	28.5	34.1	40.4	48.7	57.0	59.7	68.1
SM Benaouda	SM C013410	3.340	0.304	27.5	31.3	35.3	40.4	45.1	46.6	51.2
Sidi Mousoud	SN C111208	3.511	0.324	33.3	38.4	43.9	50.9	57.5	59.6	66.2
Sidi Youssef	SY C013204	3.236	0.490	22.0	29.2	38.4	52.1	67.5	72.9	90.9
Tamesna	TA C111210	3.400	0.385	30.1	37.2	45.6	57.0	68.9	72.8	85.5
Tiaret DRS	TD C012913	3.733	0.310	41.6	47.7	54.2	62.3	70.1	72.5	80.0
Tiaret GRHA	TT C012908	3.875	0.419	47.8	57.5	68.4	82.8	97.2	101.9	116.7
Tiaret Gesamt	TG C099999	3.787	0.358	28.9	35.6	43.4	54.0	64.9	68.5	80.1
Tircine	TI C013203	3.410	0.393	30.0	35.7	42.0	50.3	58.5	61.1	69.4
Takhamaret DH 1	TK C013304	3.405	0.372	43.9	51.3	59.5	70.0	80.2	83.5	93.7
Zelamata	ZA C013405	3.468	0.556	31.6	40.4	51.0	66.0	82.0	87.5	105.3

Tab. 2.2. Extrêmes journaliers dans le bassin-versant de l'Oued Mina. période (t): 1910-1990

En vue de la zonation des extrêmes journaliers, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a d'abord étudié leur liaison avec les paramètres géographiques. Les travaux de MEDDI (1992) laissent supposer que pour les précipitations mensuelles, outre la latitude (Lambert-Y), la longitude (Lambert-X) et l'altitude, la situation orographique exprimée par la tangente orographique selon LABORDE (1982), joue un rôle important.

C'est pourquoi on a utilisé les composantes suivantes :

- hauteur des précipitations de la station (en [mm])
- latitude (Lambert-Y en [km])
- longitude (Lambert-X en [km])
- altitude (en [mNG])
- grandeurs caractéristiques orographiques selon Laborde (1982) (TGtotalc, TGNord, TGEst, TGOuest, TGNord-Ouest, TGNord-Est).

Il est intéressant que l'ACP (fig. 2.14) montre, après standardisation des différentes composantes, une liaison forte avec toutes les composantes orographiques et (fig. 2.15) que 4 facteurs expliquent environ 70% de la variance totale. Seul le 2ème facteur n'était pas structuré par l'orographie, mais par la latitude et l'altitude.

Au contraire, l'analyse physique montre qu'une régression multiple des

#### Analyse en composantes principales

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TGN	0.901	0.028	0.34	0.159	-0.06	0.178	0.066	0.073	-0.01	-0.02
TGNO	0.746	0.069	-0.436	0.058	-0.064	0.037	0.423	-0.243	0.001	0.04
YLAMBERT	-0.048	0.975	-0.008	0.068	0.144	-0.009	-0.029	0.008	0.145	0.001
ALT	-0.134	-0.911	-0.063	0.12	0.26	-0.019	-0.171	0.021	0.19	0
TGNW	0.102	0.046	0.977	0.024	-0.114	0.102	0.092	0.024	-0.003	0.001
XLAMBERT	-0.138	-0.023	0.027	0.965	-0.005	-0.163	-0.146	0.005	0.005	0
D24HT50	-0.06	-0.041	-0.097	-0.007	0.99	0.055	-0.051	0.002	0.007	0
TG TOTAL	0.082	-0.009	0.194	-0.174	0.068	0.941	0.184	0.043	-0.001	0.001
TGO	0.378	0.031	-0.374	-0.057	0.004	0.632	0.408	-0.384	-0.005	-0.007
TGW	0.201	0.107	0.131	-0.2	-0.07	0.3	0.941	-0.017	-0.008	-0.002

Pourcentage de la variance totale, expliqué par les composantes

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pourcentage cumulé de la variance totale	16.12	18.03	14.69	10.54	10.99	14.48	12.42	11.11	0.58	0.02
Pourcentage cumulé de la variance totale	16.12	34.15	48.83	59.37	70.36	84.84	97.25	99.41	99.98	100.00

Fig. 2.14. Résultats de l'analyse en composantes principales des extrêmes journaliers et paramètres géographiques

## Analyse factorielle

	1	2	3	4
TGNO	0.995	-0.088	0.047	0.012
TGO	0.741	0.005	-0.103	0.6
TGN	0.519	0.037	0.699	0.011
ALT	-0.122	0.963	-0.198	-0.138
YLAMBERT	-0.027	-0.765	-0.003	-0.02
TGNW	-0.341	-0.002	0.915	0.218
TGTOTAL	0.127	0.089	0.196	0.783
TGW	0.379	-0.144	0.236	0.623
XLAMBERT	0.116	0.078	0.196	-0.529
D24HT50	-0.05	0.131	-0.243	0.042

Pourcentage de la variance totale, expliqué

1	2	3	4
21.16	15.74	15.68	17.11

Pourcentage cumulé de la variance totale

1	2	3	4
21.16	36.89	52.57	69.68

Fig. 2.15. Résultats de l'analyse factorielle des maximums journaliers et paramètres géographiques

hauteurs journalières avec les paramètres géographiques prenant en compte l'orographie (fig. 2.16) réalise une plus faible amélioration de l'ajustement aux valeurs stationnelles que sans paramètres orographiques (fig. 2.17). Cela pourrait s'expliquer par le fait que les caractères orographiques dominant certes dans l'ACP par suite de leur variance élevée, alors que les facteurs géodésiques sont beaucoup plus homogènes. Mais la grande dispersion de leur donner une interprétation physiquenette.

Model fitting results for		MULTIPLE.D_1JOUR_T_10a		
Independent variable	coefficient	std.error	sig.level	
Longitude (x Lambert en [km])	-0,186288	0,068421	0,0124	
Latitude (y Lambert en [km])	0,391871	0,081655	0,0001	
Altitude (en [mNG])	0,044651	0,008480	0,0000	
Grandeur orographique selon LABORDE (1988) TG <sub>N</sub>	280,727606	195,405550	0,1649	
Grandeur orographique selon LABORDE (1988) TG <sub>NW</sub>	-87,742886	123,686946	0,4855	
Coefficient de corrélation de Pearson	0,980200			
Erreur standard	8,140687			

Fig. 2.16 Régression des maximums journaliers et grandeurs géographiques y compris orographiques

Pour établir la carte des isohyètes des extrêmes journaliers les caractères géographiques ont été combinés selon la régression multiple respective et inclus dans un krieageage du type 'external drift' (AHMED *et al.* 1987, BARDOSSY 1994) comme estimation externe.

Model fitting results for		MULTIPLE.D_1JOUR_T_10a		
Independent variable	coefficient	std.error	sig.level	
Longitude (x Lambert en [km])	-0,146548	0,061192	0,0248	
Latitude (y Lambert en [km])	0,344571	0,072706	0,0001	
Altitude (en [mNG])	0,039886	0,007470	0,0000	
Coefficient de corrélation de Pearson	0,980100			
Erreur standard	8,154378			

Fig. 2.17 Régression des maximums journaliers avec grandeurs géographiques y compris orographiques

L'analyse des variogrammes des données du tabl. 2.2 a montré que les différences sont très faibles; on a donc travaillé uniformément avec le variogramme pour la période de retour de 2 ans.

Pour l'ensemble du bassin-versant, la distribution des hauteurs journalières extrêmes pour différentes périodes de retour a été déterminée par krieageage du type 'external drift' avec des mailles de raster de 1 km<sup>2</sup> et en utilisant le Système d'Information Géographique (SIG) SPANS (TYDAC 1992).

Les isohyètes des hauteurs journalières extrêmes (fig. 2.18 et 2.19) subdivisent le bassin de manière analogue aux moyennes annuelles (cf. fig. 2.7 et 2.8): au Nord-Est, les valeurs sont plus élevées alors que les plus faibles se trouvent au Sud. Remarquable est la zone la moins arrosée qui s'étend au Nord-Ouest jusqu'au réservoir de Sidi Mohammed Ben Aouda. Tant au Nord-Est qu'au Nord-Ouest elle est protégée des précipitations advectives par des alignements montagneux dépassant 600 m. (cf. fig. 2.2).

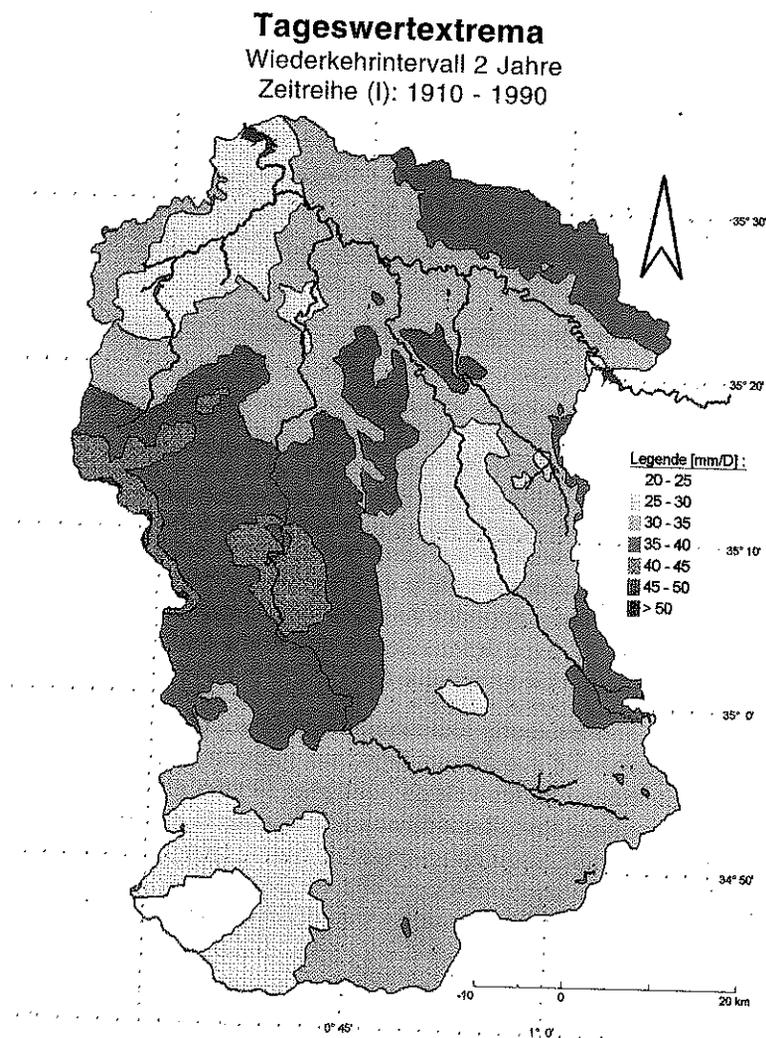


Fig. 2.18. Maximums journaliers (temps de retour 2 ans, période (I): 1910-1990)

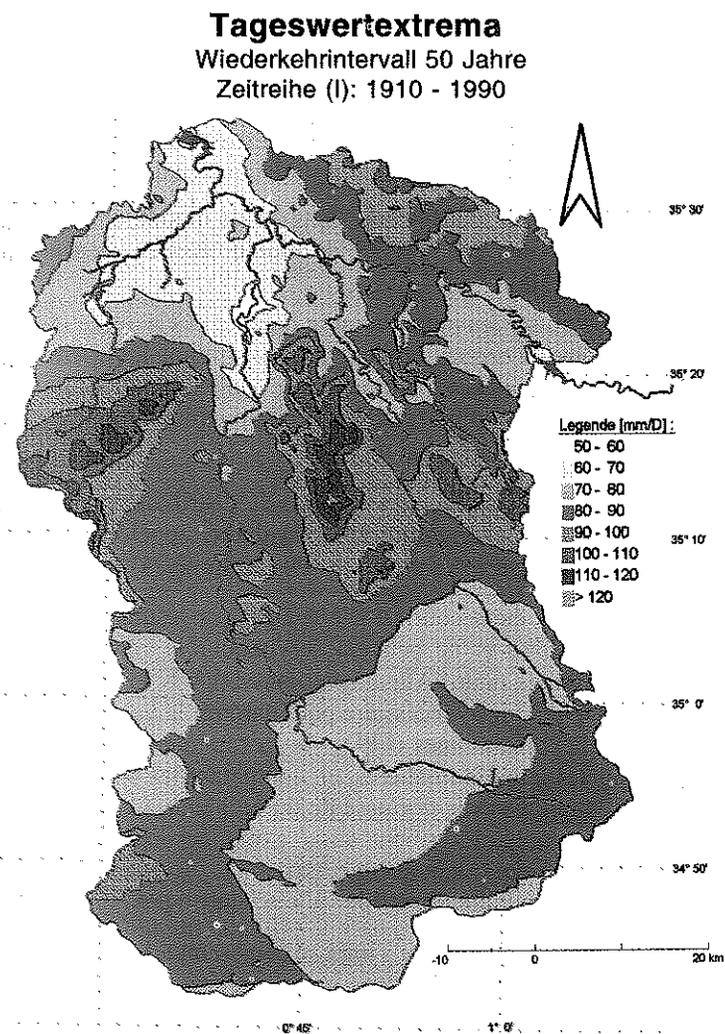


Fig. 2.19 Maximums journaliers (temps de retour 50 ans, période (I): 1910-1990)

### 2.4.3. Exploitation des données d'intensité des précipitations

Le bassin-versant de l'Oued Mina n'est couvert que par 9 pluviographes (cf. fig. 2.10), aux durées d'observation variables. Elles datent toutes de la première moitié des années 70; la série la plus longue est de 20 ans et la plus courte de 14 ans.

Le but de l'exploitation des pluviographes, appelée ici pluviographie, est la mise en évidence d'un rapport fonctionnel entre l'intervalle de retour  $T_n$ , la classe de durée  $D$  et la hauteur  $N_h$  des valeurs extrêmes. La DVWK (1985) recommande dans ce but une exploitation statistique en deux étapes:

- la première consiste à déterminer dans quelle mesure des hauteurs de précipitation pour une classe de durée donnée dépendent de l'intervalle de retour;
- la deuxième ajuste les rapports entre hauteur et classe de durée; des considérations physiques rendent cette opération indispensable car l'accroissement de la durée entraîne celle de la hauteur. Les opérations purement mathématiques de la première étape ne tiennent pas compte de cette information.

Il en résulte pour chaque station des courbes de distribution de la hauteur en fonction de l'intervalle de retour et de la durée, appelées par la suite diagramme-fréquence-durée des pluies (FPD) (cf. fig. 2.24).

Les séries de données étant courtes et inégales, ces résultats ne sont pas directement comparables et ne peuvent servir pour la zonation. De tels problèmes sont discutés pour l'Allemagne dans DVWK (1985), une série d'au moins 30 ans étant jugée nécessaire pour garantir la validité statistique de l'exploitation des diagrammes (FPD). On recommande de corriger les résultats pour les hauteurs journalières, en comparant les paramètres de la classe de durée 24 heures avec la classe de durée 1 jour. Ceci suppose que les stations pluviographiques soient aussi exploitées comme stations à relevé journalier et qu'il existe une série de données journalières suffisamment longue pour en garantir la validité statistique.

Par conséquent une troisième étape s'impose consistant à lier pluviographie et pluviométrie. On peut ainsi dans une quatrième étape rapporter les FPD des stations pluviographiques aux séries longues de type (I) des stations pluviométriques. Dans une cinquième étape on transfère les paramètres moyennés des pluviographes à toutes les stations pluviométriques et on contrôle la validité du procédé. La fig. 2.20 schématise la procédure.

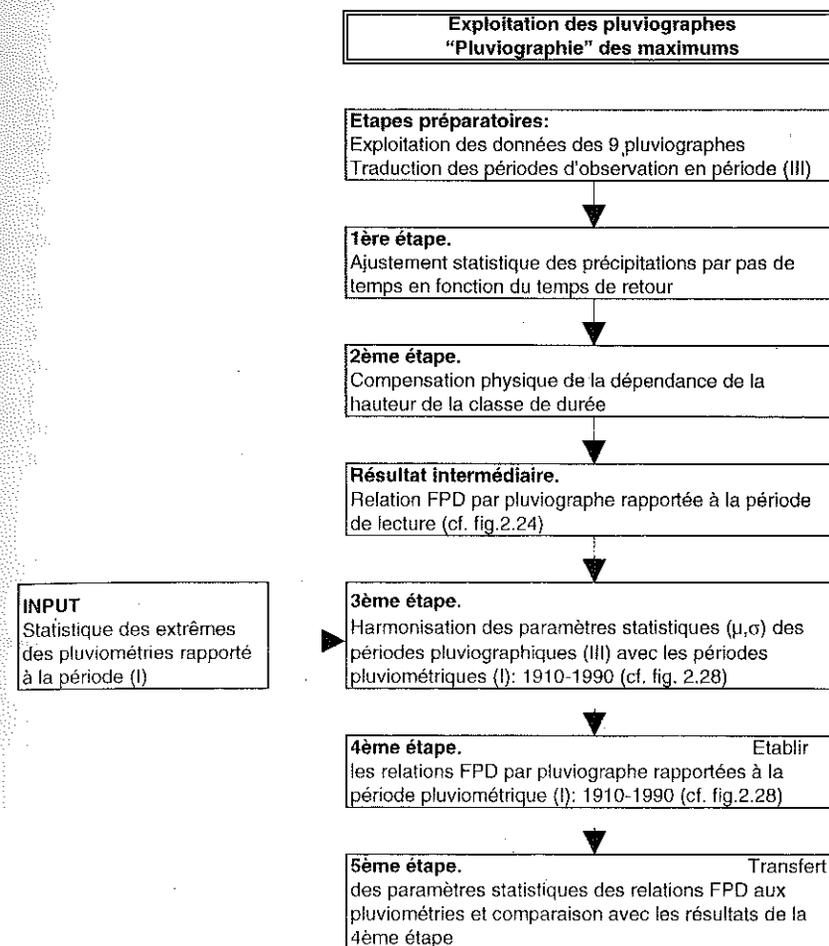


Fig. 2.20 Schéma du déroulement de la procédure pour établir les relations pluie-débit

Ne sont pas explicitées ici les étapes préliminaires à la préparation des données, y compris la numérisation, non indispensables pour comprendre la procédure.

### 1ère étape

On détermine pour chaque station les valeurs extrêmes annuelles pour diverses classes de durée. On choisit là aussi une distribution gamma biparamétrique logarithmique pour faciliter la comparaison avec les données journalières. La qualité de l'ajustement est vérifiée graphiquement. Cette opération est menée séparément pour chaque classe de durée et pour chaque station, qui sont représentées par des familles de courbes, l'axe des Y étant attribuée aux fractiles de chaque classe de durée et celui des X à l'intervalle de retour correspondant (fig. 2.21). Considérer chaque classe de durée indépendamment ne donne pas de résultats satisfaisants, car la procédure purement mathématique ne tient pas compte des conditions physiques. On pourrait ainsi attribuer, pour un intervalle de retour donné, à une classe de durée courte une hauteur supérieure qu'à une classe plus longue, ce qui est physiquement impossible. La fig. 2.21 représente la famille de courbes pour Frenda.

Relations FPD à Frenda, période (III) 1977-1991, sans compensation physique entre les classes de durée.

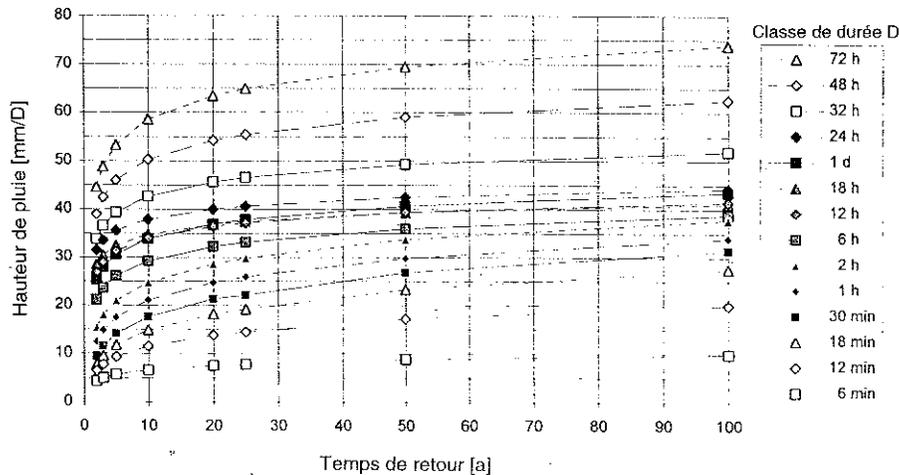


Fig. 2.21 Relations FPD à Frenda, période (III) 1977-1991, sans compensation physique entre les classes de durée.

### 2ème étape

La compensation, nécessaire pour des raisons physiques, entre les valeurs pour différentes classes de durée est réalisée en adaptant une fonction empirique aux deux paramètres (moyenne et écart-type des données de base logarithmiques) caractérisant la distribution log-gamma.

Pour chaque station la fonction de compensation pour les valeurs moyennes  $\mu_{III}$  se décrit par une droite, la classe de durée D étant portée en abscisse selon une échelle logarithmique, avec les paramètres correspondants  $m_1$  et  $m_2$ . On a :

$$\mu_{III}(D) = m_1 + m_2 * \log_{10} D \quad (2.2)$$

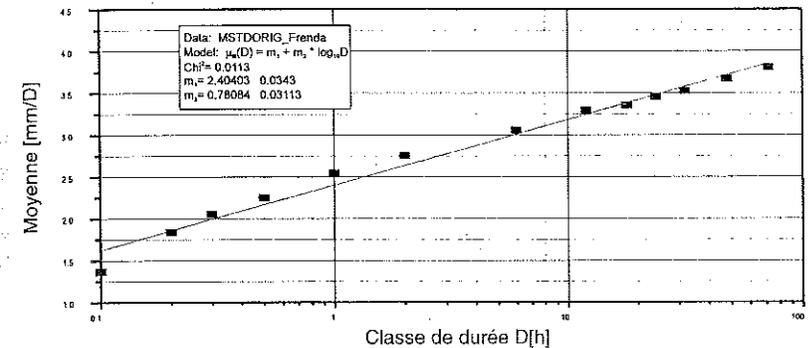


Fig. 2.22. Compensation des moyennes entre les classes de durée pour Frenda

Pour l'écart-type  $s_{III}$  un ajustement linéaire à la classe de durée D ne se justifiait pas. La DVWK recommande un ajustement linéaire par portées et une compensation a posteriori entre les portées. Dans le cas présent, on a travaillé avec une fonction exponentielle, ce qui diminue le temps de travail et le nombre de paramètres. On a :

$$\sigma_{III}(D) = s_1 + s_2 * e^{\frac{D}{s_3}} \quad (2.3)$$

La détermination des paramètres  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ,  $m_1$  et  $m_2$  se fait par la méthode des moindres carrés non linéaire au moyen du logiciel ORIGIN.

Les ajustements effectués pour les 9 stations montrent qu'avec les séries de  $\leq 20$  ans disponibles on arrive à une estimation stable de la valeur

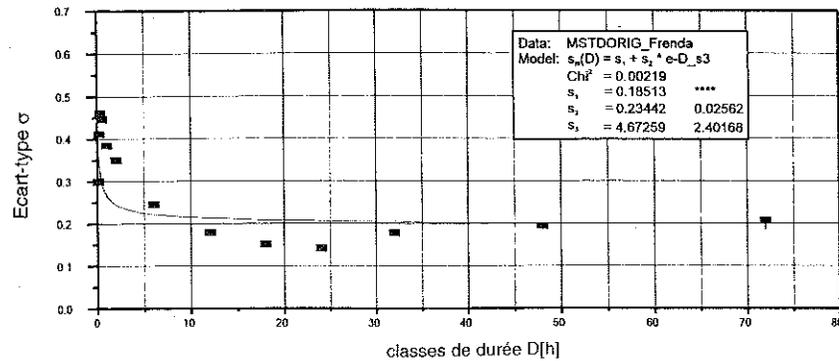


Fig. 2.23. Compensation des écarts-type entre les classes de durée pour Frenda

moyenne, mais qu'elle est un peu plus mauvaise pour écarts-type. Ce résultat intermédiaire est esquissé fig. 2.20.

En utilisant ces fonctions d'ajustement empiriques établies séparément pour chaque station, on peut procéder à la compensation entre les valeurs des différentes classes de durée. On peut aussi tirer des conclusions pour des classes de durée non explicitement prises en compte par le traitement statistique des valeurs extrêmes.

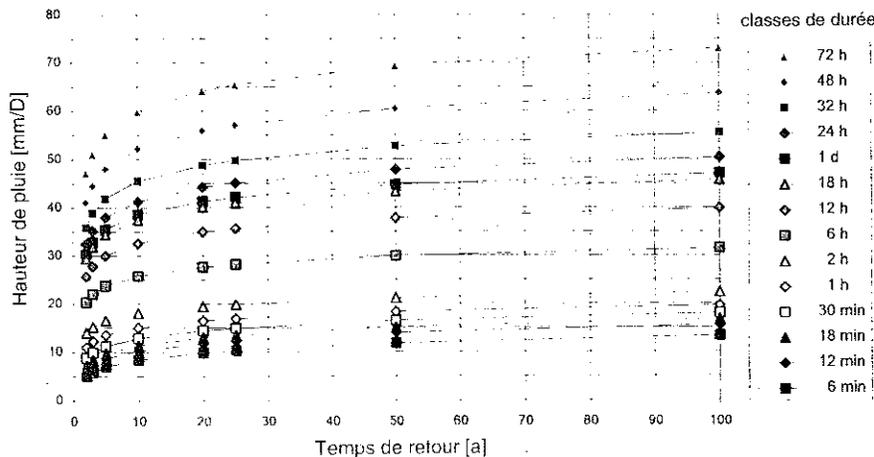


Fig. 2.24. Relations FPD à Frenda, période (III) 1977-1992, avec compensation physique entre les classes de durée

### 3ème étape

Par suite de la courte durée des séries, généralement inférieure à 20 ans, il fallait rechercher un moyen pour prendre en compte les informations des séries beaucoup plus longues de données journalières. Comme déjà dit dans la présentation de la procédure, le DVWK (1985, 1991) recommande pour l'exploitation stationnelle d'averses intenses et pour leur zonation d'égaliser les diagrammes FPD avec les informations journalières. Il propose de corriger les résultats des pluviographes en comparant les paramètres statistiques de la classe de durée 24 heures avec la classe 1 jour. Ceci peut se faire de manière linéaire, comme l'illustre la fig. 2.25 pour la moyenne et la fig. 2.26 pour l'écart-type.

Comparaison des moyennes  $\mu_{III}$  de la période (III) entre la classe de durée 24 heures et celle de 1 jour

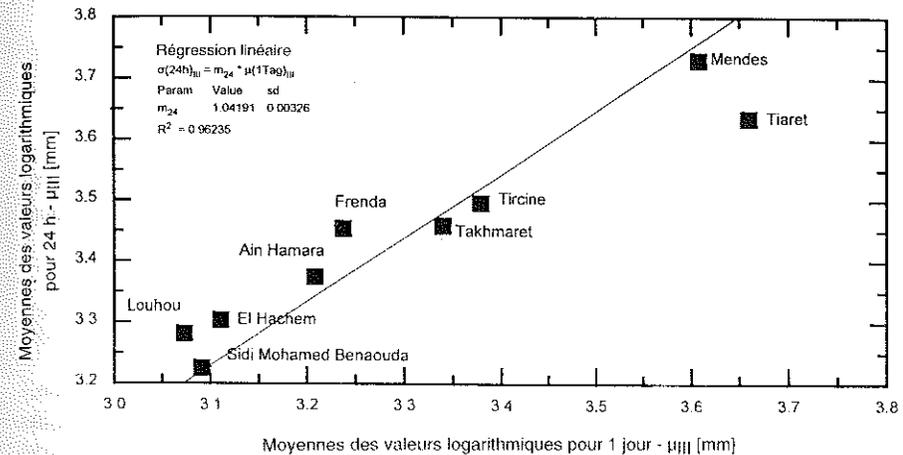


Fig. 2.25. Comparaison des moyennes  $\mu_{III}$  de la période (III) entre la classe de durée 24 heures et celle de 1 jour

La corrélation est nettement meilleure pour les moyennes que pour les écarts-type, pour lesquels la dispersion est assez forte. Ceci ne pourrait être amélioré que par des séries de données plus longues, malheureusement inexistantes.

Comparaison des écarts-type  $\sigma_{III}$  de la période (III) entre la classe de durée 24 heures et celle de 1 jour

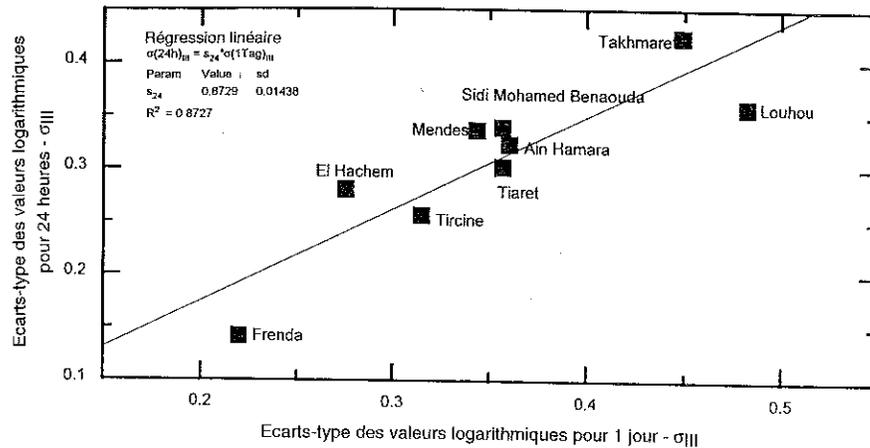


Fig. 2.26 Comparaison des écarts-type  $\sigma_{III}$  de la période (III) entre la classe de durée 24 heures et celle de 1 jour

Les rapports établis par les fig. 2.25 et 2.26 permettent ainsi de déduire la moyenne et l'écart-type pour la classe de durée 24 heures à partir des données journalières. On a :

$$\begin{aligned} \mu_{III}(24h) &= m_{24} * \mu_{III}(1d) \\ \sigma_{III}(24h) &= s_{24} * \sigma_{III}(1d) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dans ce but on a comparé dans les fig. 2.25 et 2.26, à l'exemple de Frenda, les valeurs extrêmes données par la série pluviographique (24 heures) et la série pluviométrique (1 jour) pour les années 1977-1992. Pour les valeurs journalières on dispose cependant pour chaque station (1910-1990: série I) des valeurs moyennes  $\mu_I$  et des écarte-type  $\sigma_I$ . A condition que la valeur des rapports  $\mu_{24}$  et  $\sigma_{24}$  puisse être considérée comme indépendante de la longueur de la série, la relation de la formule 2.4 vaut aussi pour la série I. Une étude entreprise dans le cadre du projet 'exploitation coordonnée des averses à forte intensité en vue de la zonation' ('koordinierte Starkregen-Regionalisierung-Auswertung KOSTRA 1987') montre que cette relation linéaire n'est certes pas une grandeur absolument fixe, mais donne une approximation acceptable (cf. fig. 2.27 issue de DVWK 1991).

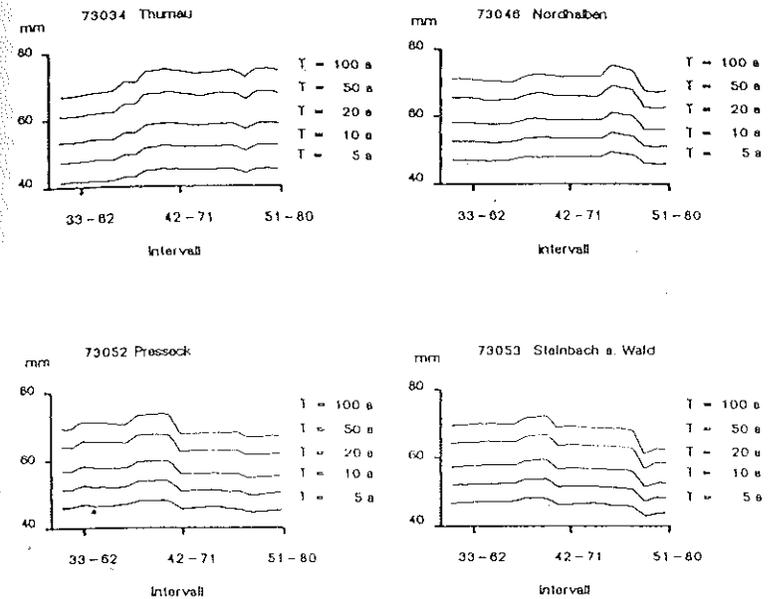


Fig. 2.27 Hauteurs d'averses intenses pour  $D=24$  h et  $T_{II} = 5a - T_{II} = 100a$

#### 4ème étape

En admettant que les relations moyennes - classe de durée et écart-type - classes de durée des fig. 2.22 et 2.23 sont spécifiques pour chaque station, la formule 2.4 permet de rapporter la relation hauteur-durée-fréquence pluviographique à toute série pluviométrique correspondante, étant donné la relation constante entre les classes de durée 1 jour et 24 heures. La fig. 2.28 schématise la procédure.

Est donné en annexe l'ensemble des résultats de cette méthode pour les 9 pluviographes rapportés à la série de référence de la station Oued el Abtal (1910-1990). La comparaison des séries originales courtes (III) des pluviographes avec la longue série de référence (I) montre une tendance à la diminution des valeurs extrêmes déjà documentée par THEISEN (1990) pour les extrêmes journaliers.

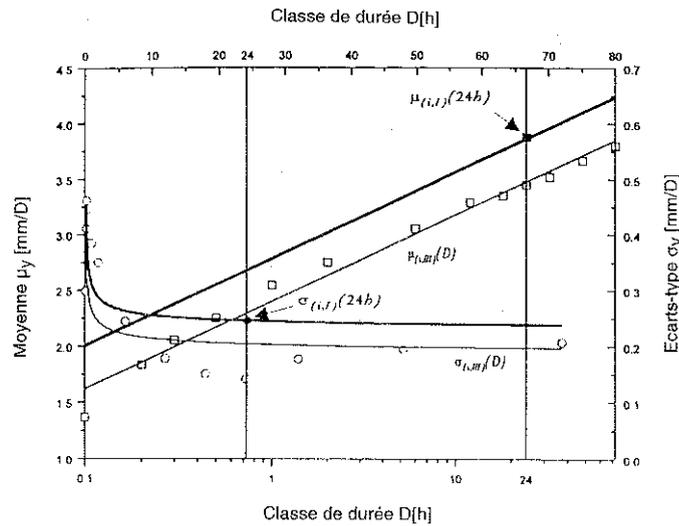


Fig. 2.28 Schéma de l'ajustement des paramètres statistiques d'une station pluviographique de la période (III) à la série de référence (I)

5ème étape

Il est impossible pour une région inhomogène d'une superficie de plus de 5 000 km<sup>2</sup> de faire une zonation des relations FPD avec seulement 9 informations stationnelles. On ne dispose pas d'autres informations pluviographiques en Algérie septentrionale. Prendre en compte le réseau beaucoup plus dense de pluviomètres à lecture journalière suppose donc de connaître les relations fonctionnelles respectives entre les classes de durée et les paramètres statistiques. Puisqu'on peut admettre qu'en cas d'advection les précipitations ont une structure homogène, les paramètres  $\mu_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  des formules 2.2 et 2.3 concernant les pluviographes ont été moyennés et les paramètres  $\mu_1$ ,  $\sigma_1$  déterminés de manière analogue à la procédure d'ajustement de la 4ème étape.

La comparaison des résultats pour les pluviométries avec la procédure appliquée aux pluviographes, ci-dessus exposée, donne pour toutes les classes de durée >6 heures des différences très faibles (fig. 2.29 et 2.30). Les deux procédures sont donc considérées comme valables pour ces classes de durée.

Une estimation de la dispersion des relations de fréquence pluie-durée pour les classes de durée <6 heures a été menée, à titre d'exemple, pour Oued el Abtal. Les précipitations pour ces classes de durée sont liées essentiellement à des averses orageuses convectives locales; on ne peut donc s'attendre à ce que la relation fonctionnelle entre les classes de durée et les paramètres puisse être décrite de manière fiable en moyennant les paramètres. On a alors tenu compte aussi des valeurs minimales et maximales des paramètres pour déterminer la dispersion des résultats. Il s'avère que celle-ci diminue avec la croissance des classes de durée, ce qui est lié au passage des précipitations convectives aux advectives (cf. fig. 2.31 et 2.34).

Relations FPD de Freneda, période (I) 1910-1990

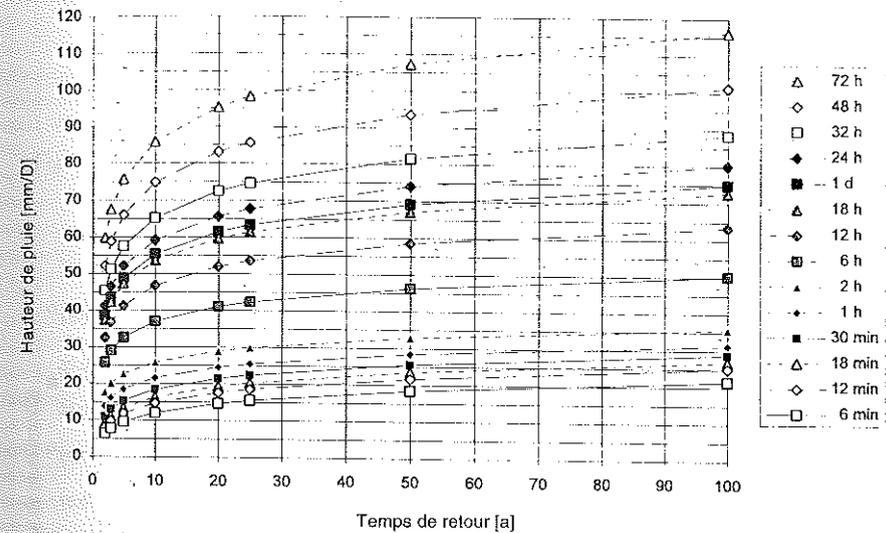


Fig. 2.29: Relations FPD de Freneda, période (I) 1910-1990

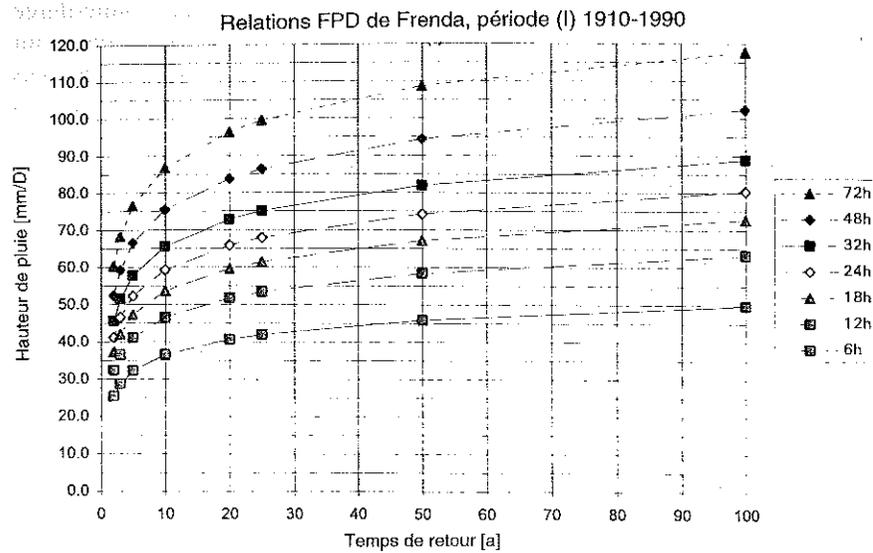


Fig. 2.30 Relations FPD de Frenda, période (I) 1910-1990

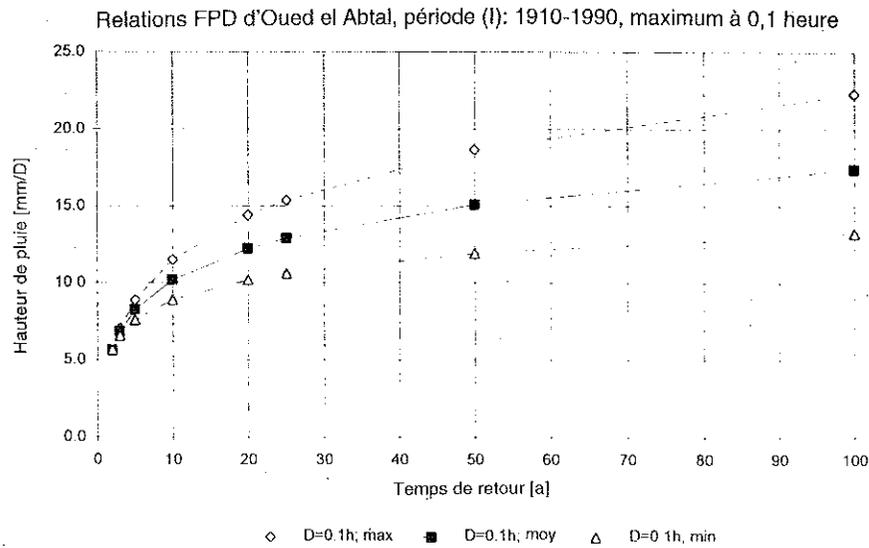


Fig. 2.31 Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 0,1 heure

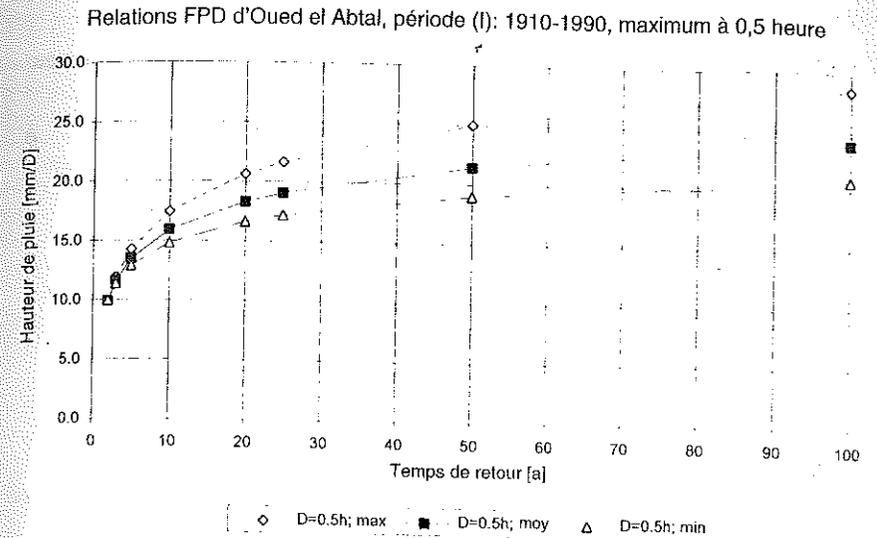


Fig. 2.32 Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 0,5 heure

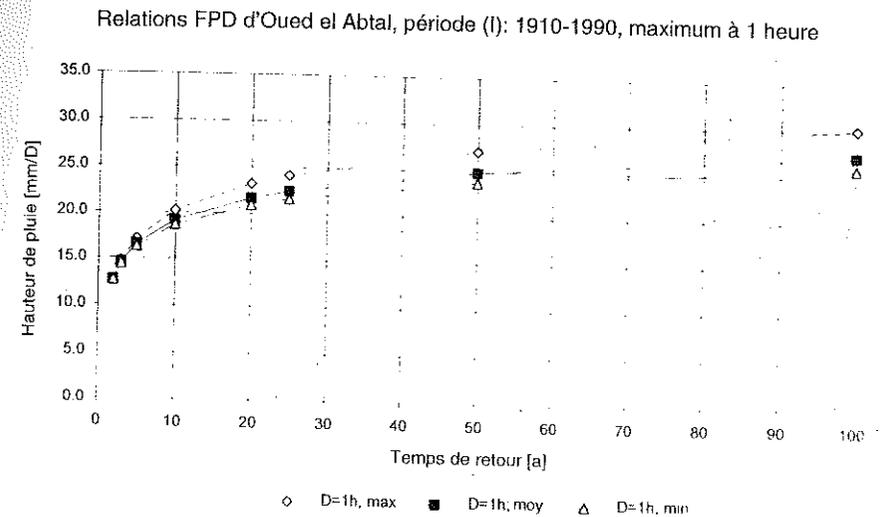


Fig. 2.33 Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 1 heure

Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 6 heures

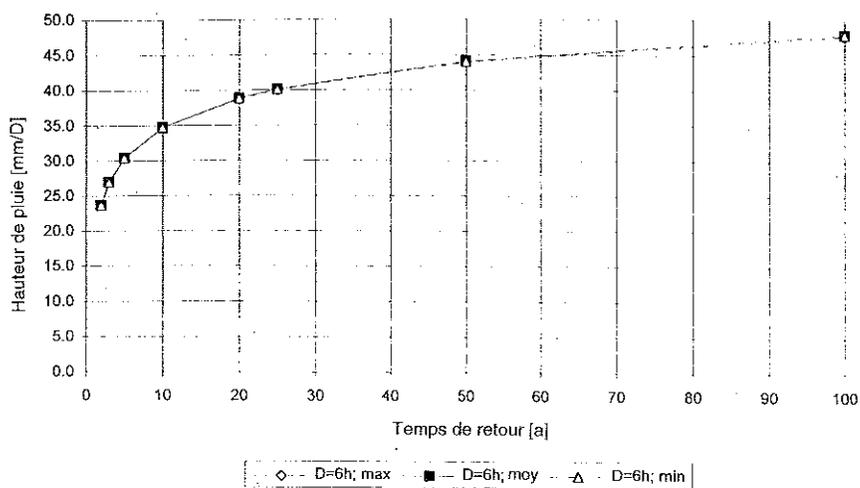


Fig. 2.34 Relations FPD d'Oued el Abtal, période (I): 1910-1990, maximum à 6 heures

L'ANRH (1993) a comparé les hauteurs de précipitations extrêmes pour les classes de durée 24 et 72 heures avec les extrêmes annuels; la corrélation est forte (fig. 2.35), ce qui confirme la tendance à la diminution des hauteurs journalières extrêmes. Cette corrélation est utilisée par 'KOSTRA 87' (DVWK 1991) pour la zonation des précipitations de forte intensité. Remarquons toutefois qu'on ne peut en déduire des conclusions pour des précipitations <6 heures, car celles-ci ne sont pas déterminées par la répartition des masses d'air, mais répondent à des facteurs locaux; il faut alors tenir compte des conditions météorologiques et physiques.

Ces 5 étapes représentent une procédure permettant de décrire pour le bassin-versant de l'Oued Mina et pour la série 1910-1990 les précipitations extrêmes  $\geq 6$  heures en utilisant l'information pluviométrique. La zonation et la cartographie est faite, comme pour les valeurs journalières, par un kriegeage du type 'external-drift'. La fig. 2.36 montre les isohyètes pour une période de retour de 50 ans et une durée de 24 h.

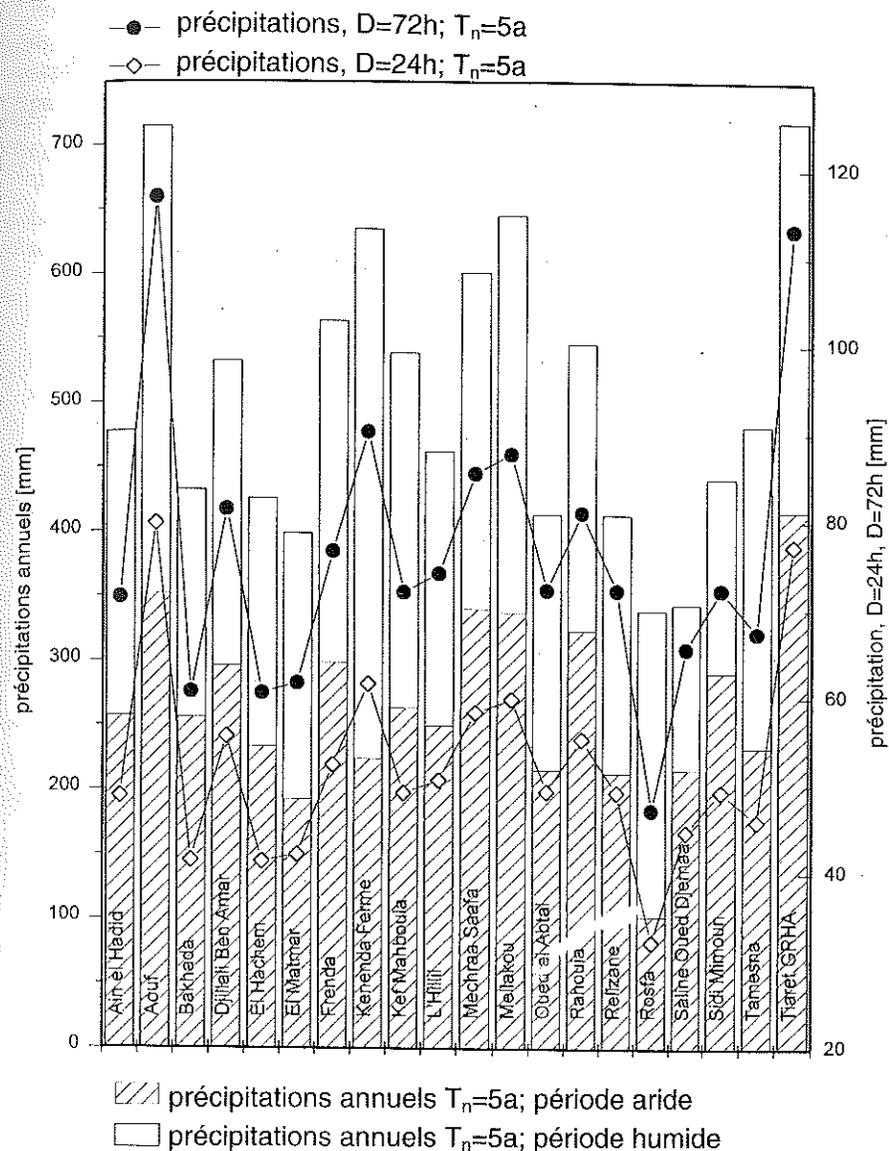


Fig. 2.35 Comparaison des extrêmes de précipitations annuels (ANRH 1993) avec les extrêmes en 24h et 72h

### Extremniederschläge der Dauerstufe 24 Stunden

Wiederkehrintervall 50 Jahre  
Zeitreihe (I): 1910 - 1990

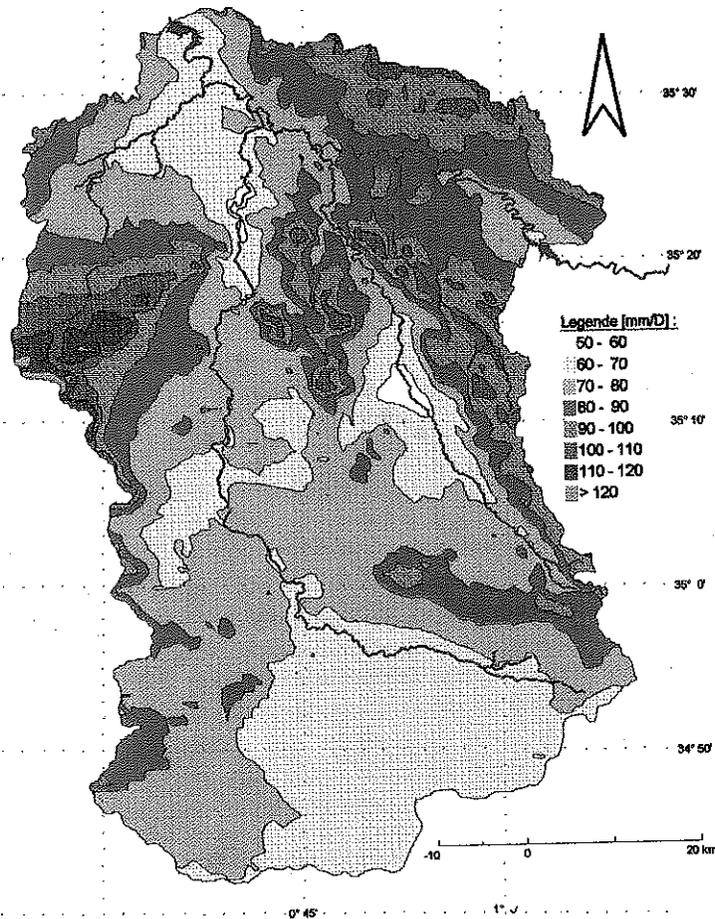


Fig. 2.36 Précipitations extrêmes en 24 heures (temps de retour 50 ans, période (I): 1910-1990)

### 2.5. L'érosivité

Pour un certain nombre d'auteurs, évoqués en introduction, l'agressivité des orages d'été serait une cause importante de l'érosion des sols en Algérie septentrionale. L'exploitation des pluviographes décrite en 2.5 ne confirme pas cette opinion pour le bassin-versant de l'Oued Mina.

On utilise le facteur R de l' 'équation universelle de perte en sol, USLE' de Wischmeyer et al. (1978) qui sera présentée rapidement au chapitre 4. Le facteur R résulte de la somme de l'énergie des averses et de l'intensité maximale en 30 minutes correspondante selon la formule:

$$R = \sum E_{kin} I_{30,max} \quad (2.5)$$

L'énergie des précipitations est donnée par de WISCHMEYER *et al.* (1978) selon une formule décrivant celle des précipitations tropicales:

$$E_{kin} = \sum (11.89 + 8.73 \log I_i) N_i [N / h a] \quad (2.6)$$

où  $N_{ri}$  [mm/h] est l'intensité et  $N_{hi}$  [mm] l'abondance correspondante pour la durée  $i$  pour un événement. Selon Schramm (1994), mieux adaptée au domaine tempéré est la relation de Brandt (1989):

$$E_{kin} = \sum (8.95 + 8.44 \log I_i) N_i [N / h a] \quad (2.7)$$

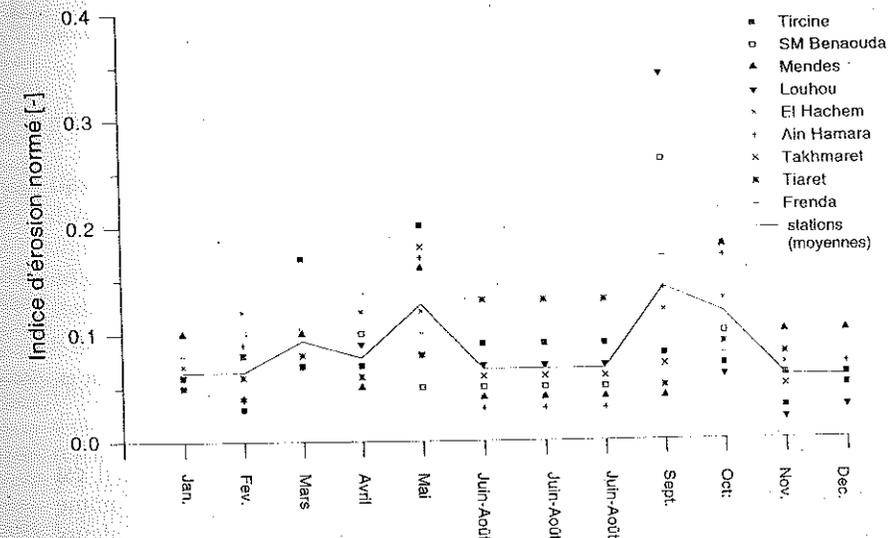


Fig. 2.37 Distribution de l'indice d'érosion normé pour des événements mensuels avec  $P_{\mu} = 0.95$  pour l'année

L'analyse des valeurs de R pour l'ensemble des événements et des stations pour la totalité de leur durée d'exploitation, montre pour une probabilité de sous-dépassement au seuil de 95%, des valeurs un peu plus élevées pour les mois de mai, septembre et octobre. Comme il n'y a que très peu d'événements en été, de juillet à août, ces mois ont été considérés dans un premier temps en bloc et leurs valeurs divisées par trois pour permettre la comparaison avec les autres. Après avoir normé ces valeurs avec les totaux annuels par station, on a représenté l'évolution de la probabilité d'occurrence de précipitations érosives au cours de l'année (fig. 2.37).

Si l'on considère non seulement la distribution relative de l'érosivité, mais les chiffres absolus, un seul événement peut parfaitement correspondre à la moyenne pluriannuelle pour la probabilité de sous-dépassement au seuil de 95% choisie. En d'autres mots, des événements rares d'une période de retour de 20 ans peuvent avoir une érosivité du même ordre de grandeur que la moyenne pluriannuelle.

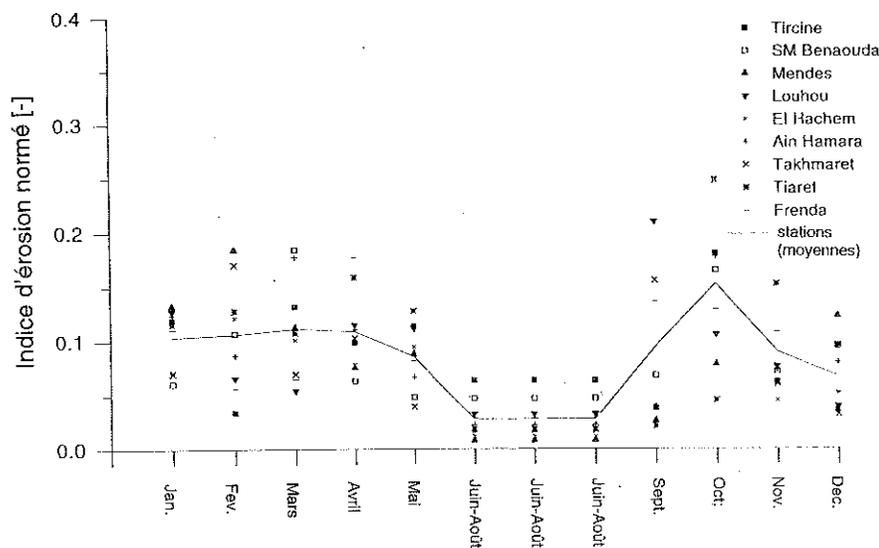


Fig. 2.38 Distribution relative de la somme mensuelle de l'indice R de WISCHMEYER et SMITH (1978)

Les valeurs mensuelles sont encore moins contrastées, de sorte qu'il est très difficile de déterminer quels sont les mois les plus menacés. Comme pour les événements individuels, elles semblent aussi indiquer des valeurs légèrement supérieures pour les mois d'automne pour tous les pluvio-

graphes. Par contre les mois d'été, juin à août, sont nettement en retrait, de façon qu'on ne peut parler d'une menace érosive supérieure pour les orages d'été.

Si on compare le facteur R annuel avec les chiffres d'Europe centrale, le bassin-versant de l'Oued Mina ne se distingue pas non plus par des

L'érosivité; valeurs annuelles du facteur R de WISCHMEYER et SMITH (1978) [N/h*a]									
	Ain Hamara	El Hachem	Freneda	Louhou Parat	Mendes	SM Benaouda	Tircine	Takhmaret	Tiaret GRHA
1970	62								
1971	105								
1972	115						49		
1973	44						27		
1974	67			135			13		42 67
1975	52			75			53		55 55
1976	55	77		51			45		61 35
1977	48	21	79	56	103		51		19 99
1978	104	71	52	47	272		135	52	45 91
1979	54	46	63	41	83		57	55	50 156
1980	51	21	48	94	71		25	37	72 108
1981	18	37	108	33	77		24	81	26 66
1982	63	97	41	12	147		77	21	56 66
1983	83	25	40	14	96		29	4	10 90
1984	45	22	81	29	81		46	19	12 65
1985	38	21	90	28	135		52	35	58 172
1986	115	149	122	54	79		39	48	229 117
1987	34	43	42	75	72		16	30	87 345
1988	59	114	192	98	57		35	52	29 234
1989	56	25	82	36	104		8	57	154 88
1990	19	2	93	45	3			44	
1991		26	35	7				10	19
moyenne	61	50	72	52	99		43	39	64 105
médiane	55	32	79	46	82		42	40	55 99

Tab. 2.3 Valeurs annuelles du facteur R de WISCHMEYER et SMITH (1978)

précipitations particulièrement érosives, comme on le pense parfois, mais il a des valeurs plutôt modérées. AUERSWALD (1992) indique pour la Bavière un facteur R moyen annuel de 71 [N/h\*a], la fourchette pour divers petits bassins-versants allant de 55 [N/h\*a] à 118 [N/h\*a]. Les chiffres du bassin de l'Oued Mina ne sont pas supérieurs. Si on considère en outre que les indices moyens les plus élevés du tabl. 23 concernent des stations sur les marges ou en-dehors du bassin, le caractère modéré du régime de précipitations est évident.

On ne peut présenter une zonation directe, quantitative du facteur d'érosivité selon WISCHMEYER *et al.* (1978), car on connaît mal la répartition des intensités de très courte durée. Mais les données du chap. 2.4 peuvent être utilisées pour une vue d'ensemble qualitative, utilisable en planification régionale pour une pondération relative. En admettant qu'il existe une relation entre les hauteurs de pluie annuelles et les événements d'intensité extrêmes (cf. chap. 2.4), la distribution spatiale des premières

peut servir d'étalon pour l'énergie des précipitations. Si, selon la structure formelle de la formule (2.5), on détermine l'érosivité à partir de l'énergie et d'une intensité maximale, les valeurs extrêmes de précipitation de la classe de durée 6 heures peuvent également être utilisées comme information spatiale. La fig. 2.39 croise la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles et les valeurs extrêmes pour la classe de durée 6 heures pour une période de retour de 2 ans.

On trouve dans la bibliographie des relations empiriques déterminant l'érosivité à partir des totaux de précipitation (cf. SHARMA *et al.* 1991, ARABI *et al.* 1993, etc.), de sorte que toute carte des précipitations annuelles peut servir pour une estimation qualitative de l'énergie des précipitations et de l'érosivité.

### Mittlere Erosivität der Niederschläge

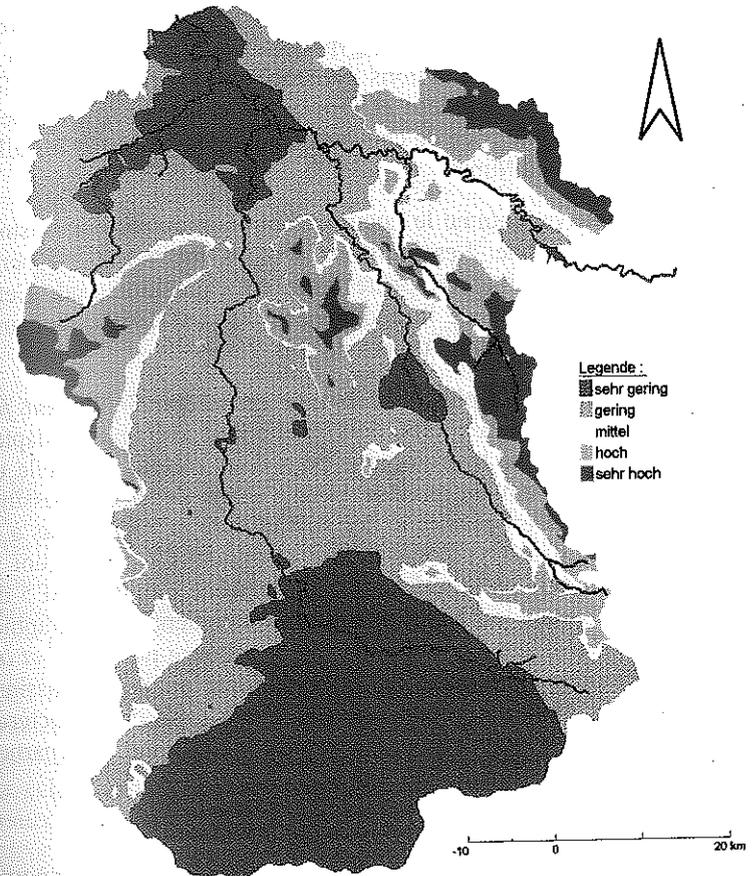


Fig. 2.39 Erosivité moyenne des pluies dans le bassin-versant de l'Oued Mina

## 2.6. Géologie et sols.

Le bassin-versant de l'Oued Mina s'étend sur le domaine de l'Atlas, au Sud, et celui du Rif-Tell, au Nord. Dans le premier affleurent pour l'essentiel des faciès de calcaires compacts et de strates marneuses du Trias et du Jurassique: c'est le domaine de la meseta oranaise, zone de couverture plus ou moins rigide. Le Tell, au Nord, s'est mis en place depuis le Crétacé supérieur avec une structure complexe; il est constitué de marnes avec, subordonnés, des calcaires, des grès calcaires et des dolomites. Les marnes contiennent des lentilles de sels et de gypse, très solubles. Les fonds de vallée sont occupés par des alluvions pleistocènes. Le paysage du Tell reflète l'interaction entre orogénèse et érosion. Le contact entre les deux domaines correspond à une zone de chevauchement, exploitée par la vallée du cours moyen de l'Oued Mina.

La tectonique est active, comme le documentent entre autres des séismes récents de forte magnitude. Les incisions sont asymétriques, en pente faible en exposition nord et en pente forte en exposition sud. Cette asymétrie a fortement influencé la pédogenèse (BLUM 1989), d'où une forte corrélation entre exposition et types de sols.

Une carte des sols a été établie en début de projet par l' 'Institut für Angewandte Geowissenschaften' (IFG 1987); elle s'est avérée peu adaptée aux besoins de la recherche hydrologique pour deux raisons: l'échelle de 1:100 000 est insuffisamment précise pour l'étude de petits bassins-versants, et la classification génétique des sols utilisée ne répond pas à la nécessité de disposer d'une typologie à base physique. C'est pourquoi la classification a été établie par l'exploitation d'une scène Landsat TM 5 du 27 janvier 1990, effectuée au Laboratoire Environnement, Cartographie, Télédétection de l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg par VOGT *et al.* (1992), mieux adaptée à la recherche hydrologique en petits bassins-versants et à l'application aux zones voisines. Cette carte des caractères physiques des sols a été établie pour l'ensemble de la zone des marnes tertiaires du bassin-versant (env. 1 000 km<sup>2</sup>).

Les données de télédétection présentent les avantages suivants :

1. réduction importante en coût et en temps de travail par rapport à une cartographie pédologique classique, de l'ordre du vingtième selon les pédologues qui ont collaboré au projet;
2. bonne résolution géométrique et radiométrique en utilisant Landsat TM; on a donné la préférence à celui-ci par rapport à SPOT, malgré une résolution géométrique légèrement supérieure pour ce dernier;

3. caractère synchrone des données sur une scène, qui favorise les comparaisons avec la végétation et l'humidité du sol.

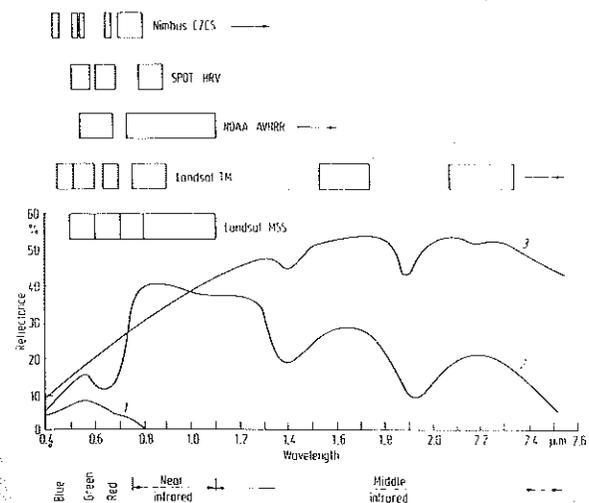


Fig. 2.40. Domaine spectral des systèmes de télédétection majeurs: in RICHARDS (1986)

La fig. 2.40 illustre les particularités spectrales de Landsat TM par rapport aux autres systèmes civils de télédétection. Elle montre le comportement réfléchissant théorique de l'eau, de la végétation et du sol. Seul Landsat TM dispose de l'infra-rouge moyen (IRM), utile pour appréhender les variations d'humidité de la végétation et des sols (RICHARDS 1986, VOGT et VOGT 1991).

VOGT (1991) décrit de manière détaillée la méthode de classification des caractères physiques des sols. Au lieu de la technique usuelle de la classification supervisée, on utilise comme image de départ pour le choix des échantillons d'entraînement la composition colorée de l'ACP de 6 canaux de Landsat TM, à l'exclusion du thermique. Les trois premiers facteurs de l'ACP expliquent plus de 95% de la variance totale. Par rapport au choix des pixels d'entraînement par interprétation visuelle d'une image fausses couleurs générée à partir de trois canaux satellitaires (souvent, pour Landsat TM, les 1, 5 et 7), cette méthode a l'avantage de contenir en une seule image la presque totalité de l'information de la scène. On minimise ainsi le danger de négliger des caractères importants.

On a pu ainsi mettre en évidence des caractères physiques importants qui échappent à l'observation de terrain et qui peuvent donc difficilement être représentés sur une carte pédologique traditionnelle. On a pu différencier des sols d'apparence analogue, en particulier sols salés et non salés. Le

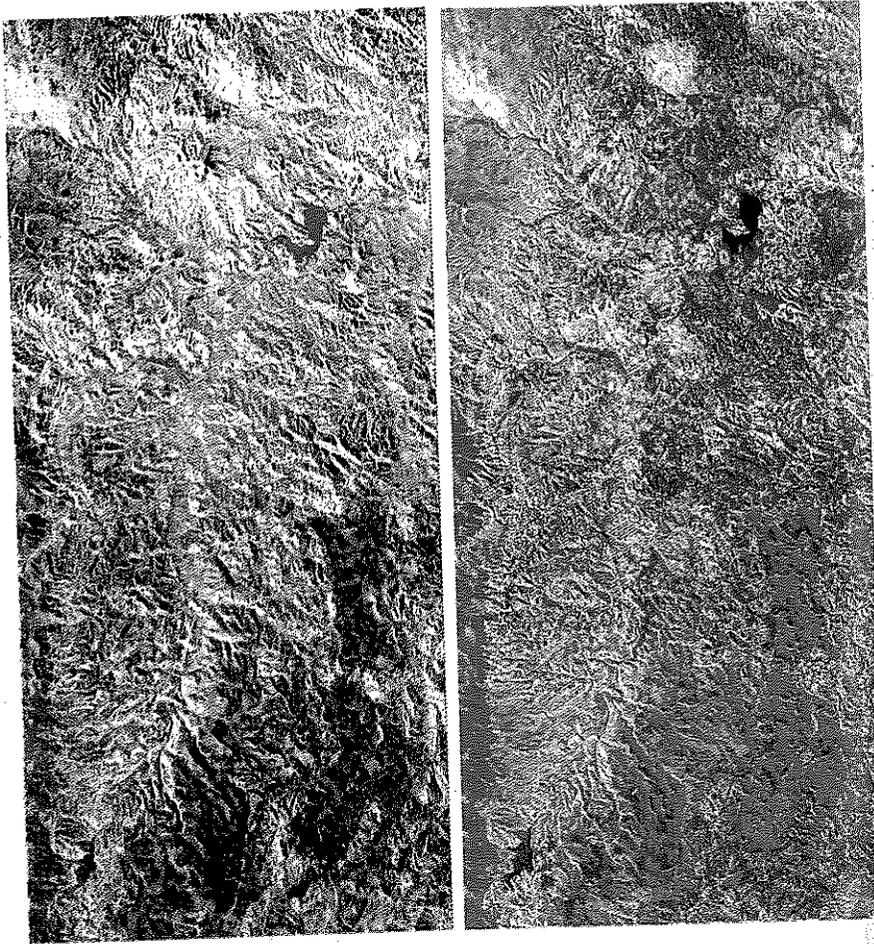


Fig. 2.41 Landsat TMS 27.1.1990; canal 4 (cyan), canal 3 (magenta), canal 1 (jaune)

Fig. 2.42 Analyse en Composantes Principales. Facteur 1 (cyan), 2 (magenta), 3 (jaune)

tabl. 2.4 présente les classes de sol définies par VOGT *et al.* (1992) après vérification sur le terrain et au laboratoire. Les indications sur les parts de surface occupées dans le bassin-versant partiel de Telfit (cf. fig. 2.3) et pour l'ensemble de la zone des marnes tertiaires (cf. fig. 2.2) ont été déterminées par l'auteur au moyen d'un SIG.

Classes de sols selon VOGT <i>et al.</i> (1992)	Désignation selon VOGT <i>et al.</i>	N° fichier	classe/groupe pédologique	surface Telfit [%]	surface zone des marnes [%]	remarques
1	sols argileux profonds sur versants	1	vertisol	10,51	5,61	profond, culture de céréales
2	sols argileux profonds des plateaux	2	vertisol	7,54	11,28	profond, culture de céréales
3	sols argilo-limoneux	3	vertisol	0,67	5,78	profond, culture de céréales
4	sols limoneux à charge grossière	4	rendzina	2,25	9,53	peu profond, culture de céréales
5	sols rouges épais sur croûte calcaire	17	sols à sesquioxides de fer	2,52	5,65	profond, culture de céréales
6	sols rouges sur croûte calcaire	5	rendzina	0,24	6,78	peu profond, pas de végétation
7	sols rouges sur sables	6	inconnu	0,01	1,62	
8	sols argileux sur marnes	8	solonchak, solonetz	3,6	4,03	salin, non cultivé
9	sols argileux à charge grossière	7	vertisol	15,85	11,19	fortement fendillé
10	sols de la basse terrasse	10	vertisol	11,16	9,83	exploitation intense
11	sols de la basse terrasse irrigués	11	vertisol	1,62	2,63	exploitation intense
12	sols des terrasses moyennes salés	9	solonchak, solonetz	14,72	12,21	salé, encroûté, fendillé, non cultivé
13	sols argileux salés	12	vertisol	10,7	3,83	salé, peu profond, non cultivé
14	sols argilo-limoneux salés	13	vertisol	3,35	1,12	salé, non cultivé
15	bad-lands	14	regosol	3,41	3,25	non exploité
16	bad-lands à couverture grossière	15	regosol	7,77	1,79	non exploité
17	croûte calcaire affleurante	16		1,52	1,78	non exploité
18	sables vifs	18		0	0,59	
19	vegetation	19		0	0,15	
20	ombre	20		2,56	0,9	
21	eau	21		0	0,45	

Tab. 2.4 Classes de sols selon VOGT *et al.* (1992)

Les différentes classes physiques des sols selon VOGT *et al.* (1992) ont une distribution préférentielle en fonction de l'exposition (fig. 2.43). Les sols labourables se trouvent de préférence en exposition nord à ouest, alors que les sols non labourables et les badlands se trouvent presque exclusivement en exposition sud à sud-est.

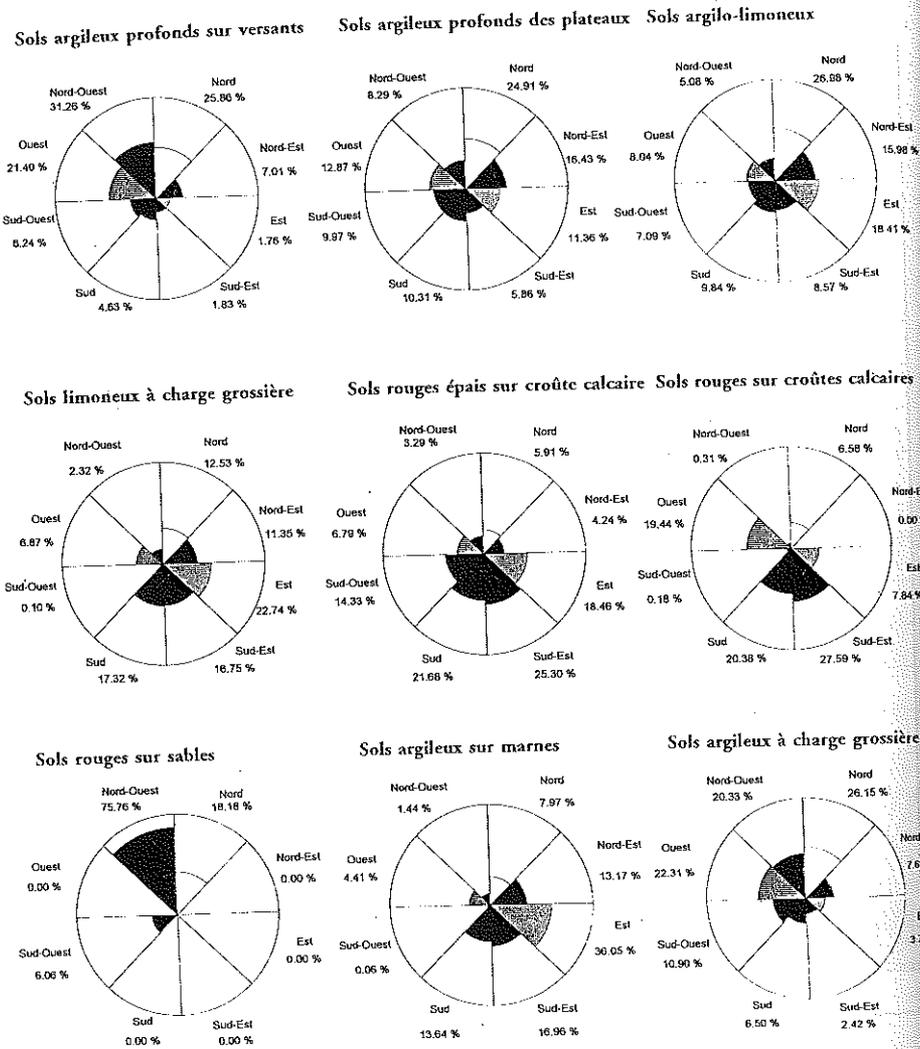


Fig. 2.43 Exposition des classes de sols selon VOGT *et al.* (1992) dans le bassin-versant du Telfifit

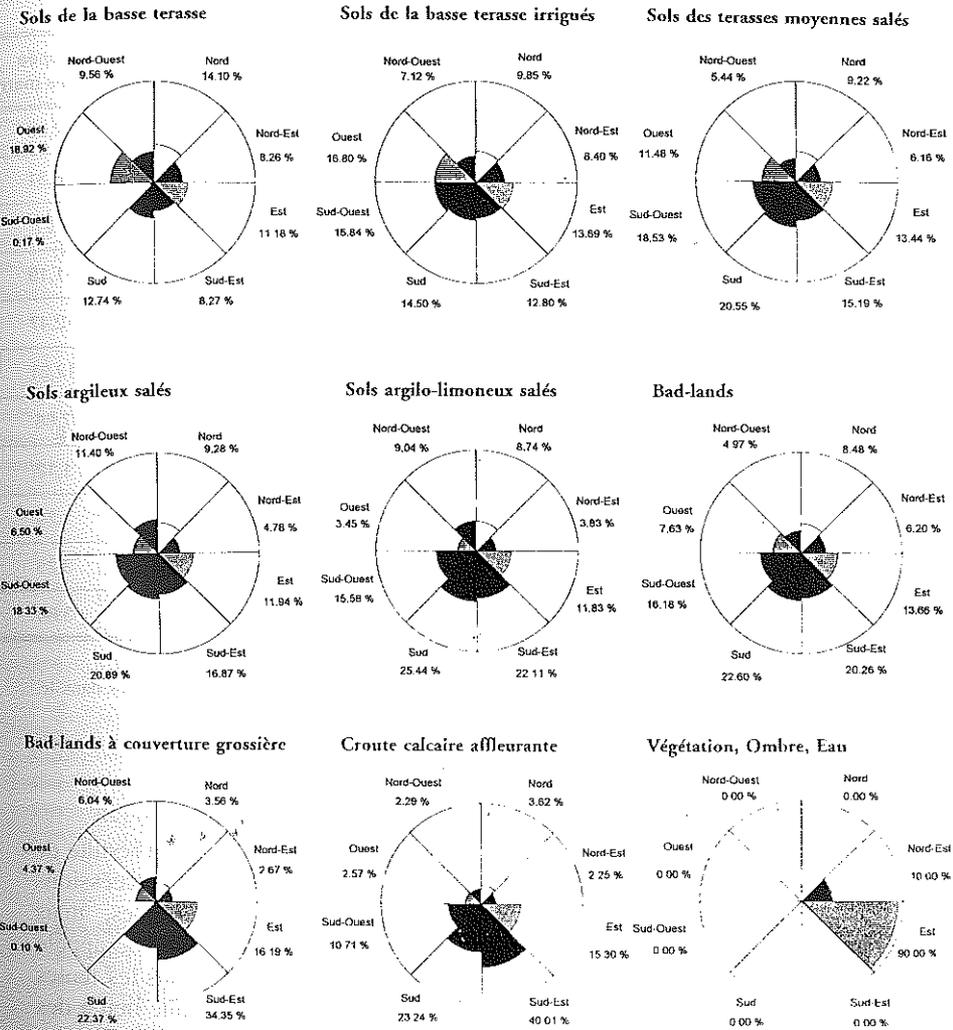


Fig. 2.43 Exposition des classes de sols selon VOGT *et al.* (1992) dans le bassin-versant du Telfifit

La typologie très détaillée de la carte physique des sols a pu être réduite à 11 classes en vue de l'interprétation hydrologique, sans que la précision en ait été sensiblement réduite pour la zone pilote, ainsi que le montre la comparaison des fig. 2.44 et 2.45. La nouvelle classification a été mise au point en collaboration avec les pédologues par regroupement de classes voisines.

Classe hydrologique de sol	Type de sol selon VOGT et al. (1992)	Désignation / caractérisation	surface occupée	
			Telfifit	zone des marnes
1	1 - 3	vertisols très filtrants, stables	18,73	22,66
2	4 + 6	sols stables très filtrants	4,77	16,31
3	5 + 7	sols rouges très filtrants	0,25	7,27
4	9	vertisols filtrants, pierreux	15,85	11,19
5	10 + 11	sols alluviaux peu évolués, formation de ruissellement	12,78	12,47
6	12	sols salins très ruisselants	14,71	12,21
7	8 + 13	sols salins ruisselants	14,3	7,86
8	14	sols salins très compacts, ruisselants	3,35	1,12
9	15	badlands ruisselants peu pierreux	3,41	1,79
10	16	badlands ruisselants pierreux	7,77	3,25
11	17 - 21	autres	4,08	3,88

Tab. 2.5 Classes de comportement hydrologique des sols pour la zone des marnes dans le bassin-versant de l'Oued Telfifit

Description des caractères des classes 'hydrologiques' des sols:

1. sols très filtrants, stables, vertisols.

Il s'agit de vertisols profonds à plus de 60% d'argile. Il en résulte de profondes et larges fentes de retrait en saison sèche. Les successions de gonflement et de rétraction ne sont pas réversibles, mais entraînent des modifications du sol par mélange intensif, appelé pédoturbation. La pénétration de matériau de surface dans les fentes de retrait, pouvant atteindre 2,50 m de profondeur, donne lieu à des zones de macropores humidifiées préférentiellement. La pression liée au gonflement peut déplacer les agrégats du sol et produire dans les cas extrêmes un relief de gilgai.

Du point de vue des aptitudes agricoles, ce sont les sols les plus profonds, les plus stables et les plus fertiles de la zone d'étude; leur capacité au champ est élevée. Dans la zone des marnes, on les trouve de préférence dans les dépressions soumises à des alternances d'humidification et d'assèchement, ainsi qu'en exposition nord;

2. sols très filtrants, stables, sur croûte calcaire.

Ils correspondent du point de vue génétique aux rendzines; ils sont moyennement à peu profonds et reposent sur une croûte calcaire. Ils se disposent généralement en arc de cercle autour des sols profonds (3), ce qui fait penser qu'ils sont dûs à l'érosion de ces derniers. La texture est équilibrée, mais le danger de colmatage par battance est plus fort que pour la classe 1;

3. sols rouges très filtrants, stables.

Il s'agit généralement de sols fortement rubéfiés, de profondeur moyenne à forte, sur croûte calcaire sous des conditions climatiques différentes: leur texture moyenne à fine, à oxydes de fer (coloration), est légèrement sensible au colmatage par battance;

4. vertisols bien filtrants et à forte pierrosité.

Ces sols sont analogues à ceux de la classe 1, mais avec une pierrosité plus forte des horizons supérieurs et un réseau tridimensionnel de fentes de retrait encore plus dense. Les raisons de la pierrosité sont inconnues. On peut penser à un mélange par transport; on sait en outre que la pédoturbation des vertisols entraîne un granoclassement avec enrichissement de matériau grossier en surface (effet dispersif intergranulaire);

5. sols alluviaux peu développés, très ruisselants.

Sols jeunes, profonds, à caractère verticale et texture variable, fine à moyenne; la structure des horizons de surface, issus en général de dépôts alluviaux, est peu stable. Ils sont moyennement sensibles au colmatage par battance, mais ont tendance à favoriser un ruissellement rapide;

6. sols salins, très ruisselants.

Sols profonds à texture argileuse, très compacts. Ils se distinguent de ceux de la classe 5 par un contenu en sel et une compaction forts. On les trouve en-dehors des zones d'inondation. Ils favorisent fortement le ruissellement.

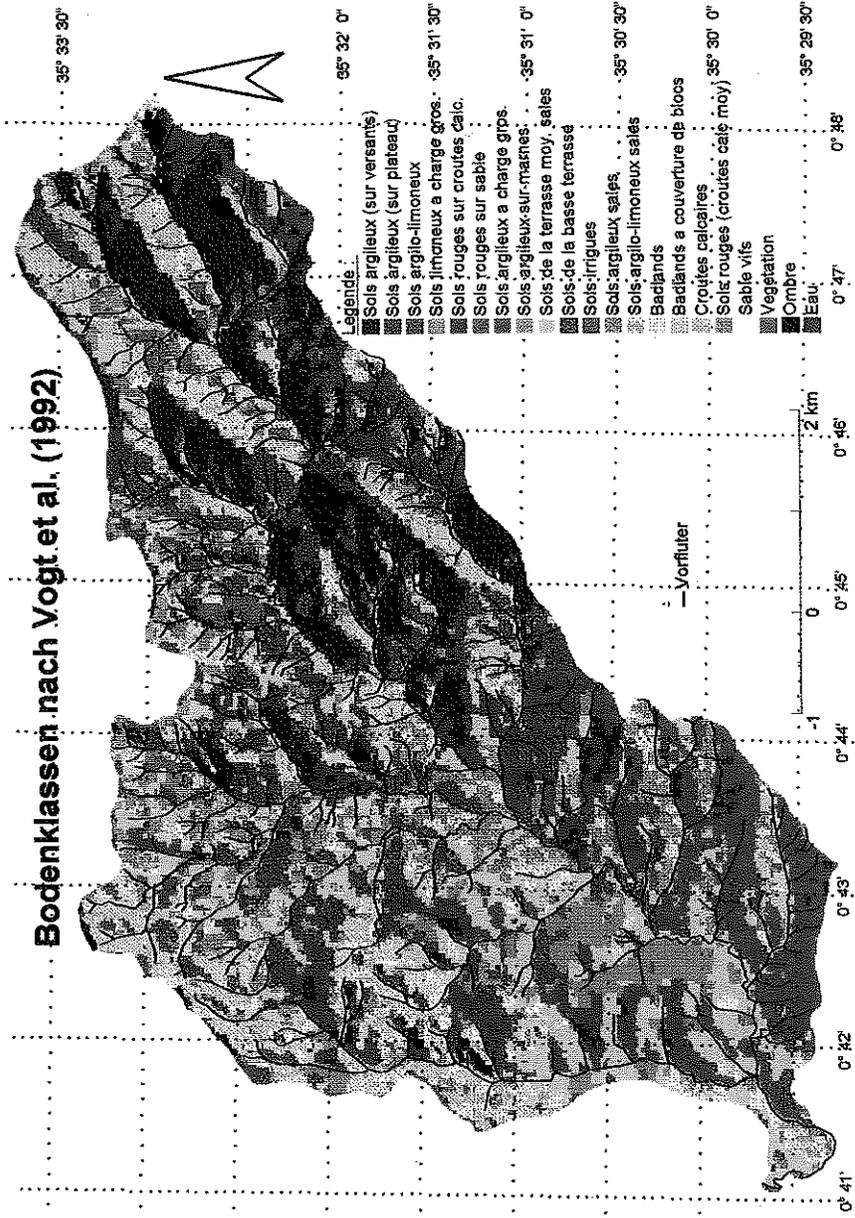
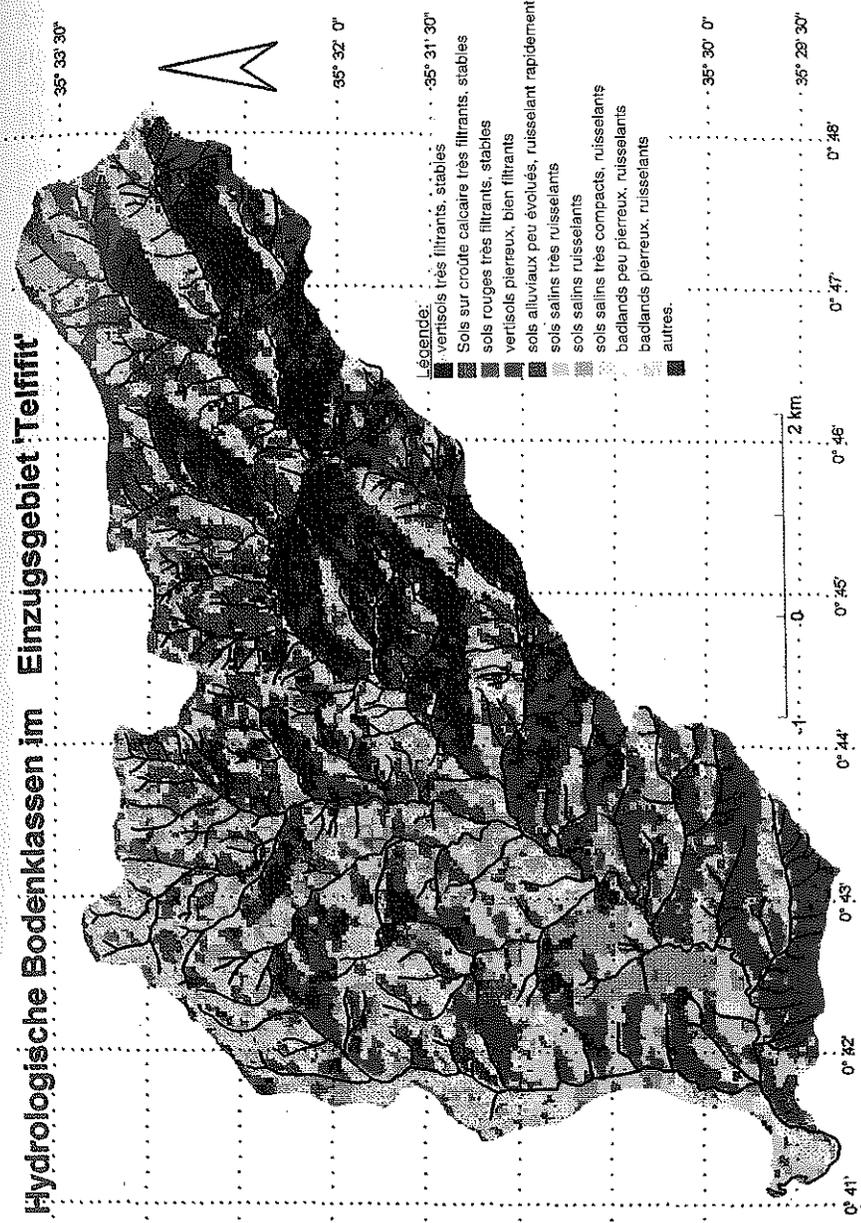
Fig. 2.44 Classes de sols selon VOGT *et al.* (1992) dans le bassin-versant "Telfifit"

Fig. 2.45 Sols classés selon leur comportement hydrologique dans le bassin-versant "Telfifit"

## 7. sols salins, bonne aptitude au ruissellement

Très proches de la classe précédente. L'horizon de surface est parfois pulvérulent. On les trouve dans l'ensemble de la zone des marnes tertiaires, en particulier dans les rigoles d'érosion et les ravins, où ils forment des zones d'accumulation;

## 8. sols salins très compacts, bonne aptitude au ruissellement.

De comportement analogue aux deux classes précédentes, mais plus compacts et par conséquent favorisant encore plus le ruissellement;

## 9 + 10. badlands, bonne aptitude au ruissellement, à pierrosité faible (9) ou forte (10).

Il ne s'agit pas de sols au sens pédologique, mais de marnes affleurantes. Selon le type de substrat la structure peut être homogène ou présenter des bancs rocheux. Les deux classes se distinguent dans une certaine mesure par la rugosité, ce qui influence le ruissellement et l'érosion;

## 11. autres.

Cette classe comprend les quelques pixels échappant à la classification ainsi que des pixels isolés de surfaces en végétation et en eau.

## 2.7. L'humidité du sol

La mesure de l'humidité du sol est généralement exigeante et peu pratiquée en Algérie. Les conditions d'humidité initiale du sol ont donc fréquemment été estimées au moyen d'indices pour tenir compte de l'humidité antécédente dans la modélisation de l'écoulement. La méthode 'Curve-Number' du SCS (1972) est bien connue: on estime l'humidité antécédente au moyen de trois classes, allant de sec à humide, et on l'introduit au moyen de coefficients dans les calculs. HUMBORG (1989) donne une mise au point sur les indices d'humidité antécédente. HANSMANN (1994) montre à l'exemple de plusieurs types de sols et de sites que l'humidité des marnes peut être correctement décrite par l'indice IK d'humidité antécédente selon CASENAVE (1982).

On a:

$$IK_n = (IK_{n-1} + N_{h,n-1}) * e^{-\alpha_r * t} \quad (2.8)$$

où :

- IK<sub>n</sub> : valeur de l'indice en [mm] avant la pluie n
- IK<sub>n-1</sub> : valeur de l'indice en [mm] avant la pluie n-1
- N<sub>h,n-1</sub> : hauteur de pluie en n-1 [mm]
- t : durée en [h] entre les deux pluies de rang n-1 et n
- α<sub>r</sub> : coefficient d'ajustement dépendant des facteurs géographiques, selon HANSMANN (1994) α<sub>r</sub> = 0,09.

HANSMANN (1994) explicite les relations fonctionnelles entre l'indice IK et l'humidité réelle pour les sols marneux du bassin-versant de l'Oued Mina.

On admet qu'en zone tempérée les rapports pluie-débit d'un bassin-versant dépendent en première ligne des intrants de précipitation (DVWK 1991); il n'en est pas ainsi en climat semi-aride: la distribution spatiale de l'humidité préalable y est fondamentale (VOGT et GOMER 1992). BRONSTERT (1994) constate qu'en climat tempéré aussi la variabilité de l'humidité initiale constitue un paramètre important et non constant dans la modélisation de l'écoulement et des processus associés.

CRIST et CICONE (1984) ont montré que la télédétection apporte une information sur l'humidité du sol. La troisième composante de la 'Tasseled Cap Transformation', qui est une utilisation particulière de l'ACP, est un indicateur d'humidité du sol. Le premier facteur peut être interprété comme un équivalent de l'indice de brillance ('brightness-index'); le deuxième, opposant le proche infrarouge aux autres canaux, est appelé 'greenness-